Svetislav Lj. Marković,
dipl. inž.
Tehnički remontni zavod,
Čačak

NEKE KARAKTERISTIKE REGENERISANIH ZUPČANIKA SA CEMENTIRANIM RADNIM POVRŠINAMA ZUBACA IZLOŽENIH HABANJU I KRUNJENJU

UDC: 621.833.1.01.004.54

Rezime:

U radu su prikazani rezultati ispitivanja na istovetnim uzorcima regenerisanih zupčanika sa cementiranim radnim površinama zubaca, koji su izbačeni iz eksploatacije zbog prekomernog habanja i krunjenja. Kontrolisane su geometrijske mere, profili, pravci bokova i radijalnog bacanja zubaca, kvalitet obrade i tvrdoća regenerisanih kontaktnih površina zubaca. Ispitivana je i tvrdoća po preseku zubaca, kvalitet navarenog sloja (defektoskopskim ispitivanjima) i mikrostruktura regenerisanih zubaca. Pored toga, analizirana je i ekonomičnost regeneracije u odnosu na novu izradu.

Ključne reči: zupčanic, regeneracija.

SOME CHARACTERISTICS OF REGENERATED GEARS WITH CEMENTED WORKING SURFACES OF COGS EXPOSED TO WEAR AND ABRASION

Summary:

The paper deals with the results of testing identical samples of regenerated gears with cemented working surfaces of cogs, put out of exploitation because of excessive wear and abrasion. Geometric measures, profiles, directions of flanks and cog radial eccentricity, quality of working and hardness of regenerated contact surfaces of cogs are controlled. The hardness of the cog cross section and the quality of welded-on layer are examined by defectoscopic tests as well as the microstructure of regenerated cogs. Finally the paper analyses the regeneration efficiency referred to completely new manufacturing.

Key words: gear, regeneration.

Uvod

Regeneracija zupčanika obuhvata otkrivanje njihovih oštećenja, uzroka i karaktera, primenu najracionalnijeg i najpouzdanijeg metoda regeneracije i metoda ojačanja radnih površina zubaca.

U toku eksploatacije na zupčanicima nastaju raznovrsna oštećenja venca i tela, kao što su: pohabanost rad-

nih površina, mehanička oštećenja, deformacije oblika i dimenzija, naprsline i lomovi. Većina zupčanika oštećenih u eksploataciji može se uspešno i pouzdano regenerisati.

Pod regeneracijom oštećenih zupčanika podrazumeva se takav redosled tehnoloških operacija koji ima za cilj povratak njihovih izgubljenih radnih karakteristika. Regeneracijom se moraju obezbediti nazivne mere i zahte-

vani kvalitet obrade površina, kao i pravilan geometrijski oblik i očuvanje (ili čak poboljšanje) osnovnih mehaničkih karakteristika materijala regenerisanog zupčanika. Da bi se to uspešno ostvarilo, neophodno je dobro poznavanje: uzroka koji izazivaju oštećenja, karakteristika nastalih oštećenja i njihovih dimenzija, metoda za utvrđivanje oštećenja, opreme za regeneraciju, osnovnih tehnoloških i fizičko-mehaničkih karakteristika metalnih slojeva koji se nanose na oštećene površine i drugih parametara.

Osnovni vidovi razaranja i oštećenja venaca zupčanika, u zavisnosti od uslova u kojima rade zupčanici, njihovih konstruktivnih i tehnoloških parametara, mogu biti:

- lom zubaca,
- krunjenje radnih površina zubaca,
- abrazivno habanje,
- zadiranje ili zajedanje,
- plastično deformisanje površinskih slojeva materijala,
- oštećenja čela zubaca.

Uzroci oštećenja zupčanika vezani su, s jedne strane, za netačnost podataka o opterećenjima, koja deluju na prenosnik i, s druge strane, za odstupanje stvarne čvrstoće zubaca od proračunske, pod uticajem konstruktivnih, tehnoloških i eksploatacionih faktora, nedovoljno uzetih u obzir pri projektovanju. Dejstvo različitih uzroka pokazuje se u pojavi dopunskih sila; koncentraciji napona, nepovoljnom rasporedu zaostalih (unutrašnjih) napona, smanjenju mehaničkih karakteristika materijala i slabljenju opasnog preseka zupca.

