

KONSTRUISANJE I TENZOMETRIJSKO ISPITIVANJE C-SPOJNICE ZA ŽELEZNIČKE ŠINE

Prof.dr Bojan Rančić,
Mašinski fakultet, Univerzitet u Nišu

Mr Predrag Janković,
Mašinski fakultet, Univerzitet u Nišu

Slaviša Planić, dipl.inž.maš.,
MIN "Svrljig", Svrljig

Nenad Vukadinović, dipl.inž.maš.
MIN "Svrljig", Svrljig

U fabrici MIN "Svrljig" razvijen je novi proizvod (C-spojnica) za brzo spajanje železničkih šina u slučaju vanrednih situacija, kao i za rad u ekstremnim razlikama dnevne i noćne temperature. Ispitivane C-spojnice izrađene su livenjem od tri različita materijala: čelika Č.0561, čelika Č.1531 i čeličnog liva ČL.700. Zbog složenog oblika, najpre je, metodom konačnih elemenata (MKE) u programu COSMOSWorks, izvršeno konstruisanje C-spojnice, kao i analiza veze između momenta i sile pritezanja i analiza pomeranja krajeva C-spojnice. Metodom merenja mehaničkih veličina električnim putem izvršena je eksperimentalna provera teorijski dobijenih rezultata. Utvrđeno je dobro slaganje teorijskih i eksperimentalnih rezultata.

Ključne reči: železnička šina, C-spojnica, sila pritezanja, pomeranje, projektovanje, merenje.

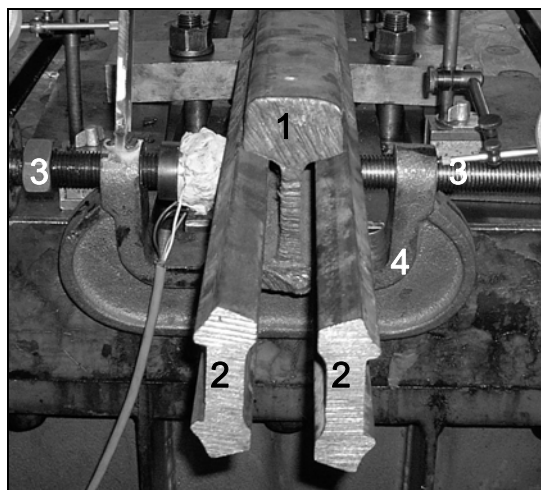
UVOD

Sklop držača vezice (proizvođač MIN "Svrljig" iz Svrljiga) se koristi za brzo spajanje železničkih šina. Ovakvo spajanje se koristi u sledećim slučajevima:

- postavljanje paralelnog koloseka, kada je došlo do oštećenja osnovnog koloseka;
- kada mora da se čeka na optimalne temperaturske uslove za zavarivanje šina, i
- za šine, koje su izložene ekstremnim razlikama dnevne i noćne temperature.

Način spajanja šina može da se sagleda sa fotografije (koja je, doduše snimljena u laboratorijskim uslovima), prikazane na sl. 1.

Na šine (poz. 1), koje treba da se spoje, postavljaju se obloge (poz. 2). Pomoću dva zavrtnja M27 (poz. 3) i unutrašnjih navoja u

