

Priključci s vijcima u navojnim rupama izrađenim u čeličnim elementima standardne i visoke čvrstoće

Marko Ptiček¹, Davor Skejić²

¹O.G. Design and Consulting d.o.o., marko.pticek@gmail.com

²Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, davor.skejic@grad.unizg.hr

Sažetak

Druga generacija Eurokoda za projektiranje priključaka čeličnih konstrukcija sadrži odredbe za primjenu vijaka u navojnim rupama, uključujući zahtjeve za minimalnu duljinu prihvata navoja. Kao specifična vrsta slijepih vijaka, vijci u navojnim rupama postaju praktički jedini vijčani sustav obuhvaćen normama za projektiranje čeličnih konstrukcija bez standardizirane matice. Rad donosi pregled istraživanja priključaka s vijcima u navojnim rupama s posebnim naglaskom na minimalnu duljinu prihvata navoja i ograničenja koja proizlaze za primjenu čelika visoke čvrstoće.

Ključne riječi: EN 1993-1-8, vijci u navojnim rupama, duljina prihvata navoja, čelik visoke čvrstoće

Joints with bolts in tapped holes made in standard and high-strength steel members

Abstract

The second generation of Eurocode for design of steel joints includes provisions for bolts in tapped holes (BTH), including requirements for minimum thread engagement length. As a specific form of blind bolting, BTH will thus become practically the only bolting system covered by steel design provisions that does not use a standardised nut. The paper reviews research on BTH joints, with particular emphasis on minimum thread engagement length and the resulting limitations for the use of high-strength steel.

Key words: EN 1993-1-8, bolts in tapped holes, thread engagement length, high-strength steel

1 Uvod

Cijevni čelični stupovi su u usporedbi sa stupovima otvorenih presjeka (I profili i H profili) superiorni po pitanju torzijske krutosti, posjeduju veće momente tromosti te se njihovom primjenom ostvaruje veća vitkost stupova, odnosno arhitektonska vizura prostora. Osim toga, upotrebom cijevnih stupova ostvaruje se bolji omjer nosivosti konstrukcije i utroška materijala, a u slučaju izvedbe cijevnih stupova ispunjenih betonom, njihovu nosivost i vatrootpornost moguće je dodatno poboljšati. Još jedan argument za odabir cijevnih profila za stupove je i njihova estetika. Bez obzira na navedene prednosti, potencijal primjene cijevnih profila nije u potpunosti iskorišten zbog kompleksnije izvedbe priključaka, tj. nemogućnosti pristupa unutrašnjosti cijevi za ugradnju standardnih vijaka kod priključaka nosač-stup s čeonim pločama [1, 2].

Priključci s čeonim pločama lako su primjenjivi za spajanja čeličnih nosača na stupove otvorenog H-profila jer otvoreni presjek stupa omogućuje nesmetan pristup za ugradnju vijčanih sklopova te se vijčani spoj lako ostvaruje preko pojasnice stupa. U slučaju cijevnih stupova, vijčani se sklop ne može ugraditi zbog nemogućnosti pristupa unutrašnjosti stupa.

Alternativa je otvaranje privremene rupe na licu stupa za pristup vijcima s unutarnje strane ili različita rješenja koja uključuju zavarivanje na lice stupa, npr. segment zavarene grede ili ekvivalentne zavarene ploče. Međutim, rješenja koja uključuju naknadno zavarivanje dovode do povećanja troškova, a izgledno i u mnogim slučajevima nužno zavarivanje u blizini rubova hladno oblikovanih cijevnih profila smanjuje duktilnost te povećava rizik od krtog loma [1].