Najčešće korišćeni metodi defekatacije zupčanika su:

- vizuelni metod (za uočavanje loma zubaca, krunjenja, zadora metala, plastičnog deformisanja, smicanja,

stvaranja jamica, naprslina na zupcima, glavčini i telu zupčanika),

— komparativni metod (upoređenjem sa etalon-zupčanicima radi određivanja veličine habanja, krunjenja, nagnječenja),

— tehnička merenja (merenjem mere preko zubaca i tetivne debljine zupca određuje se veličina habanja; merenjem prečnika otvora i širine žlebova određuje se istrošenost naležućih površina),

— laboratorijska ispitivanja (najčešće se meri tvrdoća radnih površina zubaca i određuje položaj i veličina naprslina — defektoskopskim ispitivanjima).

Regeneracija zupčanika može se odnositi na: regeneraciju glavčine, regeneraciju venca i tela, i regeneraciju zubaca zupčanika (slika 1).

Za većinu zupčanika, a posebno za zupčanike koji prenose veliku snagu, modula $m = 2,5$ do 6 mm, primenjuje se površinsko ojačanje zubaca, koje može biti termičko (indukciono kaljenje), termo-hemijsko (cementacija sa kaljenjem i nitriranje) i mehaničko (profilisanim valjanjem). Normalizacija, žarenje i poboljšanje koriste se za prethodnu termičku obradu zupčanika, koji će se podvrgnuti površinskom ojačanju. Ove operacije izvode se radi poboljšanja mehaničkih karakteristika materijala zubaca i smanjenja velikih unutrašnjih napona.

Parametri tačnosti regenerisanih zupčanika

Primer uzorka, kod koga gotovo uvek dolazi do krunjenja i habanja radnih površina zubaca, jeste zupčanic I brzine i hoda unazad menjača teškog guseničnog vozila. Pri radu ovog zupčanika polovina dužine zubaca učestvuje u prenosu snage u I brzini, a druga polovina prenosi snagu prilikom hoda unazad.

Ovaj zupčanik ima sledeće karakteristike:

- materijal izrade Č.5421
- modul $m=9$
- broj zubaca $z=12$
- ugao osnovnog profila $\alpha_0=20^\circ$
- ugao nagiba zupca $\beta=0^\circ$
- podeoni prečnik $d_0=108 \text{ mm}$
- faktor korekcije $x_m=+2,7 \text{ mm}$
- podnožni prečnik $d_f=96_{-1,5} \text{ mm}$
- korak na podeonom krugu $t_0=28,27 \text{ mm}$

Pri defektaciji zupčanika otkriveno je habanje zubaca od oko $0,3 \text{ mm}$

po debljini zupca na podeonom krugu na strani I brzine i oko $0,25 \text{ mm}$ na strani hoda unazad. Pored toga, postoji veliko krunjenje cementiranih radnih površina zubaca u zoni oko i ispod kinematskog kruga. Analizom karaktera oštećenja utvrđeno je da su u ovom slučaju primarna prirodna oštećenja (nastala usled trenja i habanja površina izloženih velikim kontaktnim opterećenjima) u sprezi sa tehnološkim i poremećajnim oštećenjima.

S obzirom na visoke zahteve u eksploataciji, ocenjeno je da je najpouzdaniji metod regeneracije zupčanika ručno elektrolučno navarivanje. U okviru eksperimenta vršena su različita navarivanja na dva uzorka, i to:

Sl. 1 — Sematski prikaz metoda regeneracije zupčanika

— na prvom uzorku zupci su navarivani elektrodom CASTOLIN 2 po celoj visini zupca;

— na drugom uzorku navarivanje je vršeno tako što su glava i noga zupca (2 do 3 mm po visini zupca) navarivani elektrodom CASTOLIN 680S, a između ta dva navara — elektrodom CASTOLIN 2.

Postupak regeneracije oba uzorka je gotovo istovetan, a sastoji se od: odmaščivanja, defektacije, brušenja radi skidanja oštećenog cementiranog sloja (4,0 NČ — norma časa), pranja (0,2 NČ), navarivanja (3,0 NČ), bravarskih radova — dovođenje zubaca na približan oblik ručnom električnom brusilicom (2,0 NČ) i završnog brušenja zubaca — obimno, čeono i bočnih površina (10,0 NČ).

Kontrolom i ispitivanjem na evolventometru tipa KLINGELNBERG dobijene su vrednosti karakterističnih parametara, koje su prikazane u tabeli 1. Pored toga, date su i zahtevane vrednosti tih parametara radi lakše komparacije rezultata.

Metodom fero-fluks utvrđeno je da je kvalitet navarenog sloja dobar, to jest nema šupljina, naprslina i drugih neispravnosti.