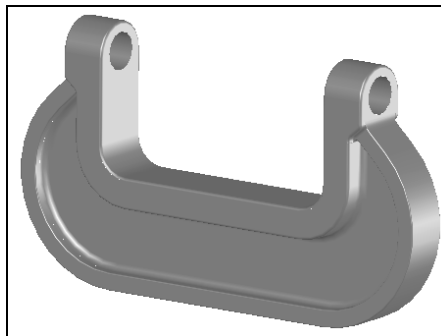


Slika 1: Sklop držača vezice

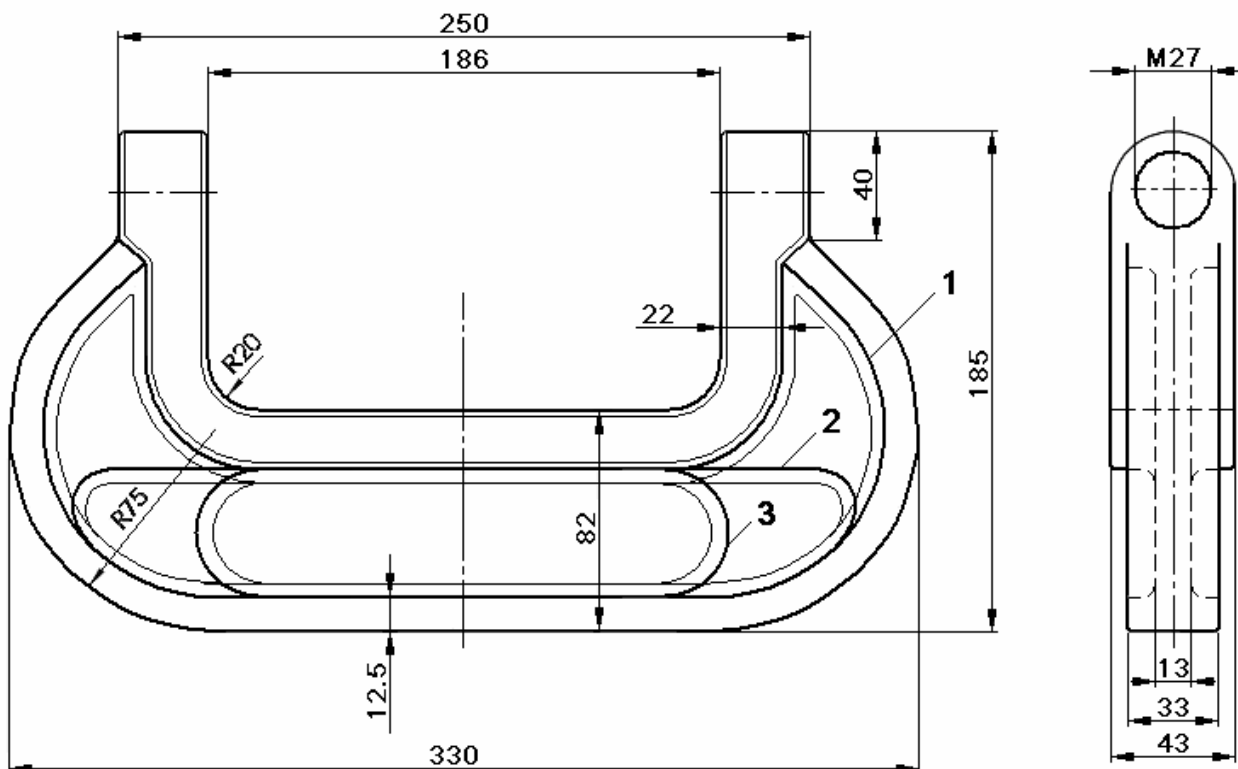
krakovima C-spojnice (poz. 4), vrši se pritezanje obloga uz šine i spajanje šina. Za svaki spoj potrebno je postaviti po dve C-spojnice.

Kako je C-spojnice za železničke šine osnovni noseći element u sklopu držača vezice, to je konstruisanju ovog elementa posvećena najveća pažnja.

Projektovanje 3D modela C-spojnice (slika 2) urađeno je u programu "SolidWorks". Na osnovu modela, u istom programu, urađen je i tehnički crtež spojnice, koji je prikazan na slici 3.



Slika 2: 3D model C-spojnice



Slika 3: Tehnički crtež C-spojnice

Pored modela, prikazanog na slici 2, konstruisana su još dva modela, koja su se od prikazanog modela razlikovala samo po obliku i veličini udubljenja za olakšanje mase spojnice (konture označene sa 2 i 3 na sl. 3).

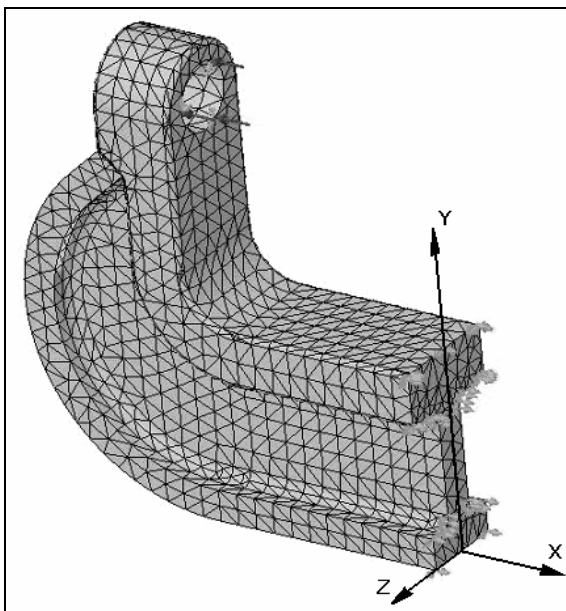
Ovo je učinjeno zbog zahteva kupca, da masa spojnice bude manja od 8 kg. U programu "SolidWorks" postoji i opcija za određivanje zapremine modela, pa nije bilo teško da se odredi i masa spojnice. Masa osnovnog modela (kontura 1, sl. 3) je najmanja i iznosi oko 6.8 kg, masa drugog modela (kontura 2) je oko 7.6 kg, a trećeg (kontura 3) 8.2 kg, tako da se, posle ove provere, odustalo od trećeg modela.

ANALIZA NAPONA I POMERANJA

Analiza napona i pomeranja urađena je metodom konačnih elemenata (MKE) u programu "COSMOSWorks" [1].

