

Primljen / Received: 15.1.2021.

Ispravljen / Corrected: 29.3.2021.

Prihvaćen / Accepted: 22.4.2021.

Dostupno online / Available online: 10.6.2021.

## Eksperimentalno istraživanje gubitaka prednapinjanja u visokovrijednim vijcima pod cikličkim opterećenjem

### Autori:

Doc.dr.sc. **Nenad Fric**, dipl.ing.građ.

Sveučilište u Beogradu, Srbija

Građevinski fakultet

[fric@imk.grf.bg.ac.rs](mailto:fric@imk.grf.bg.ac.rs)

Autor za korespondenciju

Prof.dr.sc. **Milan Veljković**, dipl.ing.građ.

Tehničko sveučilište Delft, Nizozemska

Odjel za inženjerske konstrukcije

[m.veljkovic@tudelft.nl](mailto:m.veljkovic@tudelft.nl)Izv.prof.dr.sc. **Zoran Mišković**, dipl.ing.građ.

Sveučilište u Beogradu, Srbija

Građevinski fakultet

[mzoran@imk.grf.bg.ac.rs](mailto:mzoran@imk.grf.bg.ac.rs)Prof.emer.dr.sc. **Dragan Buđevac**, dipl.ing.građ.

Sveučilište u Beogradu, Srbija

Građevinski fakultet

[budjevac@grf.bg.ac.rs](mailto:budjevac@grf.bg.ac.rs)

Izvorni znanstveni rad

**Nenad Fric, Milan Veljković, Zoran Mišković, Dragan Buđevac**

### Eksperimentalno istraživanje gubitaka prednapinjanja u visokovrijednim vijcima pod cikličkim opterećenjem

Posmični spojevi otporni na proklizavanje s prednapetim vijcima tradicionalno se koriste u čeličnim konstrukcijama izloženim cikličkom opterećenju. Stoga se posmično opterećenje prenosi preko tarnih površina, a ne kroz kontakt između površine vijka i rupe. Glavni utjecajni parametri koji određuju otpornost na proklizavanje spoja su trenje između kontaktnih površina i razina prednapinjanja u vijcima. U radu su predstavljeni rezultati eksperimentalnih ispitivanja prednapetih vijčanih spojeva pod cikličkim opterećenjem s glavnim ciljem ispitivanja utjecaja cikličkog opterećenja na gubitke sile prednapinjanja u visokovrijednim vijcima i vijcima s uređajima za sprječavanje odvrtanja.

#### Ključne riječi:

visokovrijedni vijak, sila prednapinjanja, gubitak prednapinjanja, faktor proklizavanja, cikličko opterećenje

Original scientific paper

**Nenad Fric, Milan Veljković, Zoran Mišković, Dragan Buđevac**

### Experimental investigation of preload losses in high strength bolts under cyclic loading

Slip-resistant shear connections with preloaded bolts have traditionally been used in steel structures exposed to cyclic. Hence, shear load is transferred through friction surfaces rather than through contact between the bolt surface and the hole. The main influencing parameters determining slip resistance of the connection are the friction between contact surfaces and the bolt preload level. This paper presents an experimental study of preloaded bolted connections under cyclic load, the main objective being to investigate the influence of cyclic load on the losses of preload force in high strength bolts and lock bolts.

#### Key words:

high strength bolt, preload force, preload loss, slip factor, cyclic load

Wissenschaftlicher Originalbeitrag

**Nenad Fric, Milan Veljković, Zoran Mišković, Dragan Buđevac**

### Experimentale Forschung von Verlusten bei der Vorspannung in den hochwertigen Schrauben, welche unter der zyklischen Belastung stehen

Schiebeverbindungen, welche widerstandsfähig gegen das Durchrutschen sind und die vorgespannte Schrauben haben, werden traditionell in den Stahlkonstruktionen genutzt, welche der zyklischen Belastung. Aus diesem Grund wird die Schiebelastung über die Reibungsflächen, und nicht über den Kontakt zwischen der Schraubenfläche und des Lochs übertragen. Die Haupteinflussparameter, welche die Widerstandsfähigkeit gegen das Durchrutschen der Verbindung festlegen, sind die Reibung zwischen den Kontaktflächen, sowie die Ebene der Vorspannung in den Schrauben. In dieser Arbeit wurden die Ergebnisse der experimentellen Prüfungen der vorgespannten Schraubenverbindungen unter der zyklischen Belastung dargestellt, mit dem Hauptziel der Prüfung des Einflusses der zyklischen Belastung auf den Verlust der Vorspannkraft in den hochwertigen Schrauben und in den Schrauben für die Verhinderung des Aufdrehens/des Rückwärtsdrehens.

#### Schlüsselwörter:

hochwertige Schraube, Vorspannkraft, Vorspannverlust, Faktor des Durchrutschens, zyklische Belastung

## 1. Uvod

Vijčani prednapeti spojevi otporni na proklizavanje često se koriste u čeličnim konstrukcijama kada bi proklizavanje između povezanih elemenata trebalo ograničiti i u slučajevima kada je konstrukcija izložena promjenjivom opterećenju ili velikim razlikama naprezanja, što može dovesti do oštećenja zbog umora. Mostovi, dizalice, rešetkasti tornjevi i jarboli za dalekovode, kao i potporne konstrukcije za vjetroelektrane, zahtijevaju strogu kontrolu proklizavanja i ograničene deformacije u spojevima kako bi se smanjio njegov negativni utjecaj prema otpornosti na umor i trajnost. Prednapinjanjem vijaka, posmični spojevi, kod kojih se opterećenje prenosi posmikom vijaka i tlak primijenjen po plaštu rupe (tip otpornosti po plaštu), postaju tarni spojevi. Oko rupa, područja kontaktnog tlaka - koji je posljedica prednapinjanjem vijaka - odgovorna su za prijenos djelujućeg posmičnog opterećenja trenjem.

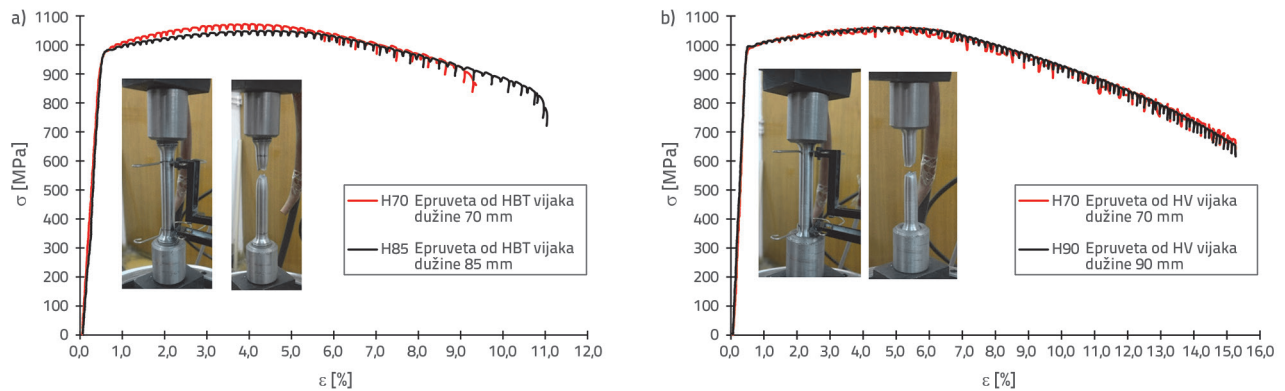
Glavni parametri koji utječu na otpornost prema proklizavanju takvih spojeva jesu vrijednost faktora proklizavanja između kontaktnih površina, razina prednapinjanja u vijcima i početne nepravilnosti spojenih ploča. Nakon stezanja povezanih ploča, sila prednapinjanja može se smanjiti uglavnom zbog puzanja površinske zaštite, opuštanja naprezanja vijaka, puzanja ploča, neodgovarajuće zaštite od korozije i plastifikacije vijaka u zoni aktivnog navoja [1]. Osim toga, učinci sklopa vijaka i tipa vijaka na spoju o veličini gubitka prednapinjanja također su poznati u literaturi [2]. Kao rezultat površinske prevlake i puzanja vijaka, razina prednapinjanja s vremenom opada; stoga je potrebno procijeniti prednapinjanje vijaka u svakoj vremenskoj točki tijekom trajanja spoja kako bi se predvidio ukupni rok trajanja spoja. Vremenski rok gubitka prednapinjanja uključuje sljedeće:

- početni gubitak prednapinjanja ovisno o načinu ugradnje vijaka
- kratkotrajno opuštanje, koje se događa u prvih 12 sati nakon ugradnje vijaka
- dugoročno opuštanje, za koje se pretpostavlja da se odvija asimptomatski.

Pojmovi kratkotrajnog opuštanja i dugotrajnog opuštanja koriste se kako bi se razlikovala dva u osnovi različita uzroka opuštanja [3]. Početni gubici prednapinjanja povećavaju se s povećanjem sile prednapinjanja. Isto vrijedi i u slučaju prednapinjanja izvan granice popuštanja vijaka [4]. Osim toga, neodgovarajuća kvaliteta postupka prednapinjanja dovodi do većih početnih gubitaka prednapinjanja, koje se povećava smanjenjem duljine vijaka [5]. Ako je kontaktni tlak na kontaktnoj površini dovoljno visok da prouzroči puzanje zaštitnog sloja od korozije, doći će do gubitka prednapinjanja u vijku i posljedično u spoju, što će dovesti do smanjenja otpornosti na proklizavanje spoja [6]. Do sada su istraživanja pokazala da ukupni gubici prednapinjanja u visokovrijednim vijcima uvelike ovise o vrsti i debljini zaštite od korozije primijenjene na tarne površine [7-9]. S povećanjem broja ploča u tarnom spoju, ukupna debljina zaštite od korozije povećava se, što dovodi do niže osne krutosti (Youngov

modul) korištenih materijala i posljedično značajnom gubitku prednapinjanja u visokovrijednim vijcima [10].