Tvrdoća po preseku zubaca merena je na uređaju za merenje mikrotvrdoće LEITZ WETZLAR metodom Vickers (HV2) sa silom opterećenja od 19,61 N. Šematski prikaz raspodele tvrdoće kod zubaca zupčanika navarenih elektrodom CASTOLIN 2 dat je na slici 2. Na apscisi je prikazana udaljenost od površine zupca (mm), a na or-

Tabela 1

Parametri kvaliteta regenerisanih zupčanika brzine i hoda unazad

Redni broj	Kontrolisani i ispitivani parametri	Zahtevane vrednosti	Vrednosti dobijene na prvom uzorku	Vrednosti dobijene na drugom uzorku
1.	Temeni prečnik	$d_k = 127,8_{-0,5}$ mm	$d_k = 127,4$ mm	$d_k = 127,5$ mm
2.	Mera preko dva zupca	$W_2 = 43,2132$ mm $A_{wd} = -308$ μ m, $A_{wg} = -88$ μ m JUS M.C1.034	$W_2 = 42,92$ mm	$W_2 = 42,92$ mm
3.	Širina zupčastog venca	$b = 100_{-0,23}$ mm	$b = 99,9$ mm	$b = 99,9$ mm
4.	Tolerancija profila zubaca	$T_{ev} = 18$ μ m JUS M.C1.035	$T_{ev} = 16$ μ m	$T_{ev} = 15$ μ m
5.	Tolerancija bočne linije zubaca	$T_{\beta} = 18$ μ m JUS M.C1.033	$T_{\beta} = 13$ μ m	$T_{\beta} = 14$ μ m
6.	Radijalno bacanje zubaca	$T_r = 78$ μ m JUS M.C1.035	$T_r = 20$ μ m	$T_r = 18$ μ m
7.	Kvalitet obrade regenerisanih površina	N7	N7 $R_a = 1,60$ μ m JUS M.A1.020	N7 $R_a = 1,60$ μ m JUS M.A1.020
8.	Površinska tvrdoća	HRC ≥ 56	HRC = 55,9	HRC = 56,2 (na sredini zupca)

dinati tvrdoća po Vickersu (HV2). Na prikazanom detalju dat je pravac merenja tvrdoće.

visoke tvrdoće CASTOLIN 2 u kombinaciji sa elektrodom srednje tvrdoće, ali izuzetno visoke otpornosti na krti

Tabela 2

Raspored tvrdoće po preseku zupca u pravcu A

	Zona navara						Linija spoja	Zona pod uticajem toplote (ZUT)			
Udaljenost od površine (mm)	0,2	0,4	0,9	1,1	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	2,0	2,2
Tvrdoća HV2	611	626	590	612	598	584	478	400	395	380	375
Odgovara HRC	54,9	55,7	53,7	54,9	54,1	53,3	46,7	40,5	40,1	38,9	38,5

	Zona pod uticajem toplote (ZUT)							Osnovni materijal		
Udaljenost od površine (mm)	2,5	2,8	3,3	4,3	4,8	5,3	6,5	7,0	7,8	8,0
Tvrdoća HV2	363	354	352	357	381	372	347	317	295	319
Odgovara HRC	37,5	36,7	36,5	36,9	39,0	38,3	36,0	32,6	29,5	32,9

Sl. 2 — Raspodela tvrdoće po preseku zupca od čelika za cementaciju Č.5421 navarenog elektrodom CASTOLIN 2 (I) i novog zupca posle cementacije i termičke obrade (II)

NS — navareni sloj, ZUT — zona pod uticajem toplote, OM — osnovni materijal

Na slikama 3 i 4 prikazani su rezultati merenja tvrdoće po preseku zubaca zupčanika navarenog elektrodom

lom, CASTOLIN 680S. Cilj primenjenog postupka jeste da se u zoni kontakta zubaca obezbedi visoka otpor-

nost na habanje, a da se zona mogućeg loma zupca navari materijalom visoke otpornosti na krti lom.