Zbog složenosti modeliranja prenosa opterećenja preko navojnog para, aproksimirano je da sila pritezanja deluje po cilindričnoj površini otvora, prečnika (27 mm, koji odgovara srednjem prečniku unutrašnjeg navoja). Zbog simetričnosti C-spojnice, analizirana je samo polovina dela. Postavljena su dva oslonca sa odgovarajućim ograničenjima. Prvi oslonac je u preseku ravni simetrije spojnice, i on ima slobodu pomeranja po

Y-osi, a drugi je na cilindričnoj površini tako da je slobodno pomeranje po X-osi. Prikaz opterećenja, oslonaca i mreže konačnih elemenata za osnovni model, dat je na slici 4.



Slika 4: Osnovni model C-spojnice

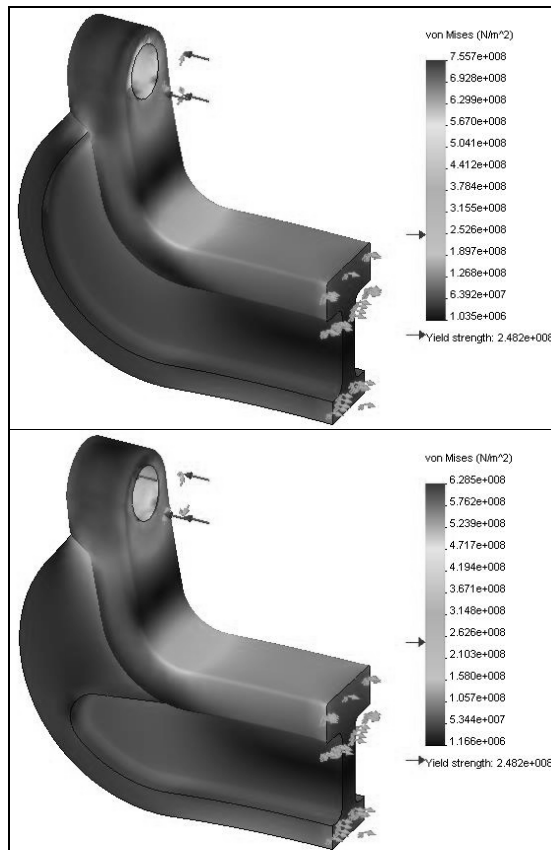
Analiza je ostvarena za C-spojnice od čelika Č.0561 (zatezna čvrstoća $R_m = 520 \text{ N/mm}^2$, granica razvlačenja $R_{0.2} = 250 \text{ N/mm}^2$), a za opterećenja, koja su navedena u Tabeli 1.

Opterećenje	Moment pritezanja [Nm]	Sračunata sila pritezanja [kN]
1.	100	20
2.	150	33
3.	200	46
4.	250	59
5.	270	64
6.	300	72

Tabela 1: Vrednosti momenta i sile pritezanja

Na slikama 5 i 6, prikazane su raspodele napona i pomeranja za osnovni (gore) i korigovani (dole) model, respektivno, koje su dobijene analizom pomoću MKE, a za moment pritezanja od 250 Nm.

Sa slike 5 je očigledno, da su najnapregnutije oblasti: oblast prelaznog radijusa R20 i oblast unutrašnjeg navoja M27. Takođe, naponi u osnovnom modelu su veći (manje rastojanje između nule na skali i strelice na skali, koja definiše početak plastičnog tečenja, po uslovu plastičnosti von Misesa, [2])



Slika 5: Raspored napona pri momentu pritezanja od 250 Nm za osnovni model (gore) i korigovan model (dole)

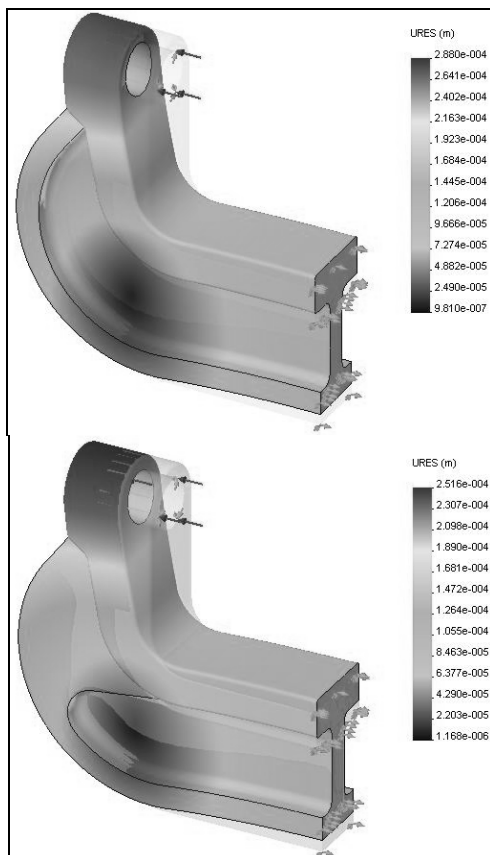
U tabelama 2 i 3, navedene su vrednosti napona u čvorovima u blizini navoja, odakle se uočava da je osnovni model u toj oblasti prešao u stanje plastičnosti ($\sigma > R_{0.2} = 250 \text{ N/mm}^2$) pri momentu pritezanja od 250 Nm, dok se korigovani model nalazi na granici pri momentu od 300 Nm.

