



## EKSPERIMENTALNO-TEORIJSKA ANALIZA SPOJEVA S VISOKOVRIJEDNIM VIJCIMA KLASE 10.9 PRI KRATKOTRAJNOM OPTEREĆENJU

Prof.dr.sc. **Hrvoje Soče**, dipl.ing.građ.

Građevinski fakultet Sveučilišta u Mostaru  
Doc.dr.sc. **Vlaho Akmadžić**, dipl.ing.građ.  
Građevinski fakultet Sveučilišta u Mostaru

**Sažetak:** U ovom radu je prikazano eksperimentalno – teorijsko određivanje kritične sile proklizavanja za modele sa spojevima visokovrijednim vijcima M12, M16, M20, M24 i M27 kvaliteta 10.9. Tarne površine su nezaštićene i obrađene su pjeskarenjem. Kratkotrajna kritična sila proklizavanja i koeficijent trenja određeni su za pomake spoja od 150 mikrometara i od 300 mikrometara. Eksperimentalna su istraživanja rađena na Strojarskom fakultetu u Mostaru.

**Ključne riječi:** spojevi, sila proklizavanja, koeficijent trenja, eksperiment.

## EXPERIMENTAL AND THEORETICAL ANALYSIS OF JOINTS WITH HIGH STRENGTH BOLTS CLASS 10.9 UNDER THE TRANSIENT LOADING

**Abstract:** This paper presents experimental and theoretical defining of the critical sliding force for the physical models connected with the high strength bolts M12, M16, M20, M24 and M27, class 10.9, under the transient loading. The sliding surfaces are unprotected and sand blasting treated. The transient critical sliding force and the friction coefficient are determined for two joint displacements of 150 micrometers and 300 micrometers. The experimental investigations are done on the Faculty of Mechanical Engineering in Mostar.

**Key words:** joints, sliding force, friction coefficient, experiment.

*Rad objavljen u „Zborniku radova GF Sveučilišta u Mostaru“, Mostar, 2003*



## 1. UVOD

Za razliku od spojeva izvedenih vijcima ili zakovicama, u kojima se sila prenosi s jednog elementa na drugi preko vrata vijka, odnosno zakovice, putem smicanja vrata i pritiska vrata na omotač rupe, u spojevima s *visokovrijednim vijcima s kontroliranom silom pritezanja* sila se u spoju prenosi pomoću trenja, koje postoji između spojenih površina.

Veličina maksimalne sile pritezanja  $F_{ts}$  koju spoj može prenijeti ovisi o

- veličini sile pritezanja,
- tretmanu tarnih površina,
- načinu opterećenja spoja.

Kako bi se moglo ostvariti pritezanje vijka koje je dovoljno da izazove potrebnu silu trenja u spoju, mora se za vijke upotrijebiti slabo legirani čelik visoke kvalitete, s granicom razvlačenja većom od 900 MPa. Zbog tog razloga u tehničkoj literaturi se za vijke s navedenim mogućnostima koristi naziv visokovrijedni vijci.

Prva izvješća o istraživanjima i praktičnoj primjeni visokovrijednih vijaka potiču iz SAD-a uoči Drugog svjetskog rata. Sustavnom istraživanju ovog novog spojnog sredstva pristupilo se u Europi tek poslije 1950. godine.

Od 1952. godine u SR Njemačkoj su započeta istraživanja rada veza s ovim vijcima, koja su predstavljena u 'Smjernicama za primjenu visokovrijednih vijaka u čeličnim konstrukcijama'. Ubrzo sve zemlje u Europi izdaju svoje propise za spojeve s visokovrijednim vijcima. Sve bolja međunarodna suradnja dovodi do stvaranja međunarodnih organizacija i na tom polju. Tako su od strane Europske konvencije čeličnih konstrukcija (EK) i Međunarodne unije željezničkih uprava (IUC) izdane prve preporuke.

Zbog svojih povoljnih mehaničkih osobina ova tehnika spajanja primjenjuje se danas kao redovan način spajanja montažnih nastavaka.

Problematika visokovrijednih vijaka intenzivno se proučavala u posljednje vrijeme, poglavito od strane međunarodnih stručnih organizacija (Europäische Konvention der Stahlbauverbände, Internationale Vereinigung für Brückenbau und Hochbau, Union Internationale de Chemin de Fer), što je dovelo do novih spoznaja koje su uzrokovale izmjenu tehničkih propisa u svijetu.