Metalografskim ispitivanjima određivana je mikrostruktura, priroda i oblik navarenog sloja. Uzorci su pri-

Tabela 3

Raspored tvrdoće po preseku zupca u pravcu B

	Zona navara CASTOLIN 680S			Linija spoja	Zona pod uticajem toplote (ZUT)						
Udaljenost od površine (mm)	0,2	0,5	1,0	1,4	1,6	1,7	1,9	2,1	2,4	2,7	3,2
Tvrdoća HV2	237	262	247	336	516	519	502	475	447	424	408
Odgovara HRC	19,8	24,3	21,6	34,9	49,3	49,5	48,3	46,4	44,3	42,4	41,1

	Zona pod uticajem toplote (ZUT)					Osnovni materijal	
Udaljenost od površine (mm)	3,7	4,7	5,7	6,2	7,2	10,2	11,2
Tvrdoća HV2	383	361	330	334	302	359	375
Odgovara HRC	39,1	37,3	34,2	34,6	30,5	37,1	38,5

Sl. 3 — Raspodela tvrdoće po preseku zupca od čelika za cementaciju Č.5421 navarenog elektrodama srednje (CASTOLIN 680S-I) i visoke (CASTOLIN 2-II) tvrdoće

Raspodela tvrdoće u slojevima navarenim na čelik za cementaciju i u zoni pod uticajem toplote u saglasnosti je sa raspodelom tvrdoće po preseku cementiranih slojeva na novoizrađenim zupcima.

premljeni i obrušeni, a zatim nagriženi 4%-tnim rastvorom HNO_3 i carskom vodom ($3\text{HCl} + 1\text{HNO}_3$). Zatim su posmatrani na mikroskopu METALLOPLAN — LEITZ WETZLAR sa uveća-

njima od 50, 100 i 200 puta. Metalografskim ispitivanjem nisu otkrivene greške tipa naprslina, pora, uključaka, neprovara i zareza od pregorevanja. Iz-

strukturu sa ledeburitnim eutektikumom između dendrita (slika 5). Na osnovu udela karbidne faze zaključuje se da se radi o dodatnom materijalu koji

Tabela 4

Raspored tvrdoće po preseku zupca u pravcu C

	Zona navara CASTOLIN 2					Linija spoja	Zona pod uticajem toplote (ZUT)				
Udaljenost od površine (mm)	0,2	0,5	1,0	1,1	1,15	1,2	1,3	1,4	1,5	1,8	2,0
Tvrdoća HV2	610	632	633	619	536	447	404	399	387	385	387
Odgovara HRC	54,8	56,1	56,1	55,3	50,6	44,3	40,8	40,4	39,5	39,3	39,5

	Zona pod uticajem toplote (ZUT)						Osnovni materijal	
Udaljenost od površine (mm)	2,5	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	8,5
Tvrdoća HV2	383	388	384	387	323	309	343	369
Odgovara HRC	39,1	39,6	42,2	39,5	33,4	31,5	35,6	38,0

gled mikrostrukture navarenih slojeva prikazan je na slikama 5 i 6.

Slojevi navareni elektrodom CASTOLIN 2 imaju usmerenu dendritnu

poseduje više legirajućih elemenata i karbidne faze od osnovnog materijala, a time i veću otpornost na habanje. Visokolegirani navari, sa dodatnim ma-

Sl. 4 — Raspodela tvrdoće u zoni spoja slojeva navarenih elektrodama CASTOLIN 680S i CASTOLIN 2

terijalom CASTOLIN 680S, imaju pretežno austenitnu strukturu sa nižom otpornošću na habanje, ali sa visokom otpornošću na krti lom.

Radi dokazivanja ekonomske efektivnosti postupka regeneracije, u tabeli 6 prikazane su cene regeneracije i cene nove izrade. Za upoređenje je uzeta regeneracija prvim — skupljim metodom. Kao srednja vrednost norma-časa (NČ) uzeta je cena od 10 DEM, i cena materijala (čelik i elektrode) koja je važila na domaćem tržištu u leto 1995. godine (preračunato u DEM).

Sl. 5 — Mikrostruktura sloja navarenog elektrodom CASTOLIN 2 na bok zupca od čelika za cementaciju Č.5421 (nagrizanje 4% HNO₃, povećanje 50 x)

Tabela 5

Raspored tvrdoće po preseku zupca u pravcu D

	Zona zavora CASTOLIN 680S		Linija spoja	Zona navara CASTOLIN 2		
Udaljenost od površine (mm)	0,2	0,4	0,5	0,6	0,7	0,9
Tvrdoća HV2	284	274	377	614	621	630
Odgovara HRC	27,8	26,2	38,7	55,0	55,5	56,0