Slijepi vijci su konstrukcijska spojna sredstva koja se koriste kada je pristup moguć samo s jedne strane te su kao takvi alternativa za spajanje greda s čeonim pločama na cijevne stupove jer ih je moguće ugraditi i zategnuti s vanjske strane stupa, tj. bez potrebe za pristupom unutrašnjosti cijevi za ugradnju matice. Na temelju ovog principa, standardne vijke moguće je koristiti kao specifičan tip slijepih vijaka i ugraditi ih s vanjske strane cijevnog stupa izravno u rupu s izvedbenim navojima. Navoji urezani po plaštu unutrašnjosti rupe direktno 'sidre' vijke bez matica koje se koriste u standardnim vijčanim sklopovima. Stoga se ovakva vrsta vijčanih sklopova naziva vijci u navojnim rupama (engl. *Bolts in Tapped Holes* - BTH).

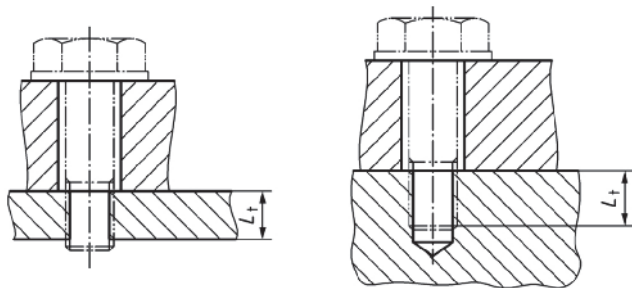
Cilj ovog rada je pregled dosadašnjih istraživanja i spoznaja o BTH priključcima, s naglaskom na problematiku minimalne duljine prihvata navoja i ograničenja koja iz toga proizlaze za primjenu čelika visoke čvrstoće. Rad je po svojoj prirodi pregledan te predstavlja polazište i teorijsku podlogu za šire istraživanje priključaka s vijcima u navojnim rupama koje obuhvaća eksperimentalna, numerička i probabilistička ispitivanja.

2 Vijci u navojnim rupama

Općenito, slijepi vijci nisu standardizirani niti obuhvaćeni u aktualnoj europskoj normi za projektiranje priključaka čeličnih konstrukcija EN 1993-1-8 [3]. Trenutno je u primjeni nekoliko komercijalnih sustava slijepih vijaka, kao što su Hollo-bolt, Extended Hollo-bolt, Ajax ONESIDE, Molabolt, BOM fastener, Blind Bolt i Huck Bolt. Detaljan pregled navedenih sustava slijepih vijaka dan je u [4].

U sklopu razvoja druge generacije norme Eurokod 3, zahtjevi za primjenu vijaka u navojnim rupama dani su u novoj verziji norme Eurokod 3, dio 1-8: FprEN 1993-1-8 [5]. Na taj će način, za razliku od mnogih komercijalnih proizvoda iz područja slijepih vijaka koji su pokriveni tehničkim specifikacijama proizvođača, BTH biti praktički jedini normirani vijčani sustav bez standardne matice.

BTH priključci mogu se podijeliti u dvije skupine s obzirom na vrstu navojne rupe: (i) prolazna navojna rupa i (ii) slijepa navojna rupa, Slika 1. Navoji se izrađuju jednim od dva postupka: urezivanjem ili valjanjem (utiskivanjem) navoja. Urezivanje navoja je postupak pri kojemu se materijal odstranjuje iz rupe pomoću alata oblikovanih za izradu konačnog navoja u predviđenoj geometriji. Valjanje navoja provodi se bez odstranjivanja materijala, već njegovim utiskivanjem, odnosno njegovom preraspodjelom i plastičnim oblikovanjem unutar provrta rupe.



Slika 1. Vijci u navojnim rupama: prolazna navojna rupa (lijevo) i slijepa navojna rupa (desno) [5]