Čvor	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	$\sigma \text{ (N/mm}^2\text{)}$
12190	-80.36	83.40	10.25	261.7
12166	-80.36	83.40	3.42	266.1
1255	-80.36	83.40	6.83	275.3
12282	-79.77	83.18	17.08	250.7

Tabela 2: Vrednosti napona u čvorovima za osnovni model i moment pritezanja 270 Nm

Čvor	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	$\sigma \text{ (N/mm}^2\text{)}$
12032	80.36	83.40	-10.25	253.4
1307	80.36	83.40	0	249.8
1304	80.36	83.40	6.83	244.2
1301	80.36	83.40	13.66	242.3

Tabela 3: Vrednosti napona u čvorovima za korigovani model i moment pritez. 300 Nm



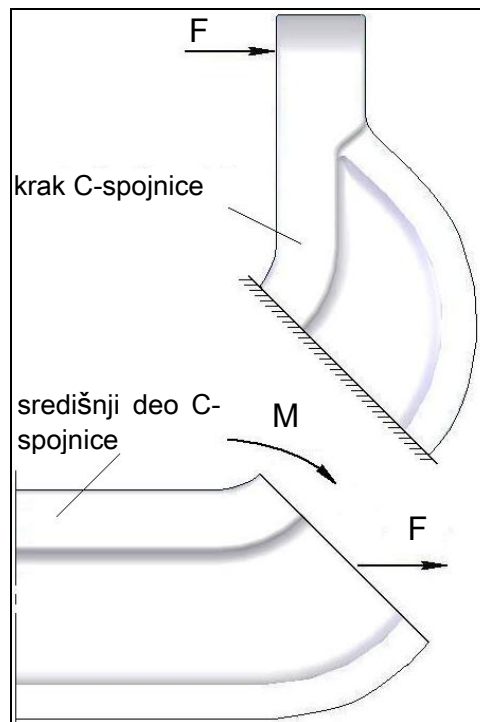
Slika 6: Raspored pomeranja pri momentu pritezanja od 250 Nm za osnovni model (gore) i korigovan model (dole)

Pomeranja na C-spojnici najveća su na mestima dejstva sile pritezanja i usmerena su prema spolja, tj. dolazi do otvaranja spojnice. U središnjem delu (u ravni poprečne simetrije) dolazi do određenog pomeranja naviše.

Rezultati, dobijeni analizom pomoću MKE mogu se potvrditi i klasičnom teorijskom analizom, uz napomenu, da se klasičnom teorijskom analizom, zbog složenog i promenljivog poprečnog preseka, ne mogu da odrede vrednosti napona i pomeranja.

C-spojnica može se fiktivno (ravnima pod uglom od 45° u odnosu na ravan poprečne simetrije) podeliti na 3 dela: 2 bočna kraka i središnji deo koji ih spaja (sl. 7).

Bočni kraci spojnice mogu da se posmatraju kao konzole, kod kojih koncentrisana sila deluje približno na kraju konzole, a ukleštenje se nalazi na mestu spajanja sa središnjim delom (sl. 7). Sila, stvarno, deluje po cilindričnoj površini, čiji prečnik odgovara nazivnom prečniku navojnog para ($\varnothing 27$ mm), ali je za početnu analizu usvojeno da sila deluje po osi unutrašnjeg navoja u kraku spojnice.



Slika 7: Fiktivna podela C-spojnice

Unutrašnja strana kraka spojnice (konzole) će, pod dejstvom sile, biti opterećena na istezanje, dok će spoljašnja strana biti opterećena na pritisak. Pomeranje konzole biće najveće na kraju, odnosno na mestu dejstva sile, a na mestu ukleštenja nema pomeranja. Naponi će biti najveći upravo na mestu ukleštenja.

Središnji deo C-spojnice, uz zanemarivanje sopstvene težine, može da se posmatra kao štap opterećen silama istezanja i momentima savijanja (sl. 7). Unutrašnja strana središnjeg dela spojnice opterećena je na istezanje, a spoljašnja na pritisak. Kod ovakvog opterećenja, dolazi do savijanja štapa, uz pomeranje sredine štapa naviše.

Lepljenjem dve merne trake na sredini štapa, jedne na unutrašnjoj, a druge na spoljašnjoj površini, mogu da se odrede deformacije najnapregnutijih unutrašnjih i spoljašnjih vlakana, kao i da se izvrši razdvajanje deformacija od savijanja od deformacija usled istezanja, [3]. Prethodne analize trebalo je eksperimentalno proveriti.