Veliki napori posvećeni su proučavanju utjecaja sustava zaštite od korozije na faktor proklizavanja i gubitak prednapinjanja. Paralelno s uzorcima bez zaštite od korozije (kontrolni uzorci), većina istraživanja provodi se na uzorcima s pocinčanim površinama [9, 11] i metaliziranom prevlakom na bazi cinka [12, 13]. Osim toga, provedena su i ispitivanja na uzorcima s cinkovim silikatnim prevlakama [11, 14]. D'Aniello i sur. [15] izveli su monotona i ciklička ispitivanja promjenjive i konstantne amplitude na sklopovima HV i HR vijaka, varirajući promjere tijela (M16, M20 i M24). Monotona ispitivanja omogućila su identifikaciju načina otkazivanja i odgovora monotone promjene sile po tipu vijčanog sklopa. Ciklička ispitivanja promjenjive amplitude omogućila su procjenu utjecaja cikličkih djelovanja na smanjenje čvrstoće i deformacijskog kapaciteta razmatranih sklopova vijaka, a nisko ciklička ispitivanja konstantne amplitude omogućila su identificiranje kapaciteta umora razmatranih vijčanih sklopova kako bi se odredilo krivulje deformacija-broj ciklusa. Cavallaro sa suradnicima [16] eksperimentalno je proučavao varijabilnost sila prednapinjanja vijčanih sklopova korištenih u tarnim prigušivačima tijekom vremena. Kratkotrajna i srednje trajna ispitivanja pokazala su da su procijenjeni gubici prednapinjanja nakon 50 godina, u slučaju sklopova s normalnom HV podloškom (EN14399-6) ili s podloškom s opružnim pločicama (DIN 6796), u prosjeku jednaki 10 % odnosno 27 %. Eksperimentalni rezultati također su pokazali da se u svim slučajevima najveći dio ukupnih gubitaka prednapinjanja, približno jednaki 70 %, dogodio u samo 30 dana. D'Antimo i sur. [17] eksperimentalno su procijenili gubitke prednapinjanja u vijčanim spojevima s izduljenim rupama u uvjetima servisnog opterećenja, ispitujući mogućnost ograničavanja gubitaka uzimajući u obzir različite rasporede konusnih podloški. Rezultati dobiveni kratkotrajnim, srednjotrajnim i dugotrajnim ispitivanjima korišteni su za kalibriranje analitičkog modela sposobnog za predviđanje gubitka prednapinjanja tijekom vremena, uzimajući u obzir utjecaj vanjskih opterećenja. Zaključeno je da model može prilično precizno reproducirati odgovor razmatranih vijčanih spojeva s različitim rasporedima podloška, s maksimalnom pogreškom za konfiguraciju s unaprijed postavljenim opružnim podloškama od približno 20 %. Dongxu i sur. [18] izveli su eksperimente na 96 čeličnih visokovrijednih vijaka razreda 12,9 kako bi kvantificirali konačne kapacitete čvrstoće u vlaklu, posmiku, kao i kombiniranim vlaklu i posmiku. Uz to, učinci prednapinjanja istraženi su kroz nekoliko vijaka s djelomičnim navojem. Eksperimentalni rezultati primijenjeni su za procjenu točnosti postupaka za projektiranje navedenih u europskim i sjevernoameričkim specifikacijama, a predložene su odgovarajuće izmjene u smislu izraza za projektiranje i faktora smanjenja. Jovanović i sur. [19, 20] izveli su opsežna eksperimentalna i numerička ispitivanja konstrukcijskog odgovora momentnog spoja s čelnom pločom i četiri vijka po redu. Eksperimentalni program obuhvaća ispitivanja na 36



Slika 1. Inženjerske krivulje naprezanje-deformacija: a) ispitivanje HBT vijaka; b) ispitivanje HV vijaka

uzoraka u prirodnoj veličini elemenata odsječka T oblika i četiri uzorka priključaka nosač – stup sa spojem s čelnom pločom i četiri vijka po redu. Sklopovi vijaka svakog uzorka uključivali su tenzometre ugrađene u vijke radi mjerenja osnog naprezanja duž vijka. Osim toga, istraženo je ponašanje prednapinjanja vijčanih sklopova od nehrđajućeg čelika i izvedba spojeva otpornih na proklizavanje od nehrđajućeg čelika [21].

Ovaj rad predstavlja dio sveobuhvatnog istraživanja provedenog na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Beogradu, koje je provedeno kako bi se kvantificirali gubici prednapinjanja visokovrijednih vijaka (HV) i vijaka s uređajem za sprječavanje odvrtanja (HBT) [22]. Rad se bavi eksperimentalnim ispitivanjem prednapetih vijčanih spojeva izloženih cikličkom opterećenju kako bi se procijenila promjena prednapinjanja nakon promjenjivih (cikličkih) djelovanja. Glavni su ciljevi istraživanje postupka prednapinjanja i usporedba ostvarivog i preostalog prednapinjanja s obzirom na nominalnu minimalnu silu prednapinjanja  $F_{p,c}$  konvencionalnih HV vijaka, paralelno s tim, alternativnih vijaka s uređajem za sprječavanje odvrtanja. Eksperimentalno istraživanje jasno pokazuje da upotreba cinkova silikatnog premaza "Resist 86" na čeličnim pločama u posmičnim spojevima otpornim na proklizavanje osigurava razred tarne površine B, prema EN 1993-1-8 [23], osiguravajući zanemariv gubitak sile prednapinjanja u vijcima kada su spojevi izloženi cikličkom opterećenju koje uključuje  $2 \cdot 10^6$  ciklusa.

## 2. Eksperimentalni program

Koncipiran je eksperimentalni program za određivanje glavnih parametara koji utječu na ponašanje spojeva otpornih na proklizavanje, uključujući:

- vlačna ispitivanja radi određivanja mehaničkih svojstava visokovrijednih vijaka - HV vijčanih sklopova prema EN 14399-4 [24] i vijaka HBT - alternativni sustavi visokovrijednih vijaka za prednapinjanje, tj. Huck BobTail – Lockbolts
- ispitivanja kako bi se utvrdio faktor matice  $k$  za HV vijke i faktor proklizavanja između tarnih površina spojnih ploča (uzorci s M16 i M20 vijcima) na koje je nanesen cinkov silikatni premaz

- ciklička ispitivanja na dvostrukim preklopnim spojevima za kvantificiranje gubitaka prednapinjanja pod cikličkim opterećenjem. Ispitna matrica sadržavala je vijke HV i HBT razreda 10,9 i nazivnog promjera od 20 mm.

Prednapinjenje u vijcima izmjereno je pomoću instrumentalnih vijaka s ugrađenim tenzomerima.

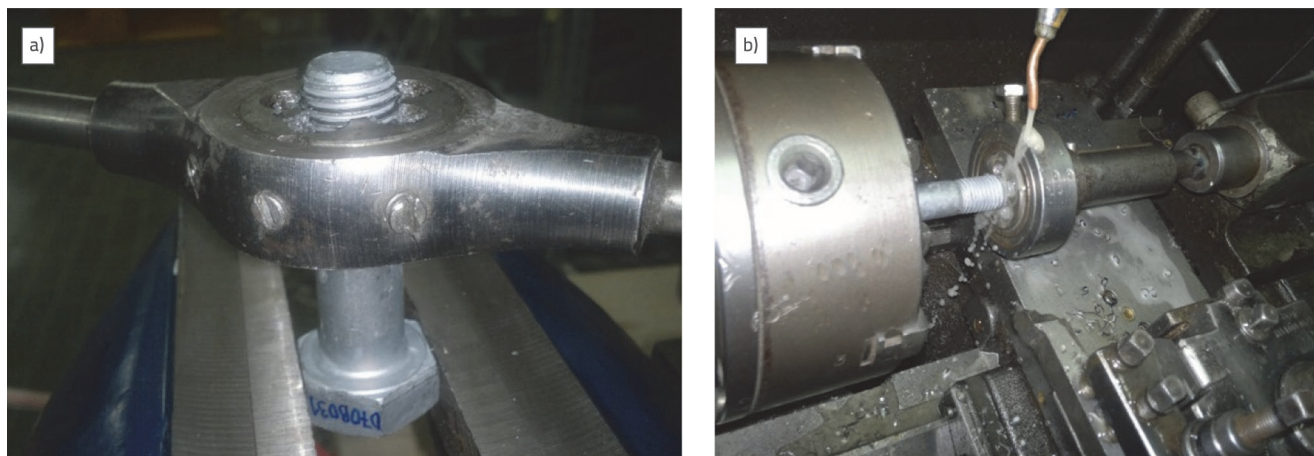
### 2.1. Ispitivanje materijala

Dva obrađena vlačna uzorka izrađena su od vijaka HV i HBT prema EN ISO 898-1 [25] za mjerenje mehaničkih svojstava. Vlačna ispitivanja kontrolom pomaka provedena su uzimajući u obzir zahtjeve navedene u EN ISO 6892-1 [26]. Ispitivanja su provedena na univerzalnom ispitnom stroju AG-Xplus (Shimadzu, Japan) kapaciteta 300 kN. Kalibrirani ekstenzometar s mjernom dužinom  $L_0$ , od 50 mm korišten je za mjerenje uzdužnih deformacija epruveta. Usvojena brzina ispitivanja bila je 0,1 mm / min za početni dio ispitivanja do približno 1 % ukupne deformacije nakon čega je povećana na 2,0 mm / min.

Dobivene inženjerske krivulje naprezanja-deformacija zajedno s postavkom vlačnog ispitivanja epruveta prikazane su na slici 1. i za HBT vijke i za HV vijke. Eksperimentalni rezultati potvrdili su nominalnu kvalitetu čelika vijaka. Srednje vrijednosti granice popuštanja  $f_v$  su 976 N/mm<sup>2</sup> i 993 N/mm<sup>2</sup> za HBT i HV vijke, dok su srednje vrijednosti krajnje vlačne čvrstoće  $f_u$  1060,4 N/mm<sup>2</sup> i 1061,6 N/mm<sup>2</sup> za HBT i HV vijke.

### 2.2. Određivanje koeficijenta trenja između navoja matice i tijela vijaka HV vijaka

Ispitivanja trenja temeljila su se na standardnim ispitivanjima prema EN1090-2 [27]. Koeficijent trenja između navoja matice i tijela vijka HV vijaka izmjeren je na devet pocinčanih HV vijaka nominalnog promjera 20 mm. Vijci su imali zaštitni sloj debljine od 45 μm do 90 μm. Iz iste serije korištena su četiri vijka duljine 70 mm i pet vijaka duljine 90 mm. Tijekom ugradnje vijaka u kalibracijsku opremu primijećeno je da se znatan broj vijaka



Slika 2. Uklanjanje cinka s navoja vijaka: a) Uklanjanje cinka nareznicom; b) Uklanjanje cinka tokarskim strojem

ne može ugraditi u metrički navoj. Stoga su navoji svakog vijka obrađeni ("očišćeni") nareznicom ili tokarskim strojem, kao što je prikazano na slici 2.a, odnosno slici 2.b. Višak cinka uklonjen je s navoja, što omogućava jednostavnu ugradnju u opremu za kalibraciju. Važno je napomenuti da je koeficijent  $\mu$  određen na vijcima čiji su navoji obrađeni kako je prije opisano. Ispitivanja su provedena u skladu s EN 1993-1-8 [23] i EN ISO 16047 [28], koristeći sljedeću opremu:

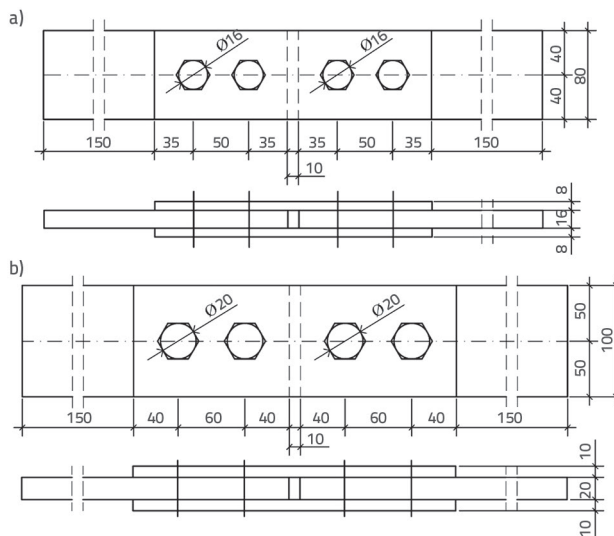
- momentna vaga Torqueleader, model N 2000, raspon 100-2000 Nm
- tenzometar Stahlwille, raspon do 300 kN
- ključ Rahsol DremoMeter tip D, raspon 140-760 Nm.

U tablici 1. navedeni su izmjereni momenti pritezanja  $T_{Fp,C}$ , sile prednapinjanja vijaka  $F_{p,C}$  i koeficijenta trenja između navoja matice i tijela vijka ( $k$  - faktor). Prosječna vrijednost  $k$  - faktora je 0,143 s koeficijentom varijacije (CoV) od 7,4 %.

### 2.3. Određivanje faktora proklizavanja

Faktor proklizavanja između povezanih čeličnih ploča zaštićenih cinkovim silikatnim premazom "Resist 86" određen je prema EN 1090-2 [27]. Postupak ispitivanja izveden je na dvostrukim preklopnim posmičnim spojevima s čeličnim pločama čije su

tarne površine pripremljene prema obradi koja se ispituje, a zatim su vlačno opterećene .



Slika 3. Nominalna geometrija uzoraka korištenih za mjerenje faktora proklizavanja između spojenih ploča: a) ploče uzorka s HV vijcima M16; b) ploče uzorka s HV vijcima M20 (sve dimenzije su u mm)

Tablica 1. Rezultati ispitivanja koeficijenta trenja između navoja matice i tijela vijaka HV vijaka

Br. uzorka vijka	Vijak	$T_{Fp,C}$ [Nm]	$F_{p,C}$ [kN]	$k$	$k_{mean}$	CoV [%]
1	M20x70	500	164	0,152	0,143	7,4
2	M20x70	470	180	0,131		
3	M20x70	445	168	0,132		
4	M20x70	435	160	0,136		
5	M20x90	480	150	0,160		
6	M20x90	480	162	0,148		
7	M20x90	435	150	0,145		
8	M20x90	450	147	0,153		
9	M20x90	450	169	0,133		



Jedna ispitna serija sastojala se od šest uzoraka. Tri su uzorka zategnuta HV vijcima M16, a tri HV vijcima M20. Svaki uzorak uključuje četiri vijka. Geometrija uzoraka je u skladu s Dodatkom G, EN 1090-2 [27]. Geometrija rupa u svim ispitanim uzorcima odgovarala je normalnim kružnim rupama. Slika 3 prikazuje nominalnu geometriju uzoraka korištenih u ispitivanjima. Razred čelika spojenih ploča bila je S355JRG2.

Oznaka uzorka "F-X-M16 (ili M20)" uključuje sljedeće oznake: prvo slovo F označava ispitivanje trenja; drugi brojevi X predstavlja redni broj uzorka, a alfanumerička oznaka M16 i M20, na trećem mjestu, odgovara nazivnoj oznaci korištenog vijka.

Priprema uzoraka obavljena je pjeskarenjem, postigavši stupanj pripreme Sa 2.5 prema EN ISO 8501-1 [29], uporabom abraziva "Medium G" promjera 30-50 μm. Nakon čišćenja uzoraka, premaz "Resist 86" nanesen je četkom na suhu površinu u dva sloja. Prosječne debljine suhog (premaza) filma izmjerene laboratorijskim elkometrom u karakterističnim točkama bile su kako slijedi:

- 88,4 μm za uzorke s rupama promjera 16 mm (debljina filma u rasponu od 65,4 do 110 μm) izmjereno 24 sata nakon nanošenja premaza;
- 91,8 μm za uzorke s rupama promjera 20 mm (debljina filma u rasponu od 60,5 do 124 μm), izmjereno 24 sata nakon nanošenja premaza.

Tijekom postupka pripreme površine mjereni su uvjeti okoline, tablica 2.

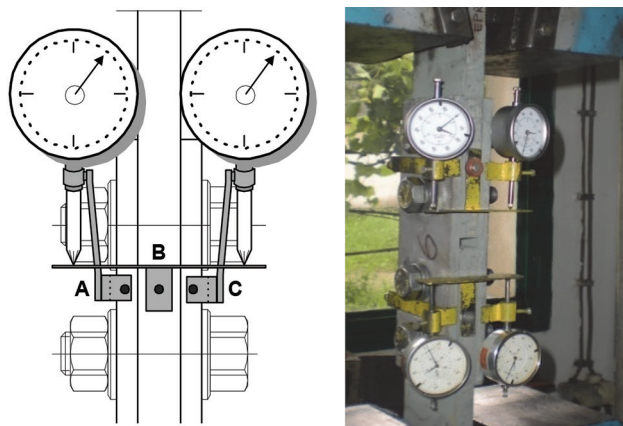
Tablica 2. Uvjeti okoline tijekom nanošenja premaza

Temperatura zraka [°C]	Temperatura površine [°C]	Temperatura kondenzacije [°C]	Relativna vlažnost [%]
19,2	17,5	14,7	76,0

Visokovrijedni vijci ugrađeni su u uzorke u paketu: vijak, matica i dvije podloške. Zatezanje je izvedeno kalibriranim ključem ("RAHSOL", tip D, s rasponom 280–760 Nm) određivanjem prednapinjanja koje se na svaki vijak primjenjuje zakretnim momentom.

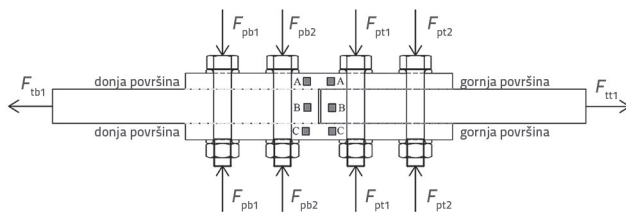
Ispitivanje je provedeno na ispitnom uređaju kapaciteta 800 kN u vlaklu s pretvaračima sile "SCAIME CA40X40t C4 CH 10e". HV vijci korišteni u ovom ispitivanju ostaju u elastičnom području nakon ugradnje, pa se stoga mogu prednapeti više puta. Prije ugradnje, vijci su unaprijed prednapeti za kontrolu tenzometra pomoću kalibriranog ključa. Na taj se način određuje kontrolirana primijenjena sila postignuta tijekom ugradnje. Sljedeći je korak ugradnja vijaka u uzorke i određivanje faktora proklizavanja. Na kraju su isti vijci ponovo prednapeti uz kontrolu tenzometrom pomoću kalibriranog ključa koji je bio osnova za određivanje primijenjene sile prednapinjanja. Pri izračunavanju faktora proklizavanja uzete su prosječne vrijednosti tih dvaju mjerenja prednapinjanja.

Ukupno prednapinjanje predstavlja zbroj prednapinjanja vijaka sa svake strane spoja. Prije ispitivanja, s dvije strane spoja bila su pričvršćena dva mjerila s brojačnikom. Tako je izmjereno pomicanje točaka A i C u odnosu na točku B i registrirane su sile na kojima je došlo do proklizavanja. Kao sila proklizavanja prihvaćena je razina sile pri kojoj je došlo do pomaka točaka A i C u odnosu na točku B, većeg od  $\delta = 150 \mu\text{m}$ . Na slici 4. prikazan je ispitni postupak za određivanje sile trenja.



Slika 4. Postavljanje ispitivanja za mjerenje sile trenja

Raspored ispitivanja prilagođen je scenariju gradnje nove čelične konstrukcije. U takvom slučaju, zaštita od korozije čeličnih elemenata primjenjuje se prije ugradnje, a može proći dosta vremena između nanošenja premaza i postavljanja elementa. Zbog toga je premaz nanesen na uzorke 10 dana prije prednapinjanja vijaka, a uzorci su testirani 24 sata nakon prednapinjanja vijaka. Za potrebe prezentacije i analize rezultata usvojene su sljedeće oznake, kako je prikazano na slici 5.:  $F_{pt1}$ ,  $F_{pt2}$  su sile prednapinjanja vijka na gornjoj površini uzorka,  $F_{pb1}$ ,  $F_{pb2}$  su sile prednapinjanja vijka na donjoj površini uzorka,  $F_{tt1}$  je sila proklizavanja na gornjoj strani uzorka, a  $F_{tb1}$  je sila proklizavanja na donjoj strani uzorka.



Slika 5. Označavanje sila koje djeluju na uzorke i položaji mjerenja tenzometrom

Ključni eksperimentalni rezultati sažeti su u tablicama 3. i 4. za uzorke s vijcima M16, odnosno M20, uzimajući u obzir gornju i donju tarnu površinu, u kojima je DFT debljina suhog filma. Iako ispitivanja puzanja (u skladu s EN 1090-2 [27]) nisu provedena, dobiveni rezultati jasno upućuju na to da kada se koristi premaz "Resist 86", u najgorem slučaju postignut je spoj s razredom tarne površine B u skladu s EN 1993-1-8 [23].

Tablica 3. Rezultati ispitivanja faktora proklizavanja između spojenih ploča za uzorke s M16 vijcima

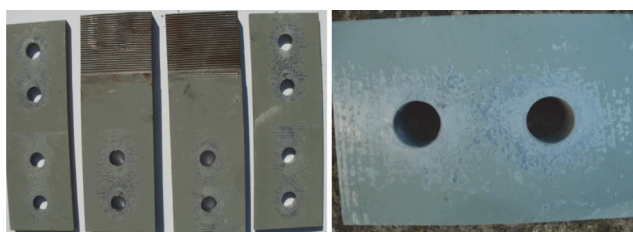
Uzorci	Tarna površina	DFT [ $\mu\text{m}$ ]	Sile vijaka $F_{pt}$ & $F_{pb}$ [kN]		Ukupna sila prednapinjanja $F_{p,c}$ [kN]	Sila proklizavanja $F_t$ [kN]	Faktor proklizavanja $\mu$
F1M16	Gornje površine	88,4	$F_{pt1} = 100$	$F_{pt2} = 100$	200	203,8	0,51
	Donje površine	88,4	$F_{pb1} = 103$	$F_{pb2} = 107$	210	203,8	0,48
F2M16	Gornje površine	88,4	$F_{pt1} = 107$	$F_{pt2} = 107$	214	208,2	0,49
	Donje površine	88,4	$F_{pb1} = 108$	$F_{pb2} = 115$	223	208,2	0,47
F3M16	Gornje površine	88,4	$F_{pt1} = 92$	$F_{pt2} = 93$	185	190,1	0,51
	Donje površine	88,4	$F_{pb1} = 91$	$F_{pb2} = 90$	181	190,1	0,52
Srednja vrijednost							0,50
Standardno odstupanje							0,0197
Koeficijent varijacije [%]							3,90

Tablica 4. Rezultati ispitivanja faktora proklizavanja između spojenih ploča za uzorke s M20 vijcima

Uzorci	Tarna površina	DFT [ $\mu\text{m}$ ]	Sile vijaka $F_{pt}$ & $F_{pb}$ [kN]		Ukupna sila prednapinjanja $F_{p,c}$ [kN]	Sila proklizavanja $F_t$ [kN]	Faktor proklizavanja $\mu$
F1M20	Gornje površine	91,8	$F_{pt1} = 160$	$F_{pt2} = 170$	330	324,6	0,49
	Donje površine	91,8	$F_{pb1} = 164$	$F_{pb2} = 163$	327	324,6	0,50
F2M20	Gornje površine	91,8	$F_{pt1} = 160$	$F_{pt2} = 154$	314	285,2	0,45
	Donje površine	91,8	$F_{pb1} = 152$	$F_{pb2} = 145$	297	285,2	0,48
F3M20	Gornje površine	91,8	$F_{pt1} = 162$	$F_{pt2} = 170$	332	306,8	0,46
	Donje površine	91,8	$F_{pb1} = 177$	$F_{pb2} = 155$	332	306,8	0,46
Srednja vrijednost							0,47
Standardno odstupanje							0,0197
Koeficijent varijacije [%]							4,20



Slika 6. Uzorci zategnuti M16 vijcima nakon ispitivanja



Slika 7. Uzorci zategnuti M20 vijcima nakon ispitivanja

Na slikama 6. i 7. prikazane su vidljive zone aktivnog trenja povezanih ploča oko vijaka za uzorke s prednapetim M16, odnosno M20 vijcima. Nema oštećenja osnovnog materijala oko rupa na spojevima što pokazuje da vijci nisu bili izloženi savijanju tijekom ispitivanja.

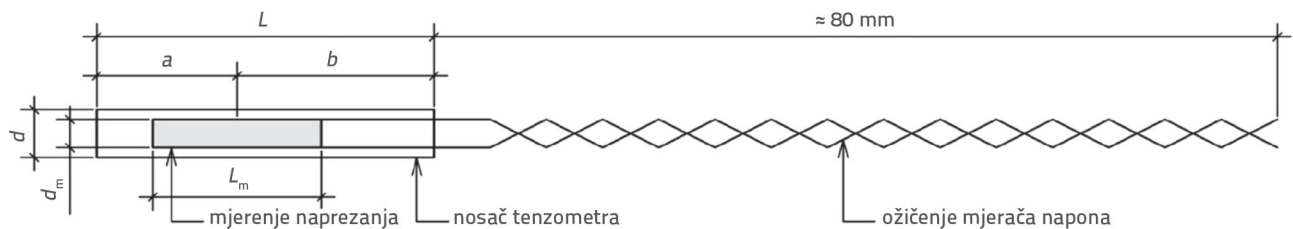
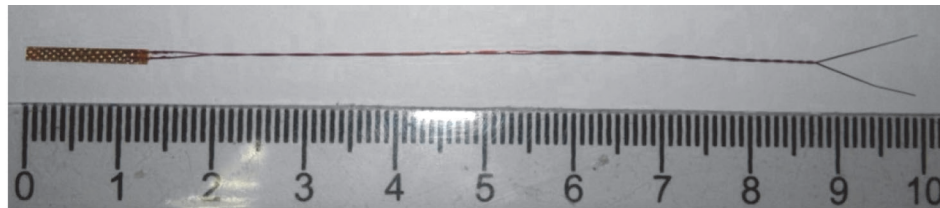
#### 2.4. Mjerenje prednapinjanja

Prednapinjanje u vijčanim sklopovima tijekom opuštajućih ispitivanja i ispitivanja pod cikličkim opterećenjem izmjereno

je pomoću ugrađenih tenzometara. Metoda se temelji na mjerenju osnovnog naprezanja duž vijka pomoću tenzometra, koji je obično ugrađen u vijak, i izvođenju kalibracije uspoređujući očitavanja s mjerenjima sile na mjernoj dozi. Odnos između mjerenja deformacija i razina sile ovisi o raspršenju modula elastičnosti  $E$  i efektivne ploštine  $A$  vijaka u koje je ugrađen tenzometar (što ovisi i o položaju tenzometra u vijku). Raspršivanje  $E$  i  $A$  eksperimentalno se utvrđuje kalibracijom kako bi se osigurala razina naprezanja koja osigurava potrebnu silu prednapinjanja u vijku. Postupak ugradnje tenzometra

Tablica 5. Svojstva tenzometra "BTM-6C"

Tip tenzometra	Tenzometar [mm]		Nosач tenzometra [mm]		Središte tenzometra [mm]		Otpor [Ω]	Promjer rupe [mm]
	Dužina $L_{sg}$	Širina $d_{sg}$	Dužina $L$	Širina $d$	$a$	$b$		
BTM – 6C	6	1,0	12,0	1,7	5	7	120	∅ 2,0



Slika 8. BTM-6C tenzometar

u vijak zahtijeva posebne termičke obrade vijaka kako bi se postiglo stvrdnjavanje ljepila.

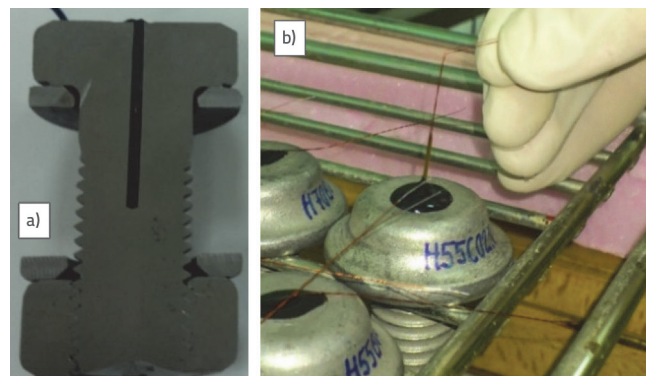
Da bi se izmjerila vrijednost i varijacija prednapinjanja vijaka, upotrijebljeni su BTM-6C (Tokyo Sokki Kenkyujo Co, Japan) tenzometri (vidi tablicu 5.).

Prema popisu specifikacija, tenzometri se mogu koristiti u temperaturnom rasponu od  $-10^{\circ}\text{C}$  do  $+80^{\circ}\text{C}$ , a njihovo mjerno područje je  $5000 \cdot 10^{-6} \mu\text{m/m}$ . Ožičenje tenzometara izrađeno je od bakrenih žica s poliuretanskom izolacijom, promjera 0,14 mm i približno duljine 80 mm, vidi sliku 8.

Tenzometri su ugrađeni u  $\varnothing 2$  mm rupe izbušene u osi vijka. Unutrašnjost rupe, glava vijka i tijelo očišćeni su otapalom kako bi se uklonila preostala prašina ili špena. Tenzometri su bili smješteni u zoni u kojoj je promjena područja presjeka vijka minimalna (presjek tijela izvan područja s navojem). Ovaj se zahtjev ne može ispuniti u slučaju HBT vijaka, jer navoj prolazi preko cijelog tijela vijka. U tom slučaju, središte tenzometra trebalo bi biti u sredini stezne zone nakon ugradnje. Najučinkovitiji način ugradnje tenzometara u željeni položaj je odgovarajuće označavanje nosača tenzometra. Na označenim mjestima nosač tenzometra savijen je pod pravim kutom, pažeći da ne ošteti izolaciju; dobiveni oblik tenzometra osigurava da će biti pravilno ugrađen. Položaj tenzometra u HV vijcima duljine 50 mm i ugrađivanje tenzometra savijenog pod pravim kutom u vijke prikazano je na slici 9.

Ljepilo koje služi za učvršćivanje BTM-6C tenzometara nosi oznaku proizvođača "A-2". Prije ugrađivanja tenzometara, isto ljepilo koje je ubrizgano u rupu na vijku također se treba nanijeti na sam tenzometar. Nakon toga, tenzometar se ugrađuje u tijelo vijka na način da savijeni dio žice spojen na

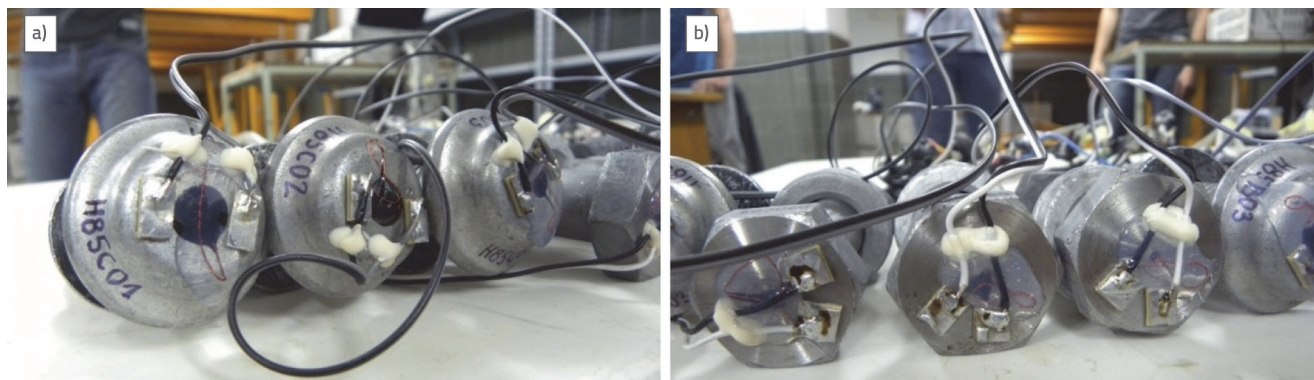
nosač tenzometra sjeda na glavu vijka. Tenzometar treba biti ugrađen okomito, poravan s osi rupe. Nakon fiksiranja položaja tenzometra, vijci su bili izloženi termičkoj obradi ljepila u laboratorijskoj sušilici s temperaturnim režimom kontroliranim sondom. Nakon stvrdnjavanja ljepila i naknadnog hlađenja vijaka, ožičenje tenzometra može se povezati sa sustavom za prikupljanje podataka kako bi se kontroliralo funkcioniranje tenzometra.



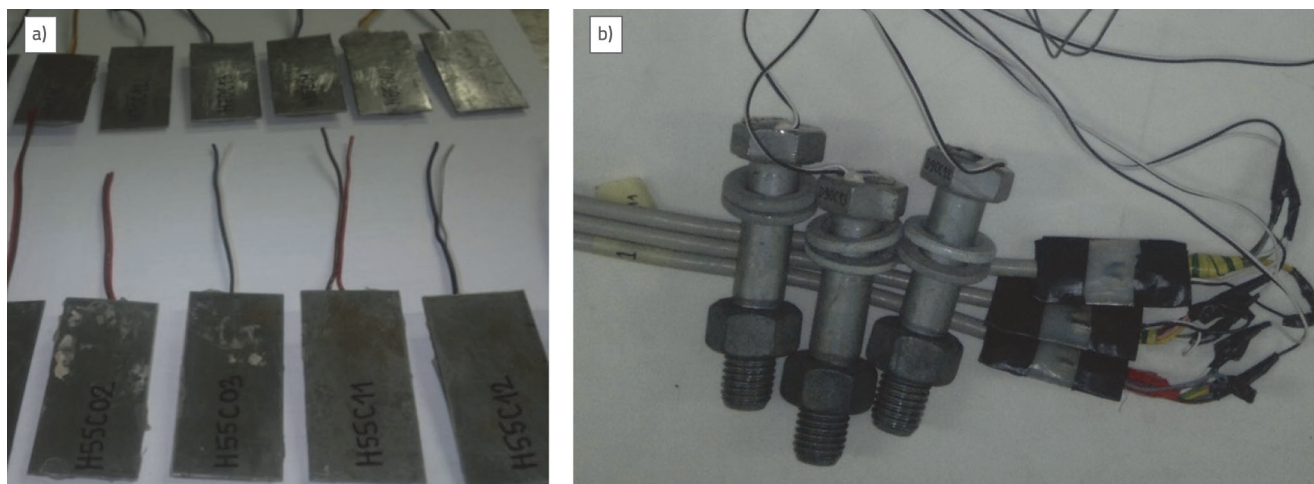
Slika 9. a) Postavljanje tenzometra u HV vijak; b) Ugrađivanje tenzometara savijenih pod pravim kutom u HBT vijke

Vrlo osjetljivo ožičenje tenzometra zahtijeva osiguranje odgovarajuće zaštite od oštećenja ili kidanja tijekom ispitivanja. Zbog toga su dvije bakelitne ploče zalijepljene na glavu vijka i na njih je zalemljeno ožičenje kao i kabeli koji povezuju tenzometar sa sustavom za prikupljanje podataka. Ožičenje je zaštićeno dvokomponentnim ljepilom i silikonom, vidi sliku 10.





Slika 10. Zaštita ožičenja tenzometara

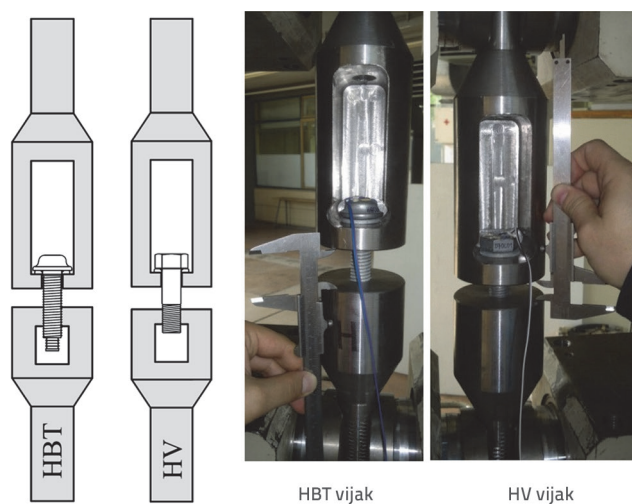


Slika 11. Kompenzacijski tenzometri

Kako bi se nadomjestili temperaturni učinci, uz svaki tenzometar ugrađen u vijak, na čeličnu ploču zalijepljen je kompenzacijski tenzometar, vidi sliku 11.

Postupak kalibracije izveden je u ispitnom Schenkovom stroju kapaciteta 400 kN. Izgrađen je poseban uređaj koji omogućava operateru da učvrsti vijak u ispitnom stroju i opterećenje se mjeri na unaprijed određenoj razini opterećenja. Uređaj je konstruiran na temelju geometrije čeljusti ispitnog stroja i HBT i HV ispitivanih vijaka. Slika 12. prikazuje postavljanje ispitivanja za kalibraciju vijka.

Usvojena je metoda označavanja koja je osigurala da svaki vijak ima jedinstvenu oznaku, kao što je prikazano u tablici 6. Prvo slovo označava tip vijaka, D - HV vijke prema EN 14399-4 [30] i, H - vijke Huck BobTail. Broj na drugom i trećem mjestu (50, 55, 70, 85, 90) predstavlja duljinu tijela vijaka. Sljedeće slovo C označava da su vijci ugrađeni u uzorke čije su površine zaštićene od korozije (prevlaka). Broj na petom mjestu oznake označava da su uzorci izloženi cikličkom opterećenju. Kako bi se proučio učinak prednapinjanja jednog vijaka na susjedni vijak koji je već bio unaprijed opterećen, izveden je kontrolirani redoslijed ugradnje. Dakle, označavanje vijaka uključivalo je brojku na šestom mjestu koja označava redoslijed ugradnje vijaka. Na oznaci spoja (glavna ispitivanja gubitka prednapinjanja pod cikličkim opterećenjem), prvo slovo označava vrstu ugrađenih vijaka, a broj na drugom mjestu predstavlja redni broj uzorka (vidi tablicu 6.).



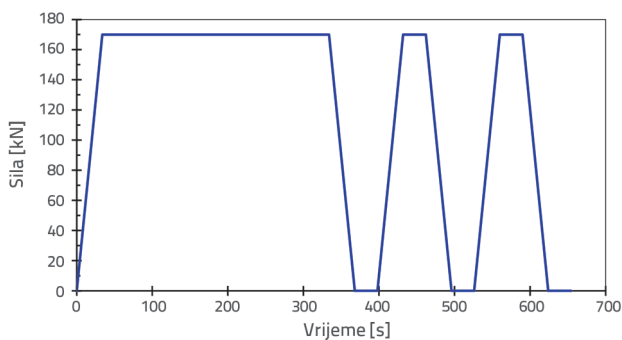
Slika 12. Postavljanje ispitivanja za kalibracije vijka



Tablica 6. Sustav označavanja spojeva i ugrađenih vijaka izloženih cikličkom opterećenju

Oznaka vijka	Oznaka spoja	Oznaka vijka	Oznaka spoja
D50C11	D3	H55C11	H3
D50C12		H55C12	
D50C13		H55C13	
D70C11	D6	H70C11	H6
D70C12		H70C12	
D70C13		H70C13	
D90C11	D9	H85C11	H9
D90C12		H85C12	
D90C13		H85C13	

Usvojen je postupak ispitivanja opisan u [2]. Postupak uključuje postupnu primjenu opterećenja s najmanje tri ciklusa opterećenja-rasterećenja; nakon prvog opterećenja razina opterećenja održavana je na maksimalnoj vrijednosti tijekom 300 s, dok je u svim ostalim slučajevima održavana na maksimalnoj ili minimalnoj vrijednosti tijekom 30 s, vidi sliku 13.



Slika 13. Dijagram sila-vrijeme na ispitnom stroju tijekom kalibracije vijaka [2]

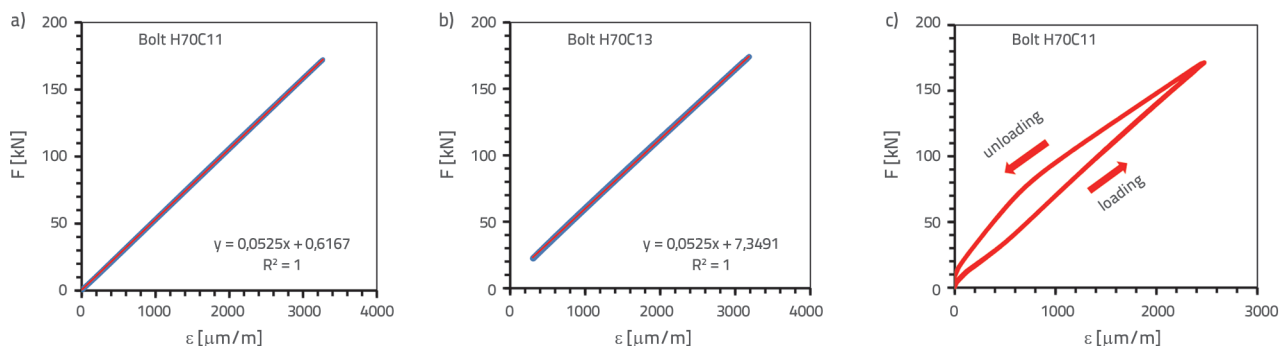
Zadržavanje sile tijekom 300 sekundi nakon prvog ciklusa omogućuje kontrolu funkcioniranja tenzometra kroz

stabilnost očitavanja. Ako se dogodi "proklizavanje" tenzometra (pad naprezanja pri konstantnoj sili), to je siguran pokazatelj da tenzometar nije pravilno ugrađen. Brzine opterećenja i rasterećenja uvijek su se održavale na 5 kN/s. Maksimalna vlačna sila koja se koristi za opterećenje vijaka tijekom kalibracije odabrana je tako da bude blizu očekivane sile prednapinjanja, ali i ujednačena za sve vijke. Strah od oštećenja navoja vijaka tijekom kalibracije [31] zasigurno je neopravdan. Kroz čitav postupak kalibracije očitavanja su obavljana na 5 Hz sa tenzometara. Ako je rezultat linearni odnos između sile koja djeluje na vijak i deformacije izmjerene pomoću tenzometra (u cijelom rasponu opterećenja i u svim ciklusima opterećenja-rasterećenja), smatra se da tenzometar ispravno funkcionira, te se smatra da je vijak spreman za ugradnju.

U ovoj vrsti eksperimentalnog ispitivanja kalibrirano je ukupno 18 vijaka i za svaki vijak određen je odnos primijenjene sile i deformacije izmjerene tenzometrom. Iz dobivenih rezultata, primjenom metode najmanjih kvadrata, utvrđen je odnos naprezanja i deformacije. Na taj je način iz kalibracijske krivulje i koeficijenta korelacije poznato ponašanje svakog vijka. Uočena su tri različita tipa kalibracijske krivulje:

- savršeni linearni odnos između sile i deformacije, slika 14a;
- krivulje s određenom nelinearnošću kod manjih sila, slika 14b;
- krivulje koje pokazuju histerezo ponašanje (što dovodi do izuzimanja ovih vijaka od upotrebe u eksperimentima), slika 14c.

Linearni odnos između primijenjene sile i naprezanja izmjenog tenzometrom dokaz je ispravne ugradnje tenzometra u vijak i pravilnog djelovanja lijepljenja koji omogućavaju da tenzometar prati ponašanje vijka (podudaranje naprezanja vijaka u zoni tenzometra s deformacijama u tenzometru). Istodobno, razina naprezanja iz tenzometra povezana je s razinom sile. Kao primjer, kalibracijska krivulja za vijak H70C11 zajedno s jednadžbom dobivenom metodom najmanjih kvadrata i koeficijentima korelacije prikazana je na slici 14.



Slika 14. Dijagrami sila-pomak: a) kalibrirani vijak H70C11 linearni odnos između sile i naprezanja; b) kalibrirani vijak H70C13 krivulja s određenom nelinearnošću kod manjih sila; c) kalibrirani vijak H70C11 pogrešno instaliran tenzometar

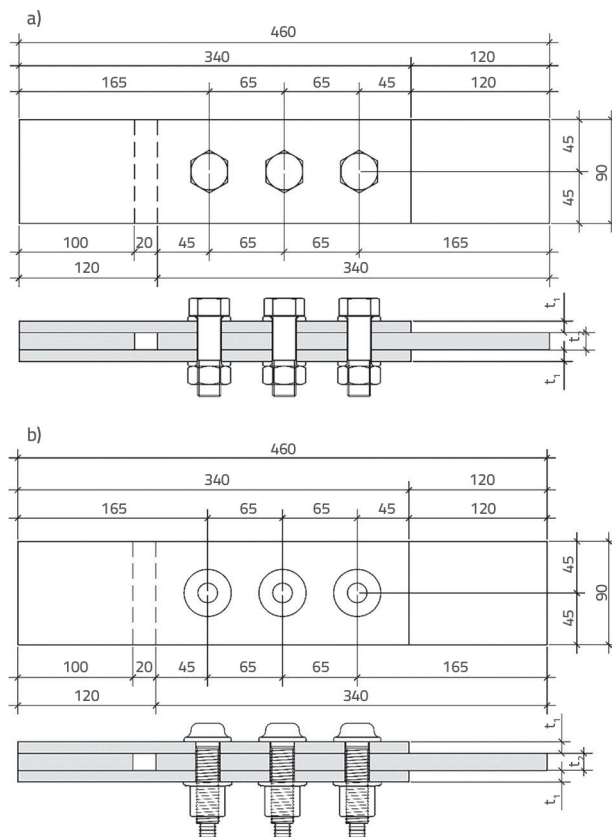
## 2.5. Ispitivanja gubitka prednapinjanja izloženih cikličkom opterećenju

Ciklička ispitivanja provedena su na šest uzoraka - tri HV vijka i tri HBT vijka. Svaki se uzorak sastojao od tri čelične ploče i tri vijka koji su zajedno tvorili dvostruki spoj s preklomom. Svi vijci imali su nominalni promjer 20 mm. HV vijci korišteni su u duljinama od 50, 70 i 90 mm, a duljine HBT vijaka bile su 55, 70 i 85 mm. Za uzorke su odabrana tri paketa debljine koje se sastoje od debljina pojedinih ploča:  $t_{1,1} + t_{2,1} + t_{1,1} = 5 + 8 + 5 = 18$  mm,  $t_{1,2} + t_{2,2} + t_{1,2} = 10 + 15 + 10 = 35$  mm, i  $t_{1,3} + t_{2,3} + t_{1,3} = 15 + 25 + 15 = 55$  mm. Svi su uzorci izrezani iz čelične ploče kvalitete S355JRG2. Pjeskarenje je izvedeno na automatskom stroju koristeći kvarcni pijesak kao abraziv. S očišćenih površina uklanjala se prašina mlazom komprimiranog zraka i četkica. Na taj su način površine pripremljene za zaštitu od korozije pomoću cinkovih silikatnih premaza. Geometrije ispitivanih uzoraka s HV i HBT vijcima prikazane su na slici 15.a, odnosno na slici 15.b. Ugradnja vijaka i oblikovanje uzoraka obavljani su u Laboratoriju za beton i reologiju Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Beogradu.

Dostupne norme propisuju minimalne vrijednosti sile prednapinjanja u visokovrijednim vijcima:

- za M20 HV vijke, prema EN 1993-1-8 [23]  $F_{p,c} = 171,5$  kN,
- za M20 HBT vijke, prema nacrtu norme [32]  $F_{p,c} = 170,7$  kN.

Ugradnja HV vijaka pomoću kalibriranog ključa definirana je u EN 1090-2 [27]. Ugradnja (metoda zakretnog momenta) provodi se u dva koraka. Najprije se vijci prednapnu na 75 % momenta zatezanja određenog iz propisane vrijednosti sile  $F_{p,c}$ . Nakon što je to učinjeno za sve vijke u spoju, u drugom su koraku prednapeti do 110 % istog momenta zatezanja, što je istodobno i kraj njihove ugradnje. U ovom su eksperimentu HV vijci prednapeti u jednom koraku, do punog zateznog momenta. Procijenjeno je da će to omogućiti bolju percepciju ciljanih pojava i lakše uspoređivanje rezultata s HBT vijcima.



Slika 15. Nominalna geometrija uzoraka s HBT vijcima (sve dimenzije su u mm): a) Uzorci s HV vijcima; b) Uzorci s HBT vijcima

Zbog vrlo specifičnih uzoraka, trebalo je osmisлити odgovarajući način ugradnje HV vijaka. Budući da se ugrađuju pomoću kalibriranog ili običnog ključa, glave vijaka morale su biti pričvršćene u škripcu, slika 16. To se pokazalo dobrim rješenjem i omogućilo brzu ugradnju vijaka.

Nisu bili potrebni posebni uvjeti za ugradnju vijaka "Huck BobTail", s obzirom na način rada hidraulične preše za ugradnju.



Slika 16. Ugradnja vijaka u uzorke



Njihova instalacija potpuno je potvrdila navedenu brzinu od 2 s po vijku, kao i jednostavan i intuitivan postupak koji ne zahtijeva posebno kvalificiranu radnu snagu.

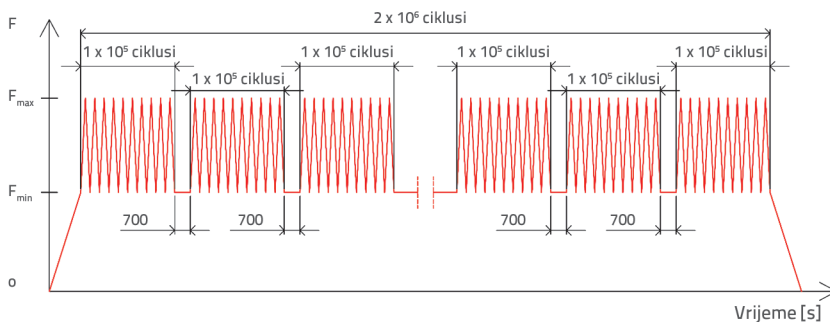
Uzorci su bili izloženi cikličkom opterećenju nakon mjesec dana praćenja početnih i kratkoročnih gubitaka prednapinjanja. Eksperiment je proveden na MTS ispitnom stroju kapaciteta ± 500 kN. Cikličko opterećenje primijenjeno je u 105 ciklusa s pauzom od 700 s nakon svake serije kako bi se nadzirale sile prednapinjanja vijaka. Pauza je poslužila za stabilizaciju uzorka i sile prednapinjanja.

Spektar opterećenja definiran je frekvencijom i minimalnom, odnosno maksimalnom silom  $F_{min}$  odnosno  $F_{max}$  u svakom ciklusu, vidi sliku 17. Pri određivanju raspona cikličkih sila, cilj je bio simulirati radno opterećenje konstrukcije projektirane za opterećenje umorom na kojoj tijekom radnog vijeka ne bi se smjelo dogoditi nikakvo proklizavanje na spoju. Prema EN 1993-1-9 [33], dvostruki preklopni spoj s prednapetim vijcima velike čvrstoće ubraja se u kategoriju detalja 112, gdje je  $\Delta\sigma_c = 112$  MPa namijenjeno bruto površini presjeka spojne ploče. Dakle, ako je taj spoj opterećen ciklički i uzrokuje razliku naprezanja od  $\Delta\sigma_c = 112$  MPa u bruto presjeku čeličnih ploča, lom zbog umora dogodit će se nakon  $2 \cdot 10^6$  ciklusa. U eksperimentu je određen raspon cikličke sile (razlika između maksimalne i minimalne cikličke sile u svakom ciklusu) tako da granična razlika naprezanja u uzorku odgovara 75 % vrijednosti definirane kao granica za ovu kategoriju detalja -  $\Delta\sigma_c = 112$  MPa.

Dva ekstenzometra ugrađena su na svaki uzorak kako bi se registriralo potencijalno proklizavanje između ploča. Za ugradnju ekstenzometara projektiran je poseban uređaj koji je privremeno bio zalijepljen na bočnu stranu čeličnih ploča, omogućujući nadzor bilo kakvog diferencijalnog pomaka između čeličnih ploča. Korišten je HBM-ov ekstenzometar tipa DD1. Njegov opseg mjerenja je ± 2,5 mm, a njegova preciznost 0,5 % (0,0125 mm) mjernog područja - dovoljno da se registrira diferencijalni pomak čeličnih ploča većih od 0,15 mm, što je bio kriterij proklizavanja.

Neposredno prije stavljanja uzoraka u ispitni stroj za cikličko opterećenje izvršena su očitavanja naprezanja na mjernim uređajima ugrađenim u vijke i sila prednapinjanja  $F_p$  izračunana je u svakom vijku na sljedeći način:

$$F_p = a \cdot x(t_d) + b \quad (1)$$



Slika 17. Ciklički spektar opterećenja u eksperimentu

gdje su  $a$  i  $b$  koeficijenti kalibracijske krivulje vijaka,  $x(t_d)$  je deformacija na ugrađenom tenzometru na početku cikličkog ispitivanja, a  $t_d$  je trenutak početka cikličkog ispitivanja.

Na temelju izračunanih vrijednosti sile prednapinjanja, otpornost na proklizavanje vijaka,  $F_{s,Rd}^b$ , određuje se u skladu s izrazom (2):

$$F_{s,Rd}^b = \frac{k_s \cdot n \cdot \mu}{\gamma_{M3}} \cdot F_p \quad (2)$$

gdje je  $k_s = 1,0$  vrijednost koeficijenta za vijke u normalnim rupama,  $n = 2,0$  broj tarnih površina,  $\mu = 0,45$  procijenjena vrijednost faktora proklizavanja,  $\gamma_{M3} = 1,25$  parcijalni faktor.

Otpornost na proklizavanje uzorka,  $F_{s,Rd}^b$ , određuje se zbrajanjem otpornosti na proklizavanje pojedinih vijaka:

$$F_{s,Rd}^s = \sum F_{s,Rd}^b \quad (3)$$

Na temelju presjeka uzorka i razreda čvrstoće materijala, otpornost neto presjeka uzima se kao manja od dvije vrijednosti:

$$F_p = a \cdot x(t_d) + b \quad (4)$$

gdje je  $A$  površina bruto presjeka uzorka,  $A_{net}$  je površina neto presjeka uzorka,  $f_v$  je granica popuštanja materijala,  $f_u$  je vlačna čvrstoća materijala,  $\gamma_{M0} = 1,0$  je parcijalni faktor,  $\gamma_{M2} = 1,25$  je parcijalni faktor.

Kako bi se u potpunosti definirao spektar cikličkog opterećenja, osim njegove frekvencije, treba usvojiti maksimalnu i minimalnu cikličku silu. Jedno ograničenje je da se tijekom ispitivanja ne smije dogoditi proklizavanje. Stoga je maksimalna vrijednost cikličke sile definirana kao 80 % otpornosti na proklizavanje uzorka, kako slijedi:

$$F_{d,max,1} = 0,8 \cdot F_{s,Rd}^s \quad (5)$$

Iznimka od ovog pravila bili su najtanji uzorci, D3 i H3, gdje je mjerodavna otpornost neto presjeka. Maksimalna vrijednost cikličke sile definirana je kao 80 % otpornosti neto presjeka uzorka, kako bi se izbjeglo otkazivanje neto presjeka tijekom ispitivanja:

$$F_{d,max,2} = 0,8 \cdot N_{t,Rd} \quad (6)$$

Još jedno ograničenje bio je zahtjev da se tijekom cikličkog opterećenja ne smije dogoditi oštećenje uzoraka umorom. To ograničenje je u skladu s ograničavanjem promjene naprezanja u uzorku na 75 % vrijednosti definirane kao ograničenje za ovu kategoriju detalja, tj.  $\Delta\sigma_c = 112$  MPa:

$$\Delta F_d = 0,75 \cdot \Delta\sigma_c \cdot A \quad (7)$$

Na temelju predstavljenih ograničenja, minimalna ciklička sila bila je:



Tablica 7. Parametri spektra cikličkog opterećenja

Oznaka spoja	Oznaka vijka	$F_p$ [kN]	$F_{bs,Rd}$ [kN]	$F_{ss,Rd}$ [kN]	$N_{t,Rd}$ [kN]	$\Delta F_d$ [kN]	$F_{d,max}$ [kN]	$F_{d,min}$ [kN]
D3	D50C11	160,5	115,6	354,8	202,7	60	160	100
	D50C12	165,7	119,3					
	D50C13	166,6	119,9					
H3	H55C11	112,9	81,3	248,8	202,7	60	160	100
	H55C12	107,4	77,3					
	H55C13	125,3	90,2					
D6	D70C11	155,0	111,6	290,7	381,1	110	230	120
	D70C12	137,5	96,7					
	D70C13	118,5	82,4					
H6	H70C11	165,7	119,3	347,0	381,1	110	310	200
	H70C12	141,5	101,9					
	H70C13	174,7	125,8					
D9	D90C11	144,5	104,0	336,6	633,4	190	270	80
	D90C12	132,8	95,6					
	D90C13	190,3	137,0					
H9	H85C11	178,9	128,8	392,4	633,4	190	310	120
	H85C12	195,6	140,8					
	H85C13	170,6	122,8					

$$F_{d,min} = F_{d,max} - \Delta F_d \quad (8)$$

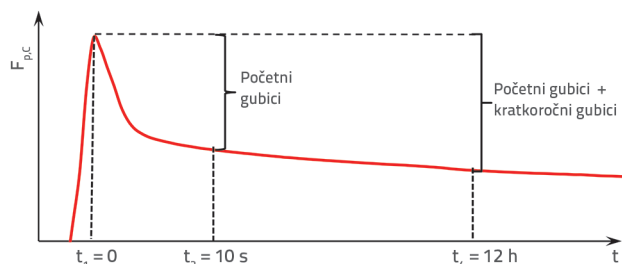
Tako dobivene granične vrijednosti cikličkog opterećenja iz praktičnih su razloga zaokružene na najbližih 10 kN. Spektar cikličkog opterećenja za svaki uzorak predstavljen je u tablici 7.

### 3. Eksperimentalni rezultati i rasprava

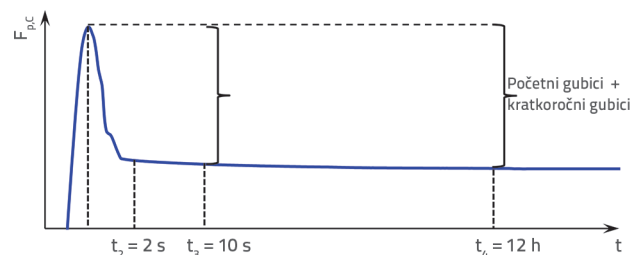
Tri referentne vremenske točke odabrane su za početne i kratkoročne gubitke prednapinjanja:  $t_1$  je vrijeme kada je postignuto maksimalno prednapinjanje u tijelu vijka; to je vrijeme od kojeg se mjeri gubitak prednapinjanja. Vrijeme  $t_3 = 10$  s je vrijeme kada se smatra da je početni gubitak prednapinjanja završio. Vrijeme  $t_4 = 12$  h je vrijeme kada se smatra da je kratkotrajni gubitak prednapinjanja završio. Uz to je uvedeno vrijeme  $t_2 = 2$  s za HBT vijke, što pokazuje vrijeme uklanjanja hidraulične preše s kraja vijka.

Grafički prikazi početnih i kratkoročnih gubitaka sile prednapinjanja  $F_{p,C}$  za HV i HBT predstavljeni su na slici 18, odnosno na slici 19.

Rezultati za HV i HBT vijke uzimajući u obzir svaku referentnu vremensku točku prikazani su u tablicama 8. i 9., gdje je  $F_{p,C,max}$  maksimalno prednapinjanje vijaka velike čvrstoće postignuto tijekom ugradnje;  $F_{p,C,t_i}$  je prednapinjanje vijka izmjereno u vremenu  $t_i$  nakon postizanja maksimalnog prednapinjanja;  $\Delta F_{p,C,t_i}$  je gubitak prednapinjanja u vremenu  $t_i$  nakon postizanja maksimalne vrijednosti prednapinjanja.



Slika 18. Početni i kratkoročni gubitak prednapinjanja u HV vijcima



Slika 19. Početni i kratkoročni gubitak prednapinjanja u HBT vijcima

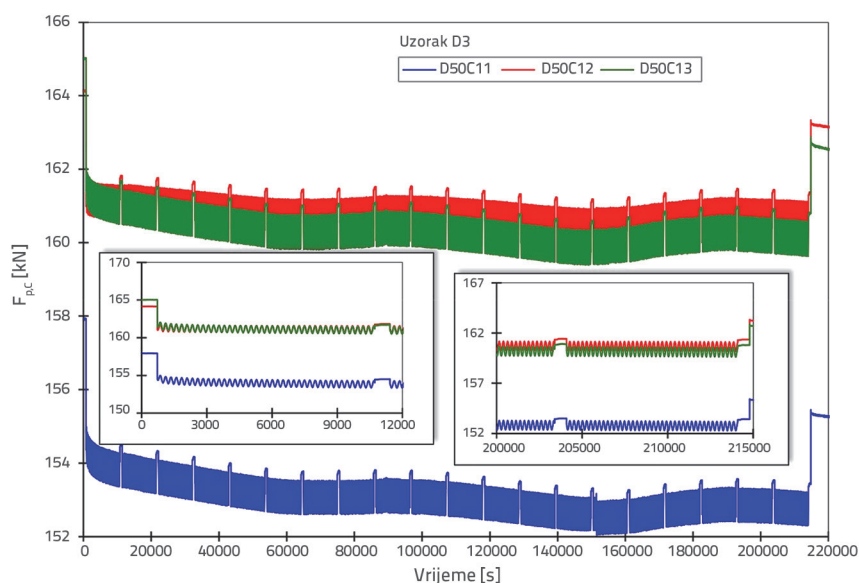
Osim toga kao primjer, slika 20 prikazuje promjenu prednapinjanja pod cikličkim opterećenjem za uzorak D3. Uvećani dijelovi dijagrama prikazuju jasno vidljivi početak i kraj cikličkog ispitivanja te vrijednost prednapinjanja prije i nakon cikličkog opterećenja.

**Tablica 8. Početni i kratkoročni gubici sile prednapinjanja u HV vijcima**

Oznaka uzorka / metoda ugradnje	Oznaka vijka	$F_{p,C,max}$ [kN]	$F_{p,C,t_3}$ [kN]	$F_{p,C,t_4}$ [kN]	$\Delta F_{p,C,t_3}$ [%]	$\Delta F_{p,C,t_4}$ [%]
			$t_3 = 10$ s	$t_4 = 12$ h		
D3 Kalibrirani ključ	D50C11	205,2	194,5	170,3	5,20	16,98
	D50C12	199,9	188,7	173,7	5,62	13,12
	D50C13	202,9	192,8	176,5	4,99	13,02
D6 Kalibrirani ključ	D70C11	194,3	187,1	174,1	3,70	10,41
	D70C12	193,0	183,6	169,3	4,84	12,28
	D70C13	185,7	179,5	166,1	3,38	10,55
D9 Kalibrirani ključ	D90C11	171,5	163,6	151,9	4,62	11,45
	D90C12	158,9	151,5	139,4	4,63	12,26
	D90C13	232,4	216,3	199,1	6,90	14,32

**Tablica 9. Početni i kratkoročni gubici sile prednapinjanja u HBT vijcima**

Oznaka uzorka	Oznaka vijka	$F_{p,C,max}$ [kN]	$F_{p,C,t_2}$ [kN]	$F_{p,C,t_3}$ [kN]	$F_{p,C,t_4}$ [kN]	$\Delta F_{p,C,t_2}$ [%]	$\Delta F_{p,C,t_3}$ [%]	$\Delta F_{p,C,t_4}$ [%]
			$t_2 = 2$ s	$t_3 = 10$ s	$t_4 = 12$ h			
H3	H55C11	223,8	135,4	131,7	120,7	39,50	41,15	46,07
H3	H55C12	223,1	128,6	124,7	113,5	42,36	44,11	49,11
H3	H55C13	240,6	146,1	141,9	131,4	39,28	41,02	45,37
H6	H70C11	246,1	188,8	179,8	171,9	23,28	26,94	30,14
H6	H70C12	218,1	159,0	156,3	147,2	27,10	28,34	32,50
H6	H70C13	247,3	194,1	191,4	182,4	21,51	22,60	26,24
H9	H85C11	240,0	194,5	192,3	183,9	18,96	19,88	23,36
H9	H85C12	240,6	190,6	188,4	185,1	20,78	21,70	23,06
H9	H85C13	233,9	186,4	184,4	176,1	20,31	21,16	24,71


**Slika 20. Promjena prednapinjanja u vijcima uzorka D3 tijekom cikličkog opterećenja**

Ključni eksperimentalni rezultati povezani s cikličkim ispitivanjem navedeni su u tablicama 10. i 11. za HV i HBT vijke, gdje je sljedeće:  $F_{p,C,d1}$  je sila prednapinjanja u vijku prije početka cikličkog ispitivanja;  $F_{p,C,d2}$  je sila prednapinjanja u vijku nakon završetka cikličkog ispitivanja;  $\Delta F_{p,C,d2}$  je razlika između  $F_{p,C,d2}$  i  $F_{p,C,d1}$ . Na temelju šest ispitanih uzoraka (18 vijaka) može se zaključiti da su gubici sile prednapinjanja manji od 1,5 %.

Ako se uzme u obzir mikroopadanje sile u zoni navoja vijaka (u slučaju HV vijaka) i na površini čeličnih ploča tijekom cikličkog opterećenja, tada utjecaj cikličkog opterećenja na gubitak sile prednapinjanja nije od velike važnosti. Tijekom cikličkog opterećenja uzoraka, ovisno o debljini čeličnih ploča i maksimalnoj vrijednosti cikličke sile,

Tablica 10. Gubici sile prednapinjanja u HV vijcima uzrokovani cikličkim opterećenjem

Oznaka uzorka	Oznaka vijka	$F_{p,c,d1}$ [kN]	$F_{p,c,d2}$ [kN]	$\Delta F_{p,c,d2}$ [%]	Srednja vrijednost [%]
D3	D50C11	157,9	155,3	1,69	1,26
	D50C12	164,1	163,2	0,60	
	D50C13	165,0	162,5	1,49	
D6	D70C11	154,5	154,5	0,00	0,13
	D70C12	135,3	135,2	0,09	
	D70C13	114,8	114,5	0,29	
D9	D90C11	144,7	141,9	1,93	1,36
	D90C12	132,6	130,7	1,41	
	D90C13	190,4	189,0	0,75	

Tablica 11. Gubici sile prednapinjanja u HBT vijcima uzrokovani cikličkim opterećenjem

Oznaka uzorka	Oznaka vijka	$F_{p,c,d1}$ [kN]	$F_{p,c,d2}$ [kN]	$\Delta F_{p,c,d2}$ [%]	Srednja vrijednost [%]
H3	H55C11	114,6	113,4	0,97	1,10
	H55C12	108,6	108,0	0,57	
	H55C13	127,6	125,4	1,77	
H6	H70C11	166,5	166,5	0,00	0,84
	H70C12	138,1	137,1	0,69	
	H70C13	174,1	170,9	1,84	
H9	H85C11	176,2	174,4	1,02	0,53
	H85C12	175,3	174,7	0,39	
	H85C13	171,8	171,6	0,17	

može doći do smanjenja sile prednapinjanja do 5 %. Međutim, to smanjenje je trenutačno (samo tijekom cikličkog opterećenja) i strogo je posljedica bočnog stezanja čeličnih ploča uzrokovano cikličkom silom koja djeluje na uzorke. Tijekom primijenjenog cikličkog opterećenja ne dolazi do popuštanja presjeka čeličnih ploča; dakle, po završetku cikličkog opterećenja dolazi do opuštanja čeličnih ploča u spoju. Dakle, sila prednapinjanja u vijcima praktički se vraća na početnu vrijednost.

U slučaju istraživanja C. Heistermanna [2], spektar cikličkog opterećenja definiran je tako da se sila postupno povećavala do loma uzorka. Lom uzoraka umorom dogodio se prije predviđenog broja ciklusa, tj. tijekom cikličkog opterećenja. Na temelju rezultata, mjereći silu prednapinjanja u vijcima, autor je zaključio da su gubici uzrokovani cikličkim opterećenjem u prosjeku 5,01 %. Ovaj se zaključak temelji na vrijednostima sile prednapinjanja izmjerenih neposredno prije loma uzoraka, što postavlja pitanje njegove pouzdanosti i točnosti. Naime, na taj se način zanemaruje činjenica da pod najvećom uzdužnom silom (definiranom spektrom cikličkog opterećenja), za ovaj fenomen, postoji vrlo značajna bočna kontrakcija čeličnih ploča uzorka. Da bi se dobila stvarna mjera gubitaka sile prednapinjanja, uzorci su trebali biti rasterećeni nakon svakih 50.000 ciklusa, omogućujući tako neutralizaciju elastičnih bočnih kontrakcija čeličnih ploča i mjerenje stvarne razine sile prednapinjanja u vijcima. Ova vrsta istraživanja može dovesti do pogrešnog zaključka o učincima cikličkog opterećenja na gubitke sile prednapinjanja, na temelju

njihovih vrijednosti neposredno prije loma, jer u tom slučaju nije moguće utvrditi koji je dio gubitka sile prednapinjanja posljedica bočnog stezanja čeličnih ploča u spoju.

#### 4. Zaključak

Gubitak sile prednapinjanja dogodio se u svim prednapetim vijcima bez obzira na njihovu duljinu, veličinu i površinsku obradu sklopa ploče. Postoji značajan broj utjecaja koji uzrokuju opuštanje vijaka, iako su za priključke na građevinskim konstrukcijama glavni razlozi opuštanja vijaka elastične interakcije, ugrađivanje, statičko i cikličko opterećenje i dugotrajno opuštanje ili puzanje.

Procjena utjecaja cikličkog opterećenja na gubitak sile prednapinjanja u visokovrijednom vijku (HV) i Lockbolt (HBT) izvedena je eksperimentalnim postupkom zasnovanim na pretpostavci da ograničenje razlike naprezanja u uzorku odgovara 75 % vrijednosti definirane kao ograničenje za kategoriju detalja 112 [33] (realni scenarij graničnog stanja uporabivosti tijekom trajanja konstrukcije).

Na temelju izvedenih eksperimenata koji uključuju raspon različitih parametara i savršeno poravnanje između ploča, dani su sljedeći zaključci:

Primjena cinkovog silikatnog premaza 'Resist 86' vrlo je učinkovita zaštita od korozije tarnih spojeva. Najbolji rezultati u pogledu faktora proklizavanja postignuti su ugradnjom



konstrukcijskih elemenata 7 do 10 dana nakon nanošenja premaza. Na taj se način postiže faktor proklizavanja  $0,45 \leq \mu \leq 0,50$  na tarnim površinama, što je dovoljno da se ti spojevi svrstaju u razrede hrapavosti A ili B prema EN 1993-1-8.

Postignuto maksimalno prednapinjanje tijekom instalacije prilično je konzistentno s koeficijentom varijacije od 4,6 % odnosno 10,8 % za HBT i HV vijke.

Veliki dio gubitaka prednapinjanja javlja se u prve dvije sekunde nakon ugradnje HBT vijaka i u prvih 10 sekundi nakon ugradnje HV vijaka. Gubici prednapinjanja iznose do 6,9 %, odnosno 42 % za HV i HBT vijke. Ti početni gubici prednapinjanja pretežno ovise o načinima ugradnje koji se razlikuju za te dvije vrste vijaka.

Dvanaest sati nakon ugradnje vijaka bilježe se kratkotrajni gubici prednapinjanja. Bez obzira na upotrijebljeni tip vijaka, utjecaj zaštite od korozije ploče na te gubitke zanemariv je za sve razmatrane debljine ploče.

Utjecaj cikličkog opterećenja, pri kojem nema popuštanja ili proklizavanja spojnih elemenata, na gubitak prednapinjanja u

HBT i HV vijcima može se zanemariti. Gubici sile prednapinjanja niži su od 1,5 %.

## Zahvala

Ovo istraživanje podupire Ministarstvo obrazovanja, znanosti i tehnološkog razvoja Srbije kroz projekt 200092. Autori su zahvalni tvrtkama i pojedincima koji su financijski i potrebnim materijalom podržali ovo istraživanje: "Alcoa Fastening Systems" (Telford, Engleska), "Amiga" (Kraljevo, Srbija), "Armort SP" (Beograd, Srbija), "Bata-Mat" (Beograd, Srbija), "Euris" (Beograd, Srbija), "INM" (Arlje, Srbija), "Johannes Steiner GmbH & Co." (Weningen, Njemačka), "Jotun" (Norveška), "Lim inženjering" (Beograd, Srbija), "Mašinoprojekt Koprivica" (Beograd, Srbija), "Modipack" (Požega, Srbija), "Mostogradnja" (Beograd, Srbija), "NB Celik" (Batajnica, Srbija), "PERI oplate" (Šimanovci, Srbija) RT Trans "(Beograd, Srbija) i" Xella Srbija "(Vreoci, Srbija).

## LITERATURA

- [1] Sedlacek, G., Kammel, C.: Zum Dauerverhalten von GV-Verbindungen in verzinkten Konstruktionen – Erfahrungen mit Vorspannkraftverlusten, Stahlbau, 70 (2001) 12, pp. 917–926.
- [2] Heistermann, C.: Behaviour of Pretensioned Bolts in Friction Connections. Licentiate Theses, Luleå University of Technology, 2011.
- [3] Abid, M., Khalil, M.S., Wajid, H.A.: An Experimental Study on the Relaxation of Bolts. IJUM Eng J, 16 (2015) 1, pp. 43–52.
- [4] Nassar, S.A., Shoberg, R.S.: Effect of Fastener Tightening Beyond Yield on the Behavior of Bolted Joints Under Service Loads, Proceeding of the 18th Annual Conference of the AMSE, Michigan State University, East Lansing, MI, pp. 1–17, 1992.
- [5] Bickford, J.H.: An introduction to the design and behaviour of bolted joints – 3rd edition, revised and expanded. New York: Marcel Dekker, 1995.
- [6] Yang, J., DeWolf, J.T.: Mathematical Model of Relaxation in High-Strength Bolted Connections. J Struct Eng, 125 (1999), pp. 803–809.
- [7] Fisher, J.W., Struik, J.H., Kulak, G.L.: Guide to design criteria for bolted and riveted joints. New York: Wiley, 1974.
- [8] Yang, J.: Relaxation of high-strength bolted connections with galvanized steel, MSc thesis, University of Connecticut, Storrs, CT, 1997.
- [9] DeWolf, J.T., Yang, J.: Relaxation in high-strength bolted connections with galvanized steel, Final report, Project 96-4, JHR 98-262 University of Connecticut, Storrs, CT, 1998.
- [10] Yang, J., DeWolf, J.T.: Relaxation in High-Strength Bolted Connections Using Galvanized Steel. J Bridge Eng 2000, 5(2):99–106.
- [11] Cruz, A., Simões, R., Alves, R.: Slip factor in slip resistant joints with high strength steel. J Constr Steel Res, 70 (2012), pp. 280–288.
- [12] Annan, C.D., Chiza, A.: Slip resistance of metalized-galvanized faying surfaces in steel bridge construction. J Constr Steel Res, 95 (2014), pp. 211–219.
- [13] Annan, C.D., Chiza, A.: Characterization of slip resistance of high strength bolted connections with zinc-based metallized faying surfaces. Eng Struct, 56 (2013), pp. 2187–2196.
- [14] Popovska, M., Petreski, B., Cvetanovski, P., Popovski, D.: Experimental procedure for slip factor determining at connections with preloaded bolts. e-GFOS 5, 8 (2014), pp. 37–43.
- [15] D'Aniello, M., Cassiano, D., Landolfo, R.: Monotonic and cyclic inelastic tensile response of European preloadable gr10.9 bolt assemblies, Journal of Constructional Steel Research, 124 (2016), pp. 77–90.
- [16] Cavallaro, G.F., Latour, M., Francavilla, A.B., Piluso, V., Rizzano, G.: Standardised friction damper bolt assemblies time-related relaxation and installed tension variability, Journal of Constructional Steel Research 141 (2018), pp. 145–155.
- [17] D'Antimo, M., Latour, M., Cavallaro, G.F., Jaspert, J.P., Ramhormozian, S., Demonceau, J.F.: Short- and long- term loss of preloading in slotted bolted connections, Journal of Constructional Steel Research, 167 (2020), pp. 105956.
- [18] Li, D., Uy, B., Wang, J., Song, Y.: Behaviour and design of high-strength Grade 12.9 bolts under combined tension and shear, Journal of Constructional Steel Research, 174 (2020), pp. 106305.
- [19] Jovanović, Đ.: Behaviour of end-plate moment connections with four bolts per row, PhD thesis, University of Novi Sad, Faculty of technical sciences, 2020.
- [20] Jovanović, Đ., Mitrović, N., Marković, Z., Vilotić, D., Kosić, B.: Experimental and Numerical Investigation of the T-Stub Elements with Four Bolts in a Row Until Bolt Fracture, Proceedings of the International Conference of Experimental and Numerical Investigations and New Technologies, CNNTech 2019, pp. 305–322.
- [21] Stranghöner, N., Jungbluth, D., Abraham, C., Söderman, A.: Tightening behaviour of preloaded stainless steel bolting assemblies. Steel Constr, 10 (2017) 4, pp. 319–332.

- [22] Fric, N.: Theoretical and experimental research of losses of pretension force in high strength bolts, doctoral thesis, University of Belgrade Faculty of civil engineering, 2015.
- [23] EN1993-1-8 - Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-8: Design of Joints, Brussels, CEN, 2005.
- [24] EN 14399-4. High strength structural bolting for preloading - Part 4: System HV -Hexagon bolt and nut assemblies, Brussels, CEN, 2015.
- [25] EN ISO 898-1. Mechanical properties of fasteners made of carbon steel and alloy steel — Part 1: Bolts, screws and studs with specified property classes — Coarse thread and fine pitch thread. Brussels, CEN, 2009.
- [26] EN ISO 6892-1. Metallic materials – Tensile testing. Part 1: Method of test at room temperature. Brussels, CEN, 2009.
- [27] EN 1090-2. Execution of steel structures and aluminium structures – Part 2: Technical requirements for steel structures, Brussels, CEN, 2008.
- [28] EN ISO 16047. Fasteners - Torque/clamp force testing. Brussels, CEN, 2005.
- [29] ISO 8501-1. Preparation of steel substrates before application of paints and related products — Visual assessment of surface cleanliness — Part 1: Rust grades and preparation grades of uncoated steel substrates and of steel substrates after overall removal of previous coatings, International organization for standardization, Brussels, CEN, 2007.
- [30] EN 14399-4:2005: High-strength structural bolting assemblies for preloading - Part 4: System HV - Hexagon bolt and nut assemblies, Brussels, CEN, 2015.
- [31] Husson, W.: Friction Connections with Slotted Holes for Wind Towers. Licentiate Theses, Luleå University of Technology, 2008.
- [32] Schließringbolzensysteme - Berechnung von Verbindungen nach Eurocode 3 und VDI 2230, DVS-Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren e. V. und EFB-Europäische Forschungsgesellschaft für Blechverarbeitung e. V., 2016.
- [33] EN 1993-1-9: 2005, Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-9: Fatigue, Brussels, CEN, 2005.