3 Minimalna duljina prihvata navoja

Najzanimljivija novost u novom FprEN [5], i najvažnija za ovu temu, jest definicija minimalne duljine prihvata navoja. Teorijska pozadina minimalne duljine prihvata navoja temelji se na radu Alexandra [6] koji je za sklopove vijaka i matica izloženih vlačnom opterećenju definirao model za proračun tri moguća načina otkazivanja: (i) lom vijka, (ii) kidanje vanjskih navoja (navoji na vijku) i (iii) kidanje unutarnjih navoja (navoji u matici, odnosno navoja urezanih po unutrašnjosti rupe). U standardnim vijčanim sklopovima potrebna je adekvatna duljina prihvata navoja kako bi se osiguralo otkazivanje preko loma vijka umjesto kidanja unutarnjeg ili

vanjskog navoja. Lom vijka duktilniji je i uočljiviji način otkazivanja u usporedbi s kidanjem navoja, a samim time i poželjniji. Omjer otpornosti dvaju materijala spojenih navoja definira način kidanja navoja uslijed vlačnog djelovanja na vijčani spoj: ako nosivost vanjskih navoja premašuje nosivost unutarnjih navoja, način otkazivanja biti će kidanje unutarnjih navoja (navoja u matici, odnosno u navojnoj rupi) i obrnuto.

U praksi duljina prihvata navoja općenito je jednaka visini standardne matice, čime je osiguran uvjet minimalne duljine prihvata navoja te *a priori* izbjegnuto otkazivanje navoja. Vijčani sklopovi proizvedeni u skladu s normama ISO 898-1 [7] i ISO 898-2 [8] ne bi trebali otkazati kidanjem navoja, tj. takav vijčani sklop ima punu nosivost i otkazuje preko tijela vijka. U slučaju BTH, duljina prihvata navoja jednaka je dubini rupe s urezanim navojima. Štoviše, materijal navojne rupe identičan je materijalu okolne čelične ploče, za razliku od unutarnjih navoja urezanih u maticu koja je izrađena od čelika visoke čvrstoće. Stoga je definicija minimalne duljine prihvata navoja najvažniji parametar za standardizaciju BTH.

Minimalna duljina prihvata navoja razmatrana je u normi VDI 2230 [9], s danim smjernicama za proračun otpornosti navoja. Rodier [10] je izveo izraze za minimalnu duljinu prihvata navoja uzimajući u obzir mogućnost otkazivanja unutar-njeg i vanjskog navoja, pri čemu ni kidanje vanjskih ni unutarnjih navoja ne smije biti mjerodavni način otkazivanja:

$$\min \{F_{bs,Rd}; F_{ns,Rd}\} \geq F_{t,Rd} \quad (1)$$

gdje je $F_{bs,Rd}$ otpornost na kidanje vanjskih (vijčanih) navoja, $F_{ns,Rd}$ otpornost na kidanje unutarnjih navoja (navojna rupa) i $F_{t,Rd}$ vlačna otpornost vijka. Na temelju navedenog uvjeta, Rodier [10] je predložio izraz za minimalnu duljinu prihvata navoja L_t za prolaznu navojnu rupu:

$$L_t \geq \max \{1,0 \cdot d; 0,45 \cdot d \cdot (2/3 + f_{ub}/f_u)\} \quad (2)$$

gdje je d nominalni promjer navoja vijka, f_{ub} vlačna čvrstoća vijka i f_u vlačna čvrstoća čelika navojne rupe.

Minimalne duljine prihvata navoja prema FprEN 1993-1-8 [5] definirane su izravno prema klasi čelika, čime je omogućena jednostavna primjena u inženjerskoj praksi, a prikazane su u Tablici 1. Vrijednosti dane u Tablici 1 slične su rezultatima dobivenim iz izraza (2), ali konzervativnije. Posebno je uočljivo da su sve klase čelika visoke čvrstoće iznad S460 objedinjene u jedinstven zahtjev prema klasi vijka, čime se onemogućuje puno iskorištenje mehaničkih svojstava HSS čelika.