EKSPERIMENTALNA ISPITIVANJA

Tenzometrijska ispitivanja radnih karakteristika sklopa držača vezice obuhvatala su određivanje:

- raspodele deformacija u telu C-spojnice;

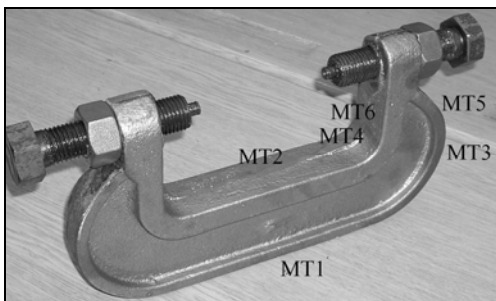
- veze između momenta i sile pritezanja;
- pomeranje krakova na mestu dejstva sile, tj. elastično (plastično) otvaranje C-spojnice.

Ispitivanja su izvršena u Laboratoriji za mašine alatke i mašinsku obradu Mašinskog fakulteta u Nišu.

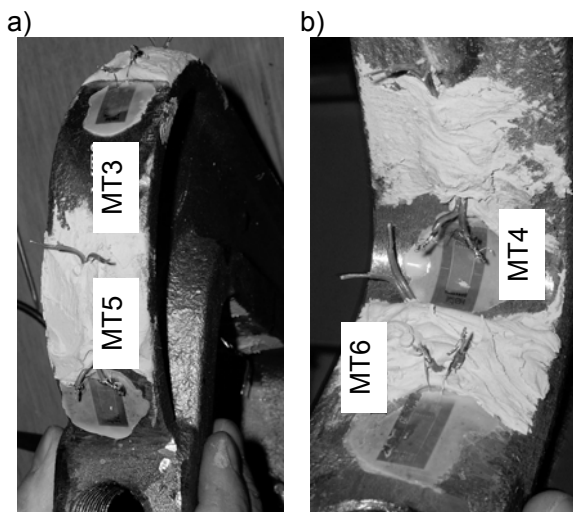
Proizvođač se, zbog manjeg utroška materijala, opredelio za osnovni model C-spojnice. Spojnice su izrađene livenjem od: čelika Č.0561, čelika Č.1531 i čeličnog liva ČL.700.

Merna mesta za analizu deformacionog stanja

Na osnovu analize naponsko-deformacionog stanja, merne trake su postavljane na sredinu tela spojnice sa spoljašnje (MT1, slika 8) i unutrašnje (MT2) strane, na prelaznom radijusu (mestu uklještenja) sa spoljašnje (MT3, sl. 9, a) i unutrašnje strane (MT4, sl. 9, b) i u blizini unutrašnjeg navoja (mesta dejstva sile) sa spoljašnje (MT5, sl. 9, a) i unutrašnje strane (MT6, sl. 9, b). Korišćene su merne trake 10/120 LY11 ("Hottinger Baldwin Messtechnik", skraćeno HBM), [4].



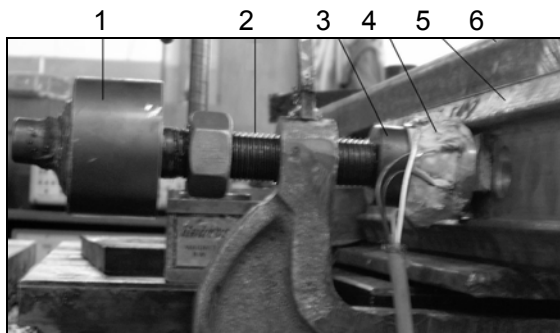
Slika 8: Raspored mernih traka na C-spojnici



Slika 9: Zalepljene merne trake

Merno mesto za određivanje sile pritezanja

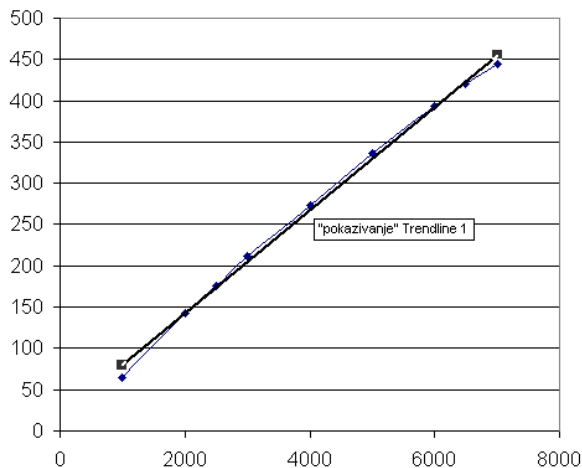
Da bi se utvrdila zavisnost između momenta pritezanja zavrtnja M27x130 (poz 2, slika 10) i sile pritezanja obloge (poz. 5) uz šinu (poz. 6), izrađen je merni pretvarač sile (poz. 4).



Slika 10: Merno mesto za određivanje sile

Naime, originalni fabrički merni pretvarači za silu, koje poseduje Mašinski fakultet u Nišu, zbog prevelike visine nisu mogli da se upotrebe. Merni pretvarač je urađen tako, što su na cilindrično telo od Č.4732, dimenzija $\varnothing 50 \times 35$ mm sa centralnim otvorom $\varnothing 9$, zalepljene četiri merne trake 6/120LY11 (HBM), koje su spojene u puni Witstonov most, [3].