Kako bi se povećala nosivost visokovrijednih vijaka, išlo se k poboljšanju oblika visokovrijednih vijaka, čime je povećano i poboljšano naližganje, a samim time i moć nošenja vijka za 20%.

U većini europskih zemalja došlo se do zaključka da je koeficijent trenja za čelike klase ČN 24 (Fe 240) prenizak, a za čelike klase ČN 36 (Fe 360) previsok. U novijim europskim propisima te su promjene uvedene. Na temelju tih istraživanja izmijenjene su i dopuštene sile pritezanja visokovrijednih vijaka.

Europska konvencija za čelik i Švicarske preporuke B4 za dugotrajno opažanje pomaka u spoju, propisuju da za silu proklizavanja važi ona sila  $\overline{F_{ts}}$  pri kojoj nastaje pomak u spoju od 300 mikrometara, dok UIC-Kodex 770 propisuje 150 mikrometara.



Iskustva, proistekla uglavnom s izgradnje nekoliko značajnijih cestovnih mostova, bila su loša budući su na većini mostova nastajala proklizavanja u spojevima s visokovrijednim vijcima. Uspoređujući glavne faktore koji osiguravaju potrebnu nosivost u spoju (kvaliteta vijka, veličina sile pritezanja i koeficijent trenja na tarnim površinama) s istim tim parametrima iz europskih propisa, uočava se kako razlike nema. Ovo povlači kako se proklizavanje ne bi trebalo javiti, međutim ono se javljalo. Prema mišljenju grupe autora, ukratko iznijeto, uzrok leži u striktnom prihvaćanju propisom zadanih veličina, a da sustavno nije provjeravano mogu li se u stvarnim uvjetima na gradilištu te veličine i ostvariti.

Prilikom laboratorijskih određivanja koeficijenta trenja, zahvaljujući posebnim uređajima konstruiranim na način da se može pratiti promjena sile pritezanja u vijku tijekom opterećenja tarnog spoja, primijećeno je kako sila u vijku stalno opada za vrijeme opterećenja spoja. Pojava opadanja sile pritezanja je bila i ranije poznata, pa se u strojarstvu o njoj vodi računa i daju se upute za postupak proračuna. Na temelju raznih ispitivanja pokazalo se kako se pad sile odvija u vrlo kratkom vremenskom roku. Budući da se relaksacija čeličnog materijala još nije mogla odigrati, najvjerojatniji razlog leži u zaravnanju hrapavosti tarnih površina pri relativnim pomacima istih u tarnom spoju.

Kompletan uvid u vrijednost koeficijenta trenja i njegov utjecaj na proklizavanje spoja može se dobiti samo ako je poznato koji koeficijenti trenja mogu biti prihvaćeni za:

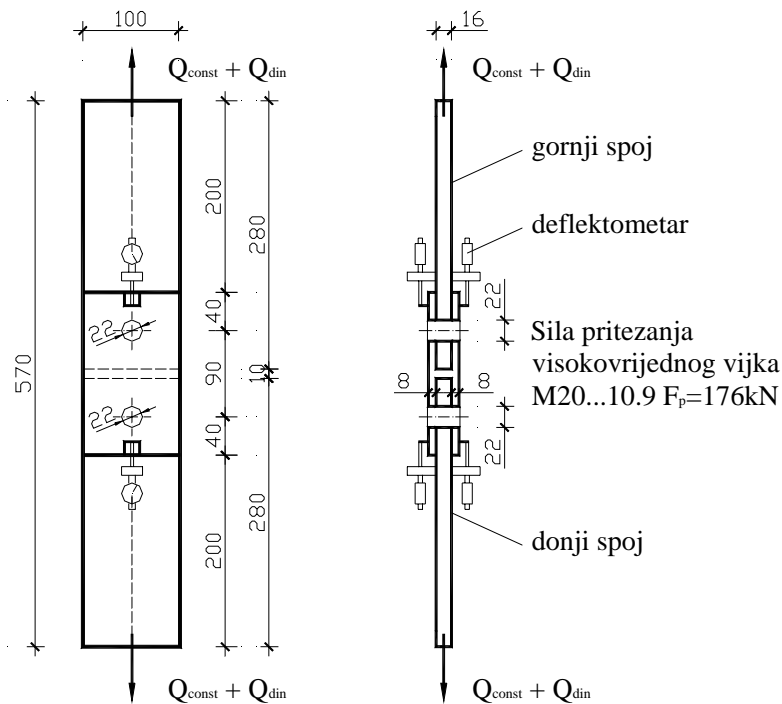
- kratkotrajno opterećenje ( $\mu_{kratko}$ ),
- dugotrajno opterećenje ( $\mu_{dugo}$ ), i
- dinamičko opterećenje ( $\mu_{din}$ ).

