

NOSIVOST T-SPOJA SA SAMONAREZNIM VIJCIMA U TANKOSTJENIM C-PROFILIMA

LOAD-BEARING CAPACITY OF T-JOINTS WITH SELF-TAPPING SCREWS IN THIN-WALLED C- PROFILE

Paulina Krolo*, Josip Malčić, Lazar Lukačević*****

Sažetak

U ovom radu istražuje se mehaničko ponašanje T-spojeva izrađenih od hladnooblikovanih čeličnih C-profila spojenih samonareznim vijcima, s posebnim naglaskom na utjecaj debljine profila i načina izvedbe otvora na nosivost spoja. Analizirani su spojevi s dvije debljine limova, 0,95 mm i 1,15 mm, te dvije varijante otvora – bez ojačanja i s ojačanjem postignutim plastičnim oblikovanjem. Numeričke simulacije provedene su u programu ABAQUS, a valjanost modela potvrđena je usporedbom s relevantnim rezultatima iz literature. Rezultati pokazuju da povećanje debljine limova za približno 21 % rezultira povećanjem maksimalne nosivosti spoja za 15,2 %, ali i promjenom oblika otkazivanja, pri čemu se kritično mjesto otkazivanja premjestilo s čeličnih profila na vijak. Uvođenje ojačanja otvora značajno poboljšava raspodjelu naprezanja i smanjuje lokalne deformacije oko vijčanih rupa. Kod tanjih profila, ojačanje dovodi do povećanja nosivosti za 19,8 %, dok je kod debljih limova porast nosivosti znatno izraženiji, čak 46,7 %. Ojačanje otvora time povećava otpornost spoja na lokalne deformacije i omogućuje bolje iskorištenje kapaciteta čeličnih profila bez prekoračenja njihove granice popuštanja. Pravilan odabir debljine limova, kvalitete vijaka i izvedbe otvora pokazuje se ključnim za osiguranje optimalne nosivosti i sigurnosti T-spojeva u tankostjenim čeličnim konstrukcijama. Dobiveni rezultati predstavljaju vrijedan doprinos razumijevanju ponašanja i optimizaciji spojeva u suvremenim konstrukcijama hladnooblikovanih elemenata.

* Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet, Radmile Matejčić 3, 51000 Rijeka

E-mail: paulina.krolo@gradri.uniri.hr

** Koning Projekt d.o.o., Spinčićeve 4, 52100 Pula

E-mail: josip.malcic@koning-projekt.hr; malcicjosip6@gmail.com

*** I.T.T. d.o.o., Moše Albaharija 10a

E-mail: llukacevic@student.uniri.hr; lazar@itt.hr

Ključne riječi: jednorezni vijčani spoj, hladno oblikovani čelik, samonarezni vijak, tankostjeni C-profil, ABAQUS

Abstract

This paper investigates the mechanical behaviour of T-joints made from cold-formed steel C-profiles connected with self-tapping screws, with a particular emphasis on the influence of profile thickness and hole design on the joint's load-bearing capacity. Joints with two sheet thicknesses, 0.95 mm and 1.15 mm, as well as two hole variants, without reinforcement and with reinforcement, achieved by plastic forming, were analysed. Numerical simulations were performed using ABAQUS software, and the validity of the models was confirmed by comparison with relevant results from the literature. The results show that increasing the sheet thickness by approximately 21% results in a 15.2% increase in the maximum load capacity of the joint, accompanied by a change in the failure mechanism, where the critical failure location shifts from the steel profiles to the screw. Introducing hole reinforcement significantly improves stress distribution and reduces local deformations around the screw holes. For thinner profiles, reinforcement leads to a 19.8% increase in load capacity, while for thicker sheets, the increase is considerably more pronounced, reaching 46.7%. Thus, hole reinforcement enhances the joint's resistance to local deformations and enables better utilization of the steel profiles' capacity without exceeding their yield limit. Proper selection of sheet thickness, screw quality, and hole design proves crucial to ensuring optimal load capacity and safety of T-joints in thin-walled steel structures. The obtained results provide a valuable contribution to the understanding and optimization of joints in modern cold-formed steel constructions.