Kalibrisanje ovako dobijenog pretvarača za silu izvršeno je na kitalici od 100 kN (tip ZDM 10191, klase tačnosti 1, "W.P.M." VEB Thüregen) u Laboratoriji za mašinske materijale Mašinskog fakulteta u Nišu. Obrada rezultata kalibrisanja urađena je u programu "Microsoft Excel", a dobijena kalibraciona prava ($y = 0.0626 \cdot x + 16.278$), prikazana je na slici 11. Na x-osi su nanete vrednosti sile [daN], a na y-osi pokazivanje na mernom pojačavaču [mV].



Slika 11: Kalibraciona prava pretvarača sile

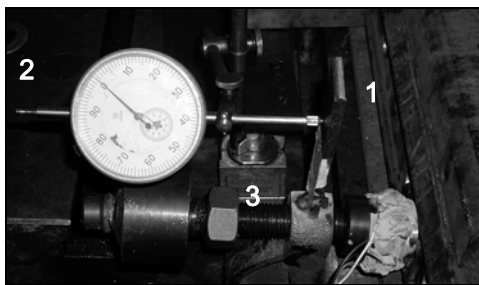
Pritezanje zavrtnja (poz 2, slika 10) vršeno je

ručno moment-ključem “Dremometer” od 0 do 300 Nm (“Gedore”). Da bi ključ mogao da se primeni na zavrtnaj M27, u MIN “Svrljig”-u je urađen nastavak (poz. 1, sl. 10).

Najpre su oba zavrtnja pritegnuta običnim ključem (sve dok obloge nisu dobro nalegle na šinu i C-spojnicu nije rotirala oko ose zavrtnja). Zatim je vršeno jednostrano pritezanje moment-ključem samo levog zavrtnja.

Merna mesta za određivanje pomeranja krakova (otvaranje) C-spojnice

Za određivanje vrednosti otvaranja C-spojnice, kao i činjenice, da li se raspon tela spojnice posle rasterećenja vraća na prvobitnu meru, na završetku oba kraka C-spojnice pričvršćeni su umeci (poz. 1, slika. 12). Umetci su postavljeni da bi se omogućilo nesmetano pritezanje zavrtnja. Na umetke su prislanjani merni pipci mernih satova (poz. 2), koji su pomoću magnetskih držača (poz. 3) bili postavljeni na radni sto hidraulične prese od 1000 kN (“FAM”, MIN-Niš), na kome je pričvršćena i šina.

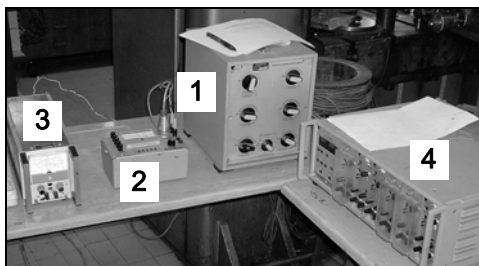


Slika 12: Merno mesto za određivanje pomeranja kraka C-spojnice

Merna oprema

Korišćena je sledeća merna oprema:

- uređaj za izbor mernog mesta IM-74 (poz. 1, slika 13, HBM),
- manuelni kompenzator MTK (poz. 2, HBM),
- ispravljač RSK 01 – 35/4a (poz. 3, “Iskra”),
- pojačavač KWS506C od 5 kHz (poz. 4, HBM).



Slika 13: Primenjena merna oprema

PRIKAZ I ANALIZA REZULTATA MERENJA

Deformaciono stanje kod C-spojnice

Deformaciono stanje na karakterističnim mestima na C-spojnicu je, najpre, određivano na spojnicu od Č.0561. Očitane vrednosti broja mikrodeformacija mernih traka MT1 do MT6, pri odgovarajućim momentima pritezanja, navedene su u Tabeli 4.

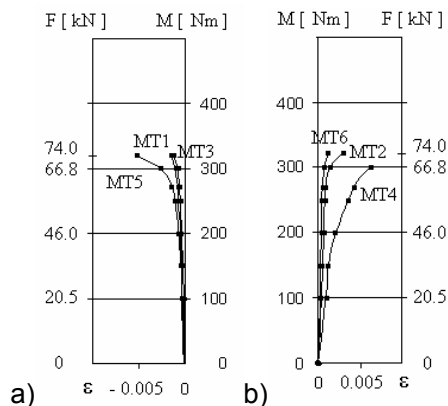
Vrednosti su date u mikrodeformacijama, odnosno u $\mu\text{m}/\text{m} = 10^{-6} \text{ m}/\text{m}$. Ovo znači da vrednosti mikrodeformacija iz Tabele 4 treba pomnožiti sa 10^{-6} da bi se dobio uobičajen oblik izražavanja deformacija. Na primer: vrednost $\varepsilon_{ur} = 2163 \mu\text{m}/\text{m}$ predstavlja deformaciju $\varepsilon = 0.002163 = 0.2163 \%$, tj. material se na tom mestu nalazi na granici razvlačenja.