Iz prikaza radova u oblasti određivanja kritične sile proklizavanja kod spojeva s visokovrijednim vijcima kvaliteta 10.9, utjecaj promjera vijka rijetko je obrađivan. U ovom radu obrađen je problem određivanja kritične sile proklizavanja za modele sa spojevima visokovrijednim vijcima, kvaliteta 10.9, M12, M16, M20, M24 i M27. Tarne površine su nezaštićene, obrađene pjeskarenjem, opterećene kratkotrajno, a kritična sila proklizavanja određena je za pomak spoja od 150 mikrometara i za pomak od 300 mikrometara.

## 2. TEORIJSKO-EKSPERIMENTALNA ANALIZA SPOJEVA S VISOKOVRIJEDNIM VIJCIMA KLASJE 10.9 PRI KRATKOTRAJNOM OPTEREĆENJU

### 2.1. Definiranje modela

Na Slici 1 dan je izgled i dimenzije karakterističnog modela M20...10.9. Analogno izgledaju i drugi ispitni modeli s visokovrijednim vijcima (Tablica 2).



Slika 1: Izgled i dimenzije karakterističnog ispitnog modela M20...10.9

Od svakog modela izrađeno je pet primjeraka, a oznake su prikazane tabelarno.

Model	Primjerak				
M12...10.9	M12-1	M12-2	M12-3	M12-4	M12-5
M16...10.9	M16-1	M16-2	M16-3	M16-4	M16-5
M20...10.9	M20-1	M20-2	M20-3	M20-4	M20-5
M24...10.9	M24-1	M24-2	M24-3	M24-4	M24-5
M27...10.9	M27-1	M27-2	M27-3	M27-4	M27-5

Tablica 1: Oznake primjeraka modela

U Tablici 2 navedene su, u milimetrima, dimenzije dviju glavnih ploča i dviju preklopnih ploča, kao i rupe za vijke.

Model	Dvije glavne ploče	Dvije preklopne ploče	Promjer vijka
M12...10.9	80x290x10	80x190x8	14
M16...10.9	80x320x16	80x250x8	18
M20...10.9	100x340x20	100x290x10	22
M24...10.9	120x390x24	120x390x12	26
M27...10.9	140x410x24	140x430x12	29

Tablica 2: Dimenzije ploča i promjer rupa za vijke



Na Slici 1 prikazan je način pričvršćivanja deflektometara na modelu. Svaki model se sastoji od dva spoja s visokovrijednim vijcima klase 10.9 i nose naziv 'gornji spoj' i 'donji spoj', u odnosu na položaj u kidalici.

## 2.2. Ispitivanje modela

Svi modeli su sklopljeni u vremenu 5 do 6 sati nakon pjeskarenja. Na površini vrata svakog vijka postavljena je mjerna traka malih dimenzija HOTTINGER BALDWIN MESSTECHNIK 'STRAIN GAUGES' tip: 3/120 LY11, otpora  $R: 120\Omega \pm 0.2\%$ , konstanta  $K: 2.00 \pm 1.0\%$ , dimenzija: 4.7x8.3/3x1.4.

Kod postavljanja mjernih traka koristilo se ljepilo MEASUREMENTS M-BOND 200 ADHESIVE. Kroz prorez na preklopnjoj ploči modela, provučen je vodič za vezu mjerne trake sa Wheatstonovim mostom.

Model je sklopljen sa svim vijcima, a matice su stegnute ručno. Glavne ploče za zatezanje su gurnute jedna prema drugoj, tako da su vratovi od četiri vijka modela naslonjeni na zidove rupa, što omogućuje veći hod proklizavanja. Tako montiran uzorak provjeren je na centrično djelovanje zatežuće sile.

Zatim su vijci zatezani s momentnim ključem sa pokazivačem momenta, a na Wheatstonovom mostu postignute su određene mikrodeformacije za određenu silu pritezanja vijka  $F_p$ . Pritezanje vijka obavljeno je postepeno do poklapanja zadanog momenta pritezanja i zadane mikrodeformacije na Wheatstonovom mostu.