Key words: single-thread bolted connection, cold-formed steel, self-tapping screw, thin-walled C-profile, ABAQUS

1. Uvod

Konstrukcije izrađene od hladno oblikovanih čeličnih profila (Cold-Formed Steel – CFS) imaju sve intenzivniju primjenu tijekom posljednja dva desetljeća zahvaljujući prednostima koje pružaju industrijska proizvodnja i modularna izgradnja [1]. Ovi sustavi imaju niz prednosti, uključujući malu vlastitu težinu, visoku razinu kvalitete proizvoda postignutu u kontroliranim uvjetima proizvodnje, kao i jednostavan transport i montažu te ubranu izgradnju. Zbog toga su prepoznati kao konkurentna alternativa tradicionalnim zidanim i armiranobetonskim konstrukcijama. Budući da su elementi izrađeni od CFS-a znatno lakši i tanji od konvencionalnih građevinskih elemenata, omogućuju smanjenje ukupne mase konstrukcije, ali i smanjenje bruto grijanog volumena zgrade za istu neto površinu poda. Time se postiže energetska učinkovitost i

smanjuje ugljični otisak zgrade, što je osobito važno u kontekstu održive gradnje i europskih klimatskih ciljeva [2].

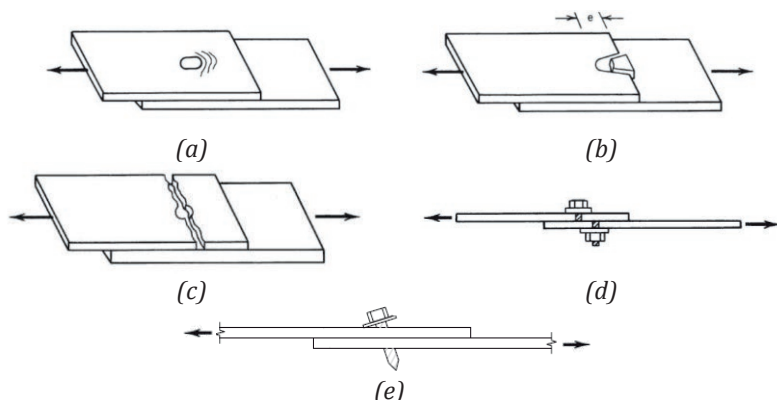
Primjena CFS konstrukcija ima veliki potencijal u europskim zemljama, osobito u gradnji niskih zgrada kao što su obiteljske kuće i višestambeni objekti. Ovi sustavi posebno su pogodni za izradu zidnih i stropnih elemenata u montažnim zgradama, koje postaju sve važnije kako se građevinska industrija sve više oslanja na industrijalizirane procese, potaknuta zahtjevima modernog društva za bržom, učinkovitijom i održivijom gradnjom. Posljednjih godina, predgotovljeni paneli izrađeni od LSF konstrukcija, ispunjeni laganim izolacijskim materijalima i obloženi različitim vrstama ploča, pojavili su se kao relativno novi proizvod u građevinskoj industriji. Takvi elementi se u potpunosti izrađuju u tvorničkim uvjetima, a zatim transportiraju i montiraju na gradilištu, što omogućuje visoku razinu kontrole kvalitete, smanjenje vremena izgradnje i veću predvidljivost troškova [3].

Unatoč navedenim prednostima, spojevi profila izrađenih od CFS-a i dalje predstavljaju značajan konstruktivni i istraživački izazov. U praksi se primjenjuju različiti načini spajanja poput zavarivanja, zakivanja te spajanje matičnim i samobušecim vijcima, slijepim zakovicama i dr. [4,5]. Gotovo sva mehanička spojna sredstva mogu se koristiti za spajanje CFS-profila, pri čemu je svaka vrsta spajala prikladna za specifične kombinacije elemenata koji se međusobno spajaju [6].

Vijci s maticama ugrađuju se u prethodno izbušene rupe u čeličnim profilima. Najčešće korišteni promjeri vijaka kreću se u rasponu od M5 do M16, pri čemu se preporučuje uporaba vijaka razreda čvrstoće 8.8 ili 10.9. Zakovice se također postavljaju u prethodno izrađene rupe. U suvremenoj praksi se sve češće primjenjuju pop-zakovice koje pripadaju kategoriji slijepih zakovica, a postupak spajanja izvodi se ručno ili strojno. Kod spajanja tankostjenih profila, uz standardne vijke s maticama i zakovice, često se koriste i samobušeci te samonarezni vijci. Osnovna razlika između njih ogleda se u načinu ugradnje: samonarezni vijci zahtijevaju prethodno izbušenu rupu, dok samobušeci vijci imaju svrdlo na vrhu vijka, što omogućuje bušenje i pričvršćivanje u jednom koraku [6].