M [Nm]	Broj mikrodeformacija [$\mu\text{m}/\text{m}$]					
	MT1	MT2	MT3	MT4	MT5	MT6
100	- 310	320	- 219	951	- 430	410
150	- 525	525	- 337	1250	- 622	547
200	- 787	766	- 477	2163	- 853	816
250	-1078	1079	- 630	3555*	-1190	1094
270	-1240	1204	- 711	4382*	-1483	1234
300	-1364	1563	- 885	6435*	-2646*	1565

Tabela 4: Vrednosti relativnih deformacija

Negativan znak ispred vrednosti deformacije znači da se radi o deformaciji sabijanja, a pozitivan da je reč o deformaciji istezanja. Zvezdica sa desne strane vrednosti u tabeli označava da je na tom mestu nastupila plastična deformacija.

Dijagrami promene relativne deformacije u zavisnosti od momenta (sile) pritezanja prikazani su na slici 14, a - za mernu traku MT1, MT3 i MT5, a na slici 14, b za mernu traku MT2, MT4 i MT6.



Slika 14: Dijagrami relativnih deformacija

Sa dijagrama na sl. 14, a je očigledno da je spoljašnja strana tela spojnice (MT1, MT3 i MT5) opterećena na pritisak i da se nalazi u stanju elastičnosti sve do momenta od 270 Nm. Pri opterećenju momentom od 300 Nm dolazi do plastične deformacije u blizini navoja (MT5).

Deformacije na unutrašnjoj strani spojnice su deformacije istezanja. Relativne deformacije na mestima MT2 i MT6 nalaze u oblasti elastičnih deformacija sve do momenta pritezanja od 270 Nm, da bi se i sredina središnjeg dela tela spojnice (MT2) i mesto u blizini unutrašnjeg navoja na kraku tela spojnice (MT6) plastično deformisali pri većim opterećenjima.

I konstruktori C-spojnice su predvideli ovakvo naponsko-deformaciono stanje u spojnici, jer su projektovali veću debljinu ivičnog rebra na unutrašnjoj strani spojnice u odnosu na debljinu rebra na spoljašnjoj strani.

Sredina (MT4) unutrašnjeg prelaznog radijusa je najviše opterećena i nalazi se u stanju plastičnosti već pri opterećenju momentom pritezanja iznad 200 Nm. Pošto se radi o savijanju, tj. o lokalizovanom žarištu plastičnih deformacija, vrednosti deformacija će se smanjivati prema neutralnoj osi, pa se vrednost momenta pritezanja od 250 Nm može smatrati graničnim opterećenjem, što je dobijeno i MKE. Ovo je potvrđeno i merenjem pomeranja kraka spojnice pri opterećenju i posle rasterećenja (videti tabelu 5).

Kako se MKE za spojnice od Č.1531 i ČL.700 ustanovilo da se nalaze u stanju elastičnosti pri svim momentima do 300 Nm, to kod njih nije određivano deformaciono stanje.

Pomeranje kraka C-spojnice

Očitane vrednosti pomeranja kraka spojnice (za odgovarajuće vrednosti momenta pritezanja), kako u opterećenom, tako i u rasterećenom stanju, prikazane su u tabeli 5.

Moment, [Nm]	Izmereno pomeranje kraka, [mm]					
	Č.0561		Č.1531		ČL.700	
	opt.	ras.	opt.	ras.	opt.	ras.
100	0.50	0	0.71	0	0.68	0
150	0.77	0	1.05	0	0.98	0
200	1.10	0	1.43	0	1.41	0
250	1.45	0	1.67	0	1.67	0
270	1.72	0.3	1.87	0	1.88	0
300	2.35	0.8	2.10	0	2.15	0

Tabela 5: Vrednosti pomeranja kraka spojnice

Iz tabele 5 sledi da se spojnice od Č.0561, pri opterećenju momentima pritezanja do 270 Nm, nalaze se u stanju elastičnosti, dok se pri većim momentima javlja trajno jednostrano otvaranje od 0.3 i 0.8 mm. Takođe, uočava se da se C-spojnice od Č.1531 i ČL.700 nalaze u oblasti elastičnosti pri svim zadatim momentima.

Ovim je potvrđena ispravnost pretpostavke, da na spojnicama od Č.1531 i ČL.700 ne treba određivati deformacije na karakterističnim mestima.

Prislanjanjem nožastog lenjira na spoljašnju površinu središnjeg dela plastično deformisane C-spojnice od Č.0561 (posle jednostranog pritezanja zavrtanja momentom od 300 Nm i rasterećenja) uočen je svetlosni procep u centralnom delu, čime je još jednom potvrđen rezultat, dobijen pomoću MKE, o načinu deformisanja tela spojnice.

Sila jednostranog pritezanja

Vrednosti zadatih momenata pritezanja i izmerenih sila pritezanja za spojnice od Č.1531 i ČL.700, prikazane su u tabeli 6.