Po isteku 24 sata od postignutog pritezanja vijka, počelo se s ispitivanjem zatezanja modela i određivanjem sile proklizavanja za pomak u spoju modela od 150 i 300 mikrometara. Modeli, postavljeni u kidalicu, tip AMSLER, izloženi su normalnom brzinom povećanju opterećenja od 50kN/minuti.

Na modelu su postavljena četiri komparatora, po dva za gornji i za donji spoj. Kod očitavanja pomaka jednog spoja, vršilo se očitavanje sa dva komparatora i uzimala se za pomak srednja vrijednost. Korišteni komparatori su tip FEDERAL-PROVIDENCE R.J. USA s točnošću očitavanja od 0.0001" (2.5/1000mm), mjernog opsega 750/1000mm. Eksperimentalni rezultati veličine sile proklizavanja za pomake u spoju M20...10.9 i sve modele navedeni su tabelarno, dok se ostali podatci mogu vidjeti u [Soče H.].

## 3. MATEMATIČKO MODELIRANJE REZULTATA EKSPERIMENTALNIH ISTRAŽIVANJA

Matematičke relacije i ovisnosti dobivene u tijeku istraživanja predstavljaju empirijske jednadžbe, dobivene statističkom obradom podataka utvrđenih u tijeku eksperimentalnih istraživanja (podatci o opterećenjima modela, pomacima u spojevima, mikrogeometriji kontaktnih površina u spoju i sl.). Primijenjena je korelaciono-regresijska analiza uz primjenu metode najmanjih kvadrata. U suštini te su ovisnosti linearne ili nelinearne s mogućnošću linearizacije primjerene zahtjevima linearne korelaciono-regresijske analize.



Model		M20	
Sila pritezanja		$F_p = 154kN$	
Sila proklizavanja		$\overline{F}_{ts}$ [kN]	
Model broj	Položaj spoja	za 150 $\mu$ m	do 300 $\mu$ m
1	gornji spoj	370.45	388.20
	donji spoj	414.40	434.40
2	gornji spoj	397.44	417.20
	donji spoj	364.86	383.00
3	gornji spoj	403.70	423.20
	donji spoj	376.49	395.10
4	gornji spoj	418.88	439.00
	donji spoj	381.21	400.00
5	gornji spoj	408.19	428.60
	donji spoj	388.56	407.80

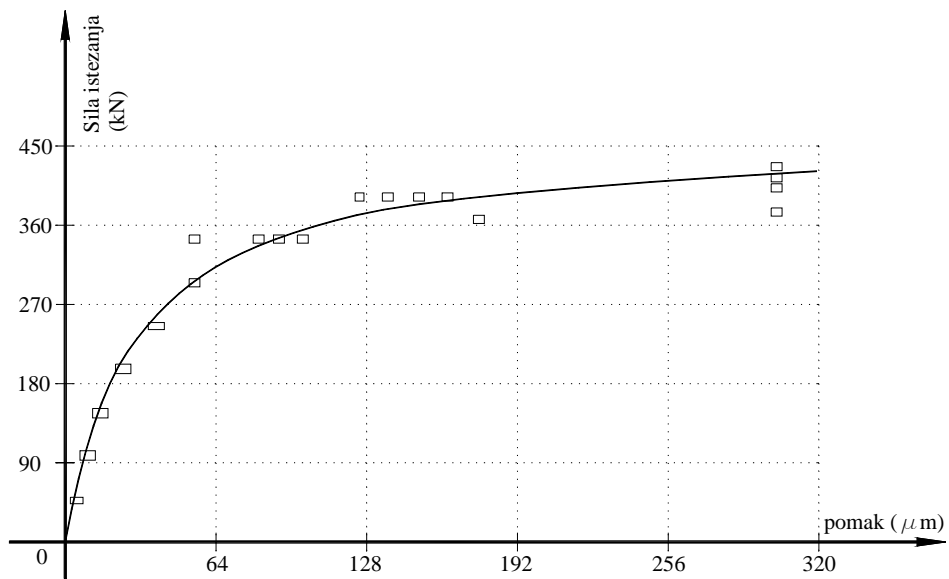
Tablica 3: Eksperimentalni rezultati veličine sile proklizavanja za modele M20...10.9

U Tablici 3 za modele M20 dati su eksperimentalni rezultati veličine sile proklizavanja. Radi se ukupno o deset veličina, po pet uzoraka za gornji i za donji spoj. Za kritičnu silu proklizavanja uzeta je granica pomaka od 150 mikrometara. Nakon tog pomaka, sila zatezanja je dodavana oprezno, kako bi se što preciznije odredila kritična sila proklizavanja u spoju za pomak do 300 mikrometara.