Tabela 6

Pokazatelji ekonomske efektivnosti regeneracije

Vreme regeneracije	19,2 NČ (192 DEM)
Materijal potreban za regeneraciju	CASTOLIN 2, ϕ 3,2 mm, 300 g (70 DEM)
Ukupna cena regeneracije	262 DEM
Postupak nove izrade	strugarski radovi (6,5 NČ), glodački radovi (12,0 NČ), rendisanje (8,0 NČ), termička obrada (3,0 NČ) i brušenje (14,0 NČ)
Vreme nove izrade	43,5 NČ (435 DEM)
Materijal potreban za novu izradu	Č.5421, ϕ 130 x 110 mm, 12 kg (35 DEM)
Ukupna cena nove izrade	470 DEM
Ušteda	44,2 %

Sl. 6 — Mikrostruktura u zoni spoja slojeva navarenih elektrodama CASTOLIN 680S i CASTOLIN 2 na zupcu od čelika za cementaciju (nagrizanje $HCl:HNO_3=3:1$, povećanje 100 x)

Ušteda u procentima izračunata je po obrascu:

$$U = \frac{C_{ni} - C_r}{C_{ni}} 100 (\%)$$

gde je:

C_{ni} (DEM) — cena nove izrade,

C_r (DEM) — cena regeneracije.

U analizi ekonomičnosti nisu uzimani u obzir režijski troškovi, jer imaju približno isti procentualni udeo u troškovima nove izrade i regeneracije.

Zaključak

Analizom rezultata dobijenih ispitivanjem navedenih primera regenerisanih zupčanika moguće je izvesti određene zaključke.

Pošto su regenerisani zupčanci potpuno simetrični moguće ih je montirati na vratilo zaokrenute za 180° . Time se postiže da neregenerisane površine zubaca budu radne, dok bi regenerisane bile neradne. Na taj način bi se gonjeni zupčanci I brzine i hoda

unazad sprežali sa cementiranim površinama zubaca regenerisanog zupčanika.

Geometrijske karakteristike, zahtevane tolerancije i odstupanja, kao i kvalitet obrade površina regenerisanih zupčanika potpuno odgovaraju propisanim i standardizovanim vrednostima.

Zahtevane mehaničke karakteristike (pre svega površinska tvrdoća) lako se postižu primenom odgovarajućih materijala za navarivanje.

Poboljšanje svih mehaničkih karakteristika regenerisanih zupčanika moguće je ostvariti pažljivom i dobro organizovanom pripremom za navarivanje, izborom adekvatnih dodatnih materijala i režima navarivanja, striktnim pridržavanjem propisanih režima rada, kao i tačno definisanim i pažljivo izvedenim postupkom ojačanja radnih površina zubaca.

Imajući u vidu hemijski sastav osnovnih i dodatnih materijala može se zaključiti da bokovi navarenih zubaca, pod uslovom da se obezbedi kvalitetno navarivanje i mašinska obrada, poseduju tvrdoću i otpornost na habanje, gotovo istu kao i novoizrađeni zupci.

S obzirom na to da se navarivalo elektrodama koje se odlikuju malim unošenjem toplote u zonu pod uticajem toplote metalografski je potvrđeno da je oblik navarene strukture povoljan. Takođe, nije uočeno prisustvo makroskopskih grešaka tipa naprsli- na, pora, uključaka i neprovara.

Ekonomska efektivnost regeneracije svih zupčanika je očigledna i iznosi oko 50% za navedene primere cilindričnih evolventnih zupčanika sa prvim zupcima, koji su prilično jednostavne konstrukcije. Što su zupčanci veći i složenijeg oblika, i ušteda izvođenja regeneracije u odnosu na novu izradu je veća.

Za regeneraciju se koristi standardna oprema koju poseduju gotovo sva metaloprerađivačka preduzeća (aparati

za ručno elektrolučno zavarivanje, glodalice i brusilice za izradu zupčanika, univerzalne glodalice, rendisaljke, brusilice i strugovi, kao i ručni bravarski uređaji). Investicioni troškovi su minimalni.

Prednost regeneracije je i u skraćivanju vremena zastoja sklopa kojem oštećeni zupčanik pripada, zbog kraće mašinske obrade i izbegavanja teškoća nabavke visokokvalitetnih čelika za cementaciju.

Literatura:

- [1] Marković, S., Josifović, D.: Uštede u materijalu i troškovima obrade pohabanih zupčanika metodom regeneracije, Tribologija u industriji, XVII/4, Kragujevac, 1995.
- [2] Marković, S.: Karakteristike parametara tačnosti regenerisanih zupčanika, magistarski rad, Mašinski fakultet Kragujevac, 1996.
- [3] Marković, S.: Regeneracija zupčastih i ožljebljenih sprega, Vojnotehnički glasnik, Beograd, 2/1994.