Tablica 1. Minimalne duljine prihvata navoja L_t/d prema FprEN 1993-1-8 [5]

Klasa vijaka	Lt /d za klasu čelika			
	S235	S275	S355	≥ S460
4.6	1,00	1,00	1,00	1,00
5.6	1,02	1,00	1,00	1,00
8.8	1,34	1,23	1,11	1,06
10.9	1,58	1,43	1,26	1,19

4 Pregled dosadašnjih istraživanja

Istraživanje BTH priključaka u kontekstu konstruktivnih čeličnih konstrukcija u novije je vrijeme pokrenuto eksperimentalnim ispitivanjima vlačno opterećenih T-komada spojenih pomoću BTH. Grupa autora [11-13] provela je niz eksperimentalnih i numeričkih analiza vlačno opterećenih T-komada spojenih pomoću BTH. Osim što su praktični za provođenje eksperimentalnih ispitivanja, T-komadi su već integralni dio norme Eurokod 3 [3] kao metoda za projektiranje vijčanih spojeva, a spomenuti autori su predložili dva dodatna načina otkazivanja vlačno opterećenih T-komada koja uključuju otkazivanje navoja. Fokus radova [11-13] bio je na T-komadima i načinima otkazivanja za koje su predloženi analitički izrazi, čime je prikazana mogućnost primjene BTH na vijčane spojeve, međutim, minimalna duljina prihvata navoja i praktična primjena vijaka u navojnim rupama nije obrađena.

Latour i Rizzano [14] razvili su numeričke modele i proveli parametarske analize s ciljem definiranja proračunskih pravila za BTH priključke u vlačnom i posmičnom smjeru, uključujući prijedlog izraza za minimalnu duljinu prihvata navoja. Kao rezultat analize, predložena su dva izraza: konzervativniji za projektantsku praksu i manje konzervativni koji daje rezultate slične Rodierovim [10].

Ptiček et al. [2] dali su detaljnu analizu i usporedbu dostupnih odredbi za minimalnu duljinu prihvata navoja, uključujući grafičku usporedbu prema FprEN 1993-1-8 [5], Rodieru [10] i VDI 2230 [9], te je istražena mogućnost praktične primjene BTH u priključcima nosača i cijevnih stupova s čeonim pločama. Pokazano je da zahtjeve za duljinu prihvata navoja dane u FprEN 1993-1-8 [5] zadovoljava samo 8% razmatranih kombinacija parametara, dok uvjete prema Rodieru [10] zadovoljava 11% kombinacija – i to isključivo stupovi s najvećim debljinama stijenki (12,5 i 16 mm) i vijcima najmanjeg promjera (M12 i M16). Objedinjavanjem svih razreda HSS čelika u jedinstven zahtjev prema FprEN [5] onemogućuje se iskorištenje punog potencijala mehaničkih svojstava čelika visoke čvrstoće.

U nastavku istraživanja, Ptiček et al. [15] proveli su analitičku i numeričku para-

metarsku analizu vlačno opterećenih T-komada spojenih pomoću BTH kako bi se jasnije istražila razlika između dostupnih zahtjeva za minimalnu duljinu prihvata navoja. Za numeričku analizu odabrane su konfiguracije T-komada koje ispunjavaju uvjete minimalne duljine prihvata navoja sukladno Rodieru [10], a istovremeno ne ispunjavaju strože zahtjeve FprEN 1993-1-8 [5]. Sve konfiguracije T-komada otkazale su lomom vijka. Pokazalo se da analitičke proračunske vrijednosti podcjenjuju krajnju otpornost u svim razmatranim slučajevima, uključujući i HSS čelike, čime je ukazano na postojanje određenih rezervi otpornosti u razmotrenim konfiguracijama, a samim time i u odredbama FprEN 1993-1-8 [5].

5 Zaključak

U radu su predstavljeni osnovni principi primjene priključaka s vijcima u navojnim rupama, pregled dostupnih odredbi za minimalnu duljinu prihvata navoja te kronološki pregled dosadašnjih istraživanja s naglaskom na ograničenja koja proizlaze iz odredbi FprEN 1993-1-8 [5] za primjenu čelika visoke čvrstoće.

Na temelju predstavljene literature može se jasno utvrditi da još uvijek postoji manjak spoznaja o ponašanju spojeva s vijcima u navojnim rupama. Odredbe za minimalnu duljinu prihvata navoja definirane u FprEN 1993-1-8 [5] procijenjene su kao prestroge, što rezultira značajnim smanjenjem mogućnosti praktične primjene BTH. Osim toga, industrija proizvodnje čelika visoke čvrstoće značajno napreduje po pitanju tehnologije i tehničkih karakteristika, a cijevni profili od HSS čelika kao takvi idealni su za primjenu BTH. Međutim, odredbe FprEN 1993-1-8 [5] onemogućuju potpuno iskorištenje prednosti HSS čelika prilikom primjene BTH.

Navedenu je problematiku potrebno detaljnije istražiti i potvrditi provedbom laboratorijskih ispitivanja vlačno opterećenih T-komada spojenih vijcima u navojnim rupama izrađenim u čeličnim limovima i cijevnim profilima standardne i visoke čvrstoće. Dobiveni rezultati, uključujući i sveobuhvatnu parametarsku numeričku analizu, omogućit će probabilističko vrednovanje smjernica za proračun spojeva s vijcima u navojnim rupama danih u FprEN 1993-1-8 [5]. Na osnovi provedenog istraživanja, bit će moguće predložiti probabilistički utemeljena pravila za proračun spojeva s vijcima u navojnim rupama s obzirom na uvjete minimalne duljine prihvata navoja, koja će omogućiti primjenu čelika visokih čvrstoća.

Literatura

- [1] Y. Kurobane, J. Packer, J. Wardenier i N. Yeomans, Design Guide for Structural Hollow Section Column Connections, CIDECT Design Guide 9, 2004.

- [2] M. Ptiček, D. Skejić, M. Veljković and G. Rizzano: Structural steel joints with bolts in threaded holes, *Technical Gazette*, vol. 29, no. 4, pp. 1382-1393, 2022.
- [3] European Committee for Standardization (ECS): EN1993-1-8. Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-8: Design of joints, 2005.
- [4] A. Javora and D. Skejić: Resistance assessment of beam-to-column joints with different blind bolt systems, *Technical Gazette*, vol. 24, no. 4, pp. 1103-1112, 2017.
- [5] European Committee for Standardization (ECS): FprEN 1993-1-8. Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-8: Joints, 2023.
- [6] E. M. Alexander: Analysis and Design of Threaded Assemblies, SAE Technical Paper 770420, 1977.
- [7] ISO 898-1:2013, 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, ISO, 2013.
- [8] ISO 898-2:2012, Mechanical properties of fasteners made of carbon steel and alloy steel — Part 2: Nuts with specified property classes — Coarse thread and fine pitch thread, ISO, 2012.
- [9] VDI 2230 Part 1, Systematic calculation of highly stressed bolted joints – Joints with one cylindrical bolt, Verein Deutscher Ingenieure, 2015.
- [10] A. Rodier: Résistance d'un taraudage à l'arrachement, *Revue Construction Métallique*, br. 4, 2016.
- [11] X. Zhu, P. Wang, M. Liu, W. Tuoya i S. Hu: Behaviors of one-side bolted T-stub through thread holes under tension strengthened with backing plate, *Journal of Constructional Steel Research*, svez. 134, p. 53–65, 2017.
- [12] M. Liu, X. Zhu, P. Wang, W. Tuoya i S. Hu: Tension strength and design method for thread-fixed one-side bolted T-stub, *Engineering Structures*, svez. 150, p. 918–933, 2017.
- [13] T. Wulan, P. Wang, Y. Li, Y. You i F. Tang: Numerical investigation on strength and failure modes of thread-fixed one-side bolted T-stubs under tension, *Engineering Structures*, svez. 169, p. 15–36, 2018.
- [14] M. Latour and G. Rizzano: Numerical study on the resistance of thread-fixed one-side bolts: Tensile and bearing strength, *Structures*, vol. 32, pp. 958-972, 2021.
- [15] M. Ptiček, D. Skejić, M. Latour i G. Rizzano: Numerical Study on Behaviour of T-stubs with Bolts in Tapped Holes, *ce/papers*, svez. 6, br. 3-4, pp. 1244-1249, 2023.