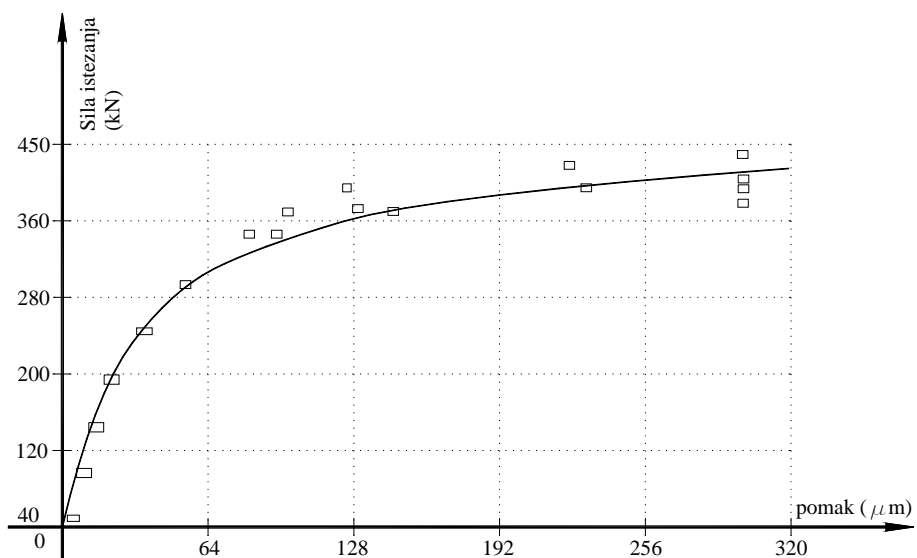
Eksperimentalni rezultati kritične sile su matematički modelirani. Ovisnost sile pritezanja u gornjem i donjem spoju za model M20 prikazana je grafički na Slici 2 i Slici 3. Matematički oblik regresijske jednadžbe ovisnosti sila istezanja i pomaka je

$$y(x) = \frac{x}{a + b \cdot x} \quad (1)$$

gdje je  $y$  sila istezanja u kN, a  $x$  pomak u spoju u  $\mu$ m, dok  $a$  i  $b$  predstavljaju parametre regresijske jednadžbe (Tablica 4).



Slika 2: Ovisnost sile istezanja o pomaku u gornjem spoju modela M20...10.9



Slika 3: Ovisnost sile istezanja o pomaku u donjem spoju modela M20...10.9



Model M20	Gornji spoj	Donji spoj
Parametar regresijske jednadžbe $a$	0.0660665	0.067184
Parametar regresijske jednadžbe $b$	0.0021550	0.002208
Koeficijent korelacije $R$	0.9974819	0.993068
Koef. sigurnosti koef. korelacije $K_r$	1332.5934	487.5372
Zaostala disperzija $Z_d$	0.0002021	0.0005479
Slučajna greška $a$ parametra $S_{ga}$	0.0027570	0.00446900
Slučajna greška $b$ parametra $S_{gb}$	0.0000234	0.00003939
Granica $a$ parametra $a_d/a_g$	0.0651063 / 0.0716223	0.058185 / 0.076182
Granica $b$ parametra $b_d/b_g$	0.0021080 / 0.0022020	0.002128 / 0.002287
Nivo značajnosti $q$	0.05	0.05
Teorijska vrijednost kriterija studenta $T_s$	2.01511628	2.0136364
Jačina korelacijske veze $ R $	>0.9 – vrlo jaka veza	>0.9 – vrlo jaka veza

Tablica 4: Parametri za modele M20...10.9

Na temelju eksperimentalnih rezultata, te rezultata numeričkog tretmana, proizašli su dijagrami i matematička forma regresijske jednadžbe za određivanje koeficijenta trenja u ovisnosti od ispitnog promjera vijka [Soče, H.]. Dijagrami tretiraju veličinu koeficijenta trenja u ovisnosti o pomaku u spoju veličine 150 mikrometara, odnosno 300 mikrometara. Matematički oblik regresijske jednadžbe koeficijenta trenja za pomak u spoju od 150 mikrometara u ovisnosti o promjeru vijka ima oblik