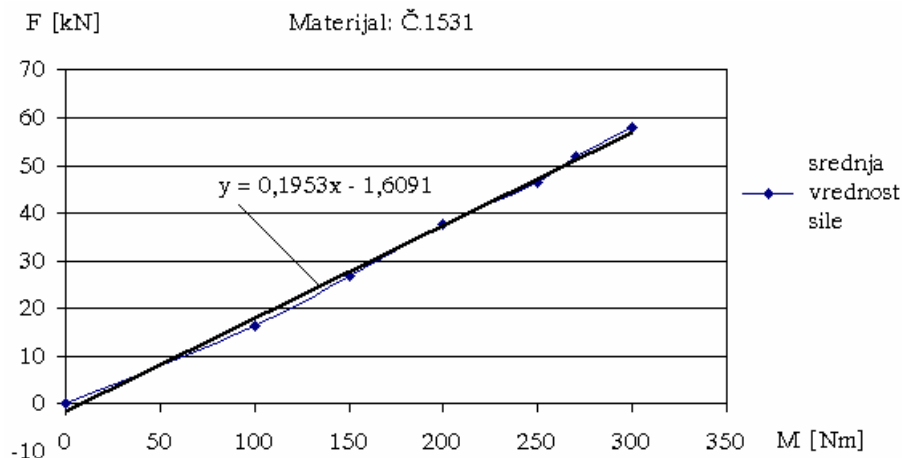
Moment, [Nm]	Izmerena sila pritezanja [kN]	
	Č.1531	ČL.700
100	16.2	18.3
150	26.8	28.3
200	37.6	37.0
250	46.5	46.3
270	51.7	52.7
300	58.0	59.4

Tabela 6: Vrednosti momenata i sila pritezanja

Obrađena izmerenih rezultata izvršena je u programu "Microsoft Excel".

Kod C-spojnice od Č.1531 i ČL.700 linearna zavisnosti između momenta i sile pritezanja postoji sve do momenta pritezanja od 300 Nm (maksimalnog momenta koji je mogao da se ostvari korišćenim moment-ključem), odnosno sklop držača vezice se nalazio u stanju elastičnosti.

Dijagram sile jednostranog pritezanja u zavisnosti od momenta pritezanja kod spojnice od Č.1531, kao i aproksimacija pravom linijom, prikazan je na sl. 15.



Slika 15: Zavisnost sile jednostranog pritezanja od momenta pritezanja

Upoređivanjem dobijene jednačine za promenu sile jednostranog pritezanja u funkciji momenta pritezanja za Č.1531:

$$y = 0.1953 \cdot x - 1.6091,$$

gde su: y – sila jednostranog pritezanja u [kN] i

x – moment pritezanja u [Nm],

sa analognom jednačinom za spojnice od ČL.700:

$$y = 0.1995 \cdot x - 0.8974$$

postaje očigledno da se, sa aspekta moći nošenja, radi o C-spojnica vrlo sličnih karakteristika, pa spojnice treba izrađivati od jeftinijeg, ili lakše obradivog materijala.

ZAKLJUČAK

Od tri materijala spojnice nezadovoljavajuće karakteristike ima Č.0561, dok su spojnice od Č.1531 i ČL.700 približno istih karakteristika i zadovoljavaju za sva zadata opterećenja.

Ispitivanje je vršeno pri statičkom opterećenju, a u realnim uslovima sklop držača vezice radi pri jednosmernom dinamičkom opterećenju (prelazak točkova vagona preko sklopa).

U eksperimentalnim ispitivanjima je utvrđeno da su izmerene vrednosti deformacija i pomeranja u dobroj saglasnosti sa vrednostima dobijenim analizom MKE.

LITERATURA

/1/ Paul Kurowski, Engineering Analysis with COSMOSWorks Professional 2006, SDC Publication, Canada, 2006.

/2/ Vojislav Stoilković, Teorija obrade deformisanjem, Univerzitet u Nišu, Niš, 1984.

/3/ Bojan Rančić, Sistemi za merenje, prikupljanje i obradu podataka, I deo, Mašinski fakultet u Nišu, Niš, 2005.

/4/ Hoffmann K., Eine Einführung in die Technik des Messens mit Dehnungsmeßstreifen, Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, Darmstadt, 1987.

DESIGN OF THE C-CLAMP FOR RAILROAD TRACKS AND TENSOMETRIC CHECK UP

In factory "MIN" Svrlijig new product is developed. This product (C-clamp) find his use for quickly joint of railroad tracks in cases of specific situations, and also be high differences of daily and night temperatures. C-clamp probes are produced by casting technology from three different materials: steel Č.0561, steel Č.1531, and cast iron ČL.700. Because of the complex form of C-clamp, in program COSMOSWorks finite element method (FEM) analysis are accomplished in order to find relation between moment of force and tightening force, and also identification of the C-clamp endings displacements. The tensometric method is used for verification of theoretical results. By these measurements good coincidence of theoretical and experimental results are determined.

Key words: railroad track, C-clamp, tightening force, displacement, design, measurement