Mehanički spojevi, bilo izvedeni vijcima s maticama, zakovicama, samobušecim ili samonareznim vijcima, podložni su sličnim oblicima otkazivanja. Pod djelovanjem posmičnih sila, limovi najčešće otkazuju zbog deformiranja materijala u području rupe uslijed prekoračenja granice popuštanja čelika (Slika 1a), sloma rubnog dijela lima (Slika 1b), kidanja u neto presjeku (Slika 1c) te posmičnog sloma spajala (Slika 1d) [4]. Dodatno, osobito u spojevima s tankostjenim elementima, značajan oblik otkazivanja predstavlja i otkazivanje uslijed naginjanja vijka (engl. *tilting*)

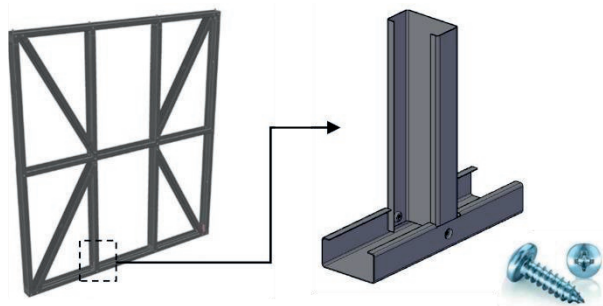
bez ili uz istovremeno lokalno popuštanje materijala oko otvora, pri čemu dolazi do prekomjernog rotacijskog pomaka vijka u otvoru uz djelomični ili potpuni gubitak nosivosti spoja (Slika 1e) [5]. Posljedica takvih oblika otkazivanja je smanjena krutost i duktilnost spoja, što može imati negativan utjecaj na globalnu krutost i duktilnost cijele konstrukcije.



Slika 1. Oblici otkazivanja posmično opterećenih tankih limova spojenih vijkom: (a) pritisak po omotaču rupe, (b) sloma rubnog dijela lima, (c) kidanje neto presjeka i (d) posmični slom spajala [7] i (e) naginjanje vijka [8]

U radu je prikazano istraživanje ponašanja spojeva između ortogonalno spojenih C-profila, tzv. T-spoja, izloženih djelovanju posmičnih sila. T-spoj se koristi za spajanje C-profila unutar sustava CFS okvira (Slika 2). C-profilu spojeni su samonareznim vijcima na pojasnicama profila. U istraživanju su analizirani učinci dviju debljina limova C-profila (0,95 mm i 1,15 mm) te dva načina izvedbe rupe za vijak: sa standardnim rupama bez ojačanja i rupama s ojačanjem dobivenim plastičnim oblikovanjem limova (Slika 3). Ponašanje spojeva evaluirano je numeričkim simulacijama provedenima u programu ABAQUS [9]. Numerički model potvrđen je usporedbom s rezultatima laboratorijskih ispitivanja iz literature [10].

Cilj ovog istraživanja je utvrditi preliminarne vrijednosti nosivosti i karakteristične oblike otkazivanja T-spojeva izrađenih od hladno oblikovanih čeličnih profila, a kako bi se stekao uvid u njihovo mehaničko ponašanje. Dobiveni rezultati poslužiti će kao temelj za planiranje i optimizaciju eksperimentalnih ispitivanja u laboratorijskim uvjetima, s ciljem validacije numeričkih modela i daljnjeg unaprjeđenja konstrukcijskih rješenja.

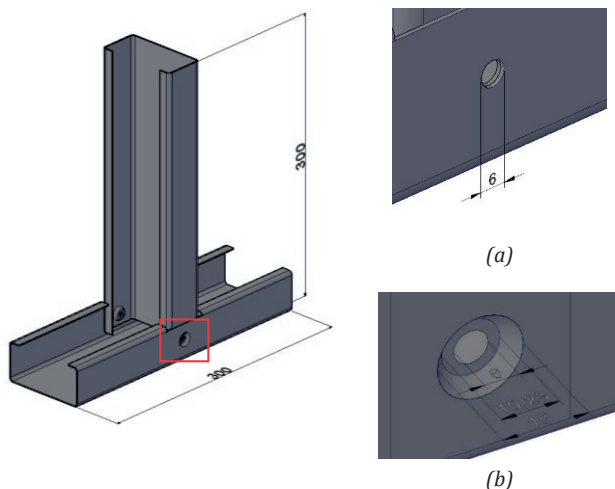


Slika 2. Model CFS okvira s karakterističnim detaljem T-spoja i samonareznim vijkom

2. Geometrija T-spoja i materijal

T-spoj se sastoji od horizontalnog i vertikalnog C-profila međusobno povezanih samonareznim vijcima preko njihovih pojasnica. Oba profila izrađena su od CFS profila C-poprečnog presjeka $89 \times 42 \times 10$ mm, u čeliku klase S550 GD, duljine 300 mm. Za spajanje su primijenjeni samonarezni vijci M6x10mm razreda čvrstoće 10.9.

Istraživanje je obuhvatilo spojeve izvedene s dvjema različitim debljinama stjenke C-profila 0,95 mm i 1,15 mm te dvama različitim tipovima pripreme rupa za vijke. Prvi tip predstavlja standardnu rupu bez dodatnog ojačanja (Slika 3a), dok drugi uključuje rupe ojačane plastičnim oblikovanjem čeličnih limova (Slika 3b).



Slika 3. T-spoj hladno oblikovanih C-profila a) bez ojačanja rupe za vijak i b) s ojačanja rupe za vijak

Mehanička svojstva čelika klase S550 GD dobivena su standardnim vlačnim ispitivanjem u skladu s međunarodnom normom HRN EN ISO 6892-1:2009 [11] prema metodi A. Ispitivanja su provedena u laboratoriju za konstrukcije Građevinskog fakulteta u Rijeci, primjenom standardnog tlačno-vlačnog stroja Zwick/Roell Z 600. Rezultati su preuzeti iz Izvještaja o ispitivanju [12]. Ispitano je ukupno osam uzoraka, po četiri uzorka debljine 0,95 mm i 1,15 mm. Prosječne vrijednosti Youngovog modula E , gornja granica popuštanja R_{eH} , vlačna čvrstoća R_m , postotak deformacije pri granici popuštanja A_e , postotak ukupne deformacije pri vlačnoj čvrstoći A_{gt} i slomu A_t prikazani su u Tablici 1. Poissonov koeficijent iznosi 0,3.

Tablica 1. Mehanička svojstva čelika S S550 GD [9]

Čelik	E [MPa]	R_{eH} [MPa]	R_m [MPa]	A_e [%]	A_{gt} [%]	A_t [%]
S550 GD (0,95)	171897	653,2	657,2	3,1	6,3	8,5
S550 GD (1,15)	183737	697,2	704,9	3,9	7,4	8,9

Kvaliteta čelika za vijke je 10.9. ima granicu popuštanja $f_{yb} = 900 \text{ N/mm}^2$ te vlačnu čvrstoću $f_{ub} = 1000 \text{ N/mm}^2$. Svojstva čelika C-profila i vijaka u numeričkom modelu opisani su bilineranom funkcijom definiranjem elastičnih i plastičnih svojstava. Nominalne (izmjerene) vrijednosti naprezanja i deformacija pretvorene su u stvarne vrijednosti (eng. True values) primijenom izraza [9]:

$$\sigma_t = \sigma_{nom} \cdot (1 + \varepsilon_{nom}) \quad (1)$$

$$\varepsilon_t = \ln(1 + \varepsilon_{nom}) \quad (2)$$

gdje je

σ_{nom} nominalna (izmjerena) vrijednost naprezanja

ε_{nom} nominalna (izmjerena) vrijednost deformacije

σ_t stvarna vrijednost naprezanja i

ε_t stvarna vrijednost deformacije.

3. Numerički model T-spoja

Izrađena su četiri numerička modela T-spojeva u kojima se razlikuju debljine limova C-profila i način izvedbe rupe za vijak (sa ili bez ojačanja rupe za vijak), Tablica 2.

Tablica 2. Numerički modeli T-spojeva

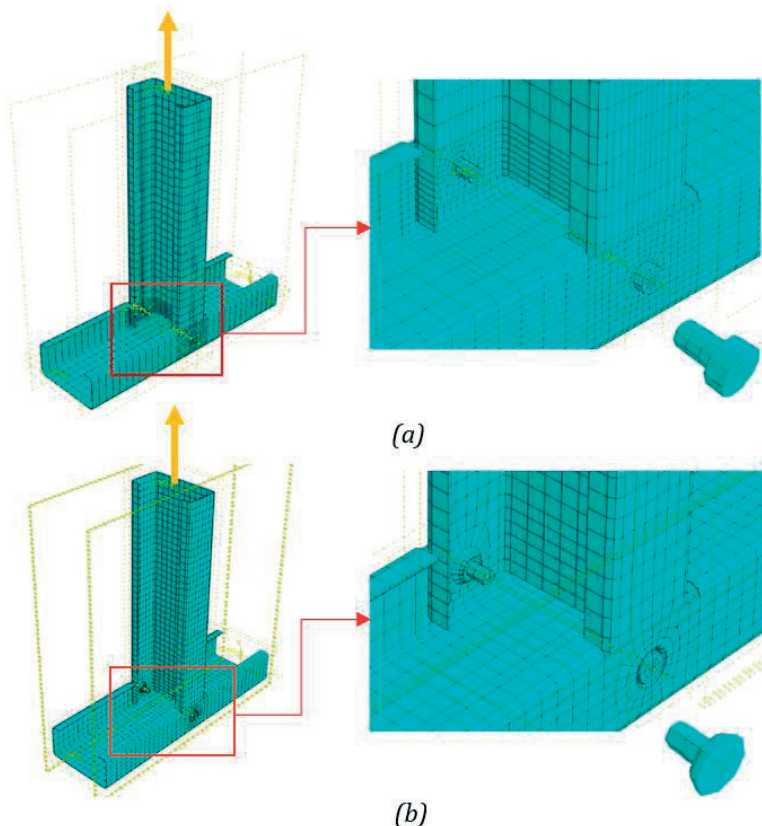
Model	Debljina lima C-profila [mm]	Ojačanje rupe za vijak
T-spoj 0,95	0,95	Ne
T-spoj 0,95 U		Da
T-spoj 1,15	1,15	Ne
T-spoj 1,15 U		Da

C-profilu su modelirani „Solid“ konačnim elementima tipa C3D8R, koji predstavljaju linearne heksaedarske elemente s osam čvorova. Veličina konačnih elemenata je 8 do 10 mm, dok je u području otvora mreža progušćena konačnim elementima od 1 do 3 mm. Vijci su također modelirani „Solid“ konačnim elementima, s promjerom tijela vijka 6 mm i duljinom 10 mm (Slika 4) . Model vijka s ravnom glavom korišten je za modele bez ojačanja rupe, a sa zakošenom glavom za modele s ojačanjem rupe.

U spoju su modelirana tri kontaktna područja: kontakt između vertikalnog i horizontalnog profila, kontakt između glave vijka i profila te kontakt između tijela vijka i ruba rupe na profilu. Područje između profila diskretizirano je „surface to surface“ metodom, a kontakti između vijaka i profila „node to surface“ metodom. Trenje između ploha modelirano je „Penalty“ funkcijom s koeficijentom trenja 0,17. Za modeliranje normalne komponente naprezanja odabran je „Hard“ kontakt.

Rubni uvjeti su zadani na način da su horizontalnom elementu na krajevima spriječeni pomaci i rotacije u svim smjerovima. Simulacija je podijeljena u dva koraka („Step-a“). U prvom koraku su vijcima definirani privremeni rubni uvjeti („Constraint“) tako da su im spriječeni pomaci i rotacije u svim smjerovima te je definiran mali pomak od 0,01 mm kako bi se ostvario kontakt između elemenata. Privremeni rubni uvjeti definirani su samo u modelima bez ojačanja rupe. U modelima s ojačanjem rupe to nije potrebno jer je vijak stabilan zbog ukrućenja te se odmah ostvaruje

kontakt između vijka i profila. U drugom koraku je privremeni rubni uvjet isključen te je nanesen pomak od 5 mm u smjeru vertikalno prema gore (naznačeno narančastom strelicom na Slici 4). Detalji numeričkog modela su dostupni u diplomskom radu [13].

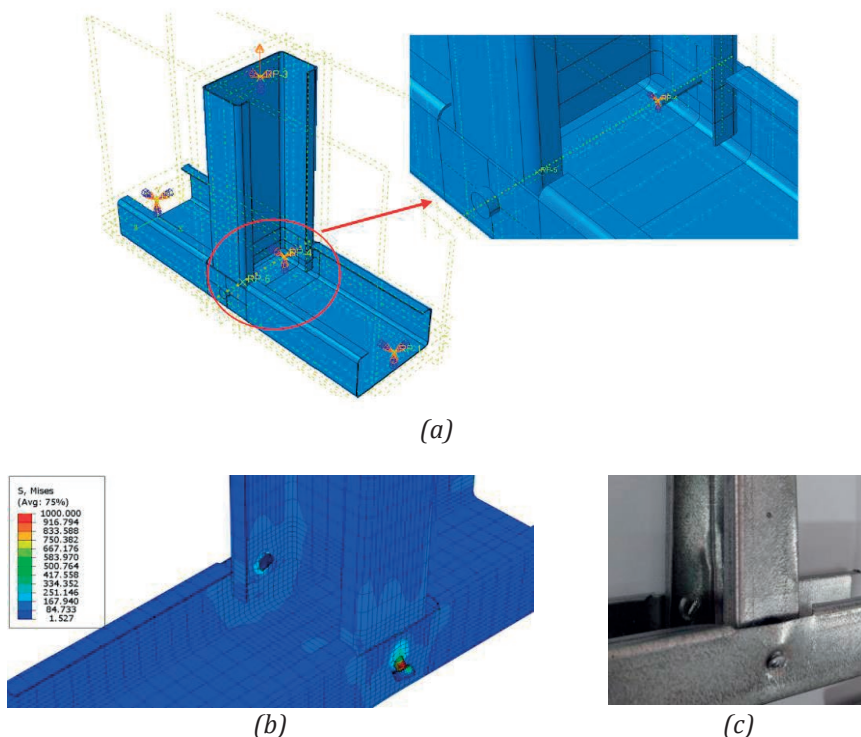


Slika 4. Mreža konačnih elemenata modela T-spoja (a) bez ojačanja rupe za vijak i (b) s ojačanjem rupe za vijak [13]

Validacijski numerički model T-spoja prikazan je na Slici 5a. U modelu je korišten vijak s promjerom tijela 4,8 mm i duljinom tijela 19 mm, pri čemu je primijenjeno pojednostavljeno modeliranje vijka bez navoja radi smanjenja računalne složenosti.

Budući da u izvoru [10] nije definirana točna kvaliteta čelika za vijke niti je bila dostupna krivulja naprezanje–deformacija, u modelu je pretpostavljena kvaliteta čelika 10.9. s granicom popuštanja $f_{yb} = 900 \text{ MPa}$ te vlačnom čvrstoćom $f_{ub} = 1000 \text{ MPa}$. Ostali parametri i karakteristike numeričkog modela (geometrija, materijali, definiranje kontakata i mreža konačnih elemenata) detaljno su opisani u prethodnim

odjeljima rada. Opterećenje je simulirano tako da je nanesen vertikalni pomak od 15 mm. Na slikama 5b i 5c prikazani su oblici otkazivanja validacijskog modela te eksperimentalnog uzorka iz [10].



Slika 5. (a) Rubni uvjeti i djelovanje opterećenja validacijskog modela, (b) oblik otkazivanja validacijskog T-spoja [13] i (c) oblik otkazivanja uzorka iz [10]

Oblici otkazivanja u validacijskom modelu i na ispitnom uzorku iz literature pokazali su vrlo slična ponašanja. Do otkazivanja je došlo izvlačenjem vijka („pull-out“), uzrokovanim njegovim nagnjanjem („tilting“). Iako rezultati nisu identični, uočene razlike mogu se pripisati određenim nesukladnostima između numeričkog modela i fizičkih uzoraka, poput varijacija u kvaliteti vijka te pojednostavljenog modeliranja vijka bez navoja. Unatoč tim razlikama, podudarnost rezultata je dovoljna da se potvrdi valjanost modela i njegova sposobnost pouzdane simulacije ponašanja spojeva.

4. Rezultati i diskusija

4.1 Analiza naprezanja u T-spojevima s C-profilima različitih debljina i izvedbi otvora