$$y(x) = a \cdot b^x \quad (2)$$

gdje  $y(x)$  predstavlja koeficijent trenja,  $x$  ispitni presjek vijka u  $\text{mm}^2$ ,  $a$  parametar regresijske jednadžbe (0.8214794) i  $b$  parametar regresijske jednadžbe (0.9989144). Analogno, matematički oblik regresijske jednadžbe koeficijenta trenja za pomak u spoju od 300 mikrometara u ovisnosti o promjeru vijka ima oblik

$$y(x) = c \cdot d^x \quad (3)$$





gdje  $y(x)$  predstavlja koeficijent trenja,  $x$  ispitni presjek vijka u  $\text{mm}^2$ ,  $c$  parametar regresijske jednadžbe (0.8632144) i  $d$  parametar regresijske jednadžbe (0.9989018).

Što se pak tiče matematičkog oblika regresijske jednadžbe kritične sile proklizavanja za pomak u spoju od 150 mikrometara, izraz je

$$y(x) = \frac{a \cdot x}{b + x} \quad (4)$$

gdje  $y(x)$  predstavlja kritičnu silu proklizavanja u kN,  $x$  ispitni presjek vijka u  $\text{mm}^2$ ,  $a$  parametar regresijske jednadžbe (1484.0317) i  $b$  parametar regresijske jednadžbe (701.7247). Za pomak do 300 mikrometara jednadžba ima isti oblik kao u izrazu (4), s tim da su različite vrijednosti parametra  $a$  regresijske jednadžbe (1569.3468) i parametra  $b$  regresijske jednadžbe (710.8303).

#### 4. ZAKLJUČAK

Na temelju provedenih teorijskih, numeričkih i eksperimentalnih analiza, u cilju određivanja kritične sile proklizavanja i veličine koeficijenta trenja, a u ovisnosti od ispitnog presjeka vijka za pomake u spoju od 150 mikrometara i pomake do 300 mikrometara, može se zaključiti sljedeće:

- Pritezanje visokovrijednih vijaka klase 10.9 momentnim ključem, koji je prethodno baždaren u postizanju sile pritezanja vijka, ustanovljeno je odstupanje do 5% u odnosu na određivanje sile pritezanja mjernima trakama mjerenjem mikrodeformacije.
- Uspoređujući srednju aritmetičku vrijednost hrapavosti  $R_a$  tarnih površina nakon pritezanja vijka (a) i nakon proklizavanja spojeva (b) uočeno je opadanje hrapavosti za modele spojeva u slučaju (a) od 17 do 25%, odnosno za slučaj (b) od 30 do 45%.
- Rubna naprezanja kod kratkotrajnog opterećenja, za postignutu silu pritezanja vijka, se povećavaju s povećanjem promjera vijka. Prilikom ovih ispitivanja ustanovljeno je kako su tarne zone koncentrirane oko rupa vijaka na pločama, dok ostali dijelovi tarne površine ne sudjeluju u prijenosu sile.
- Najviša vrijednost koeficijenta trenja dobila se sa spojevima modela M12...10.9, a najmanja sa spojevima M27...10.9.
- Kod određivanja koeficijenta trenja s kritičnom silom proklizavanja u spoju do 300 mikrometara, povećava se vrijednost koeficijenta trenja dobivenog s kritičnom silom proklizavanja u spoju od 150 mikrometara.
- Kod spojeva s visokovrijednim vijcima klase 10.9, ispitni presjek vijka ima bitan utjecaj na veličinu koeficijenta trenja.



## LITERATURA

1. Soče, H., Efekt trenja i njegova korekcija na proklizavanju veza kod primjene visokovrijednih vijaka, Doktorska disertacija, Građevinski fakultet Sveučilišta u Mostaru, Mostar, 1989.
2. Soče, H., Cvitković, R., Akmadžić, V., Eksperimentalno određivanje koeficijenta trenja za dinamičko opterećenje kod visokovrijednih vijaka klase 10.9, Zbornik Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Mostaru, Vol. 3, Mostar, 2003.
3. Vlajić, Lj., Praćenje ponašanja spojeva s visokovrijednim zavrtnjima – neka zapažanja, S-84, Trogir, 1980.
4. Zarić, B., Prilog sigurnijoj identifikaciji kvaliteta visokovrijednih vijčanih proizvoda za čelične konstrukcije, S-73, Trogir, 1980.
5. Back, J., The influence of different products on the friction coefficient in connections with high-strength bolts, Publication of the Stevin Laboratory, Department of Civil Engineering Delft University of Tehnology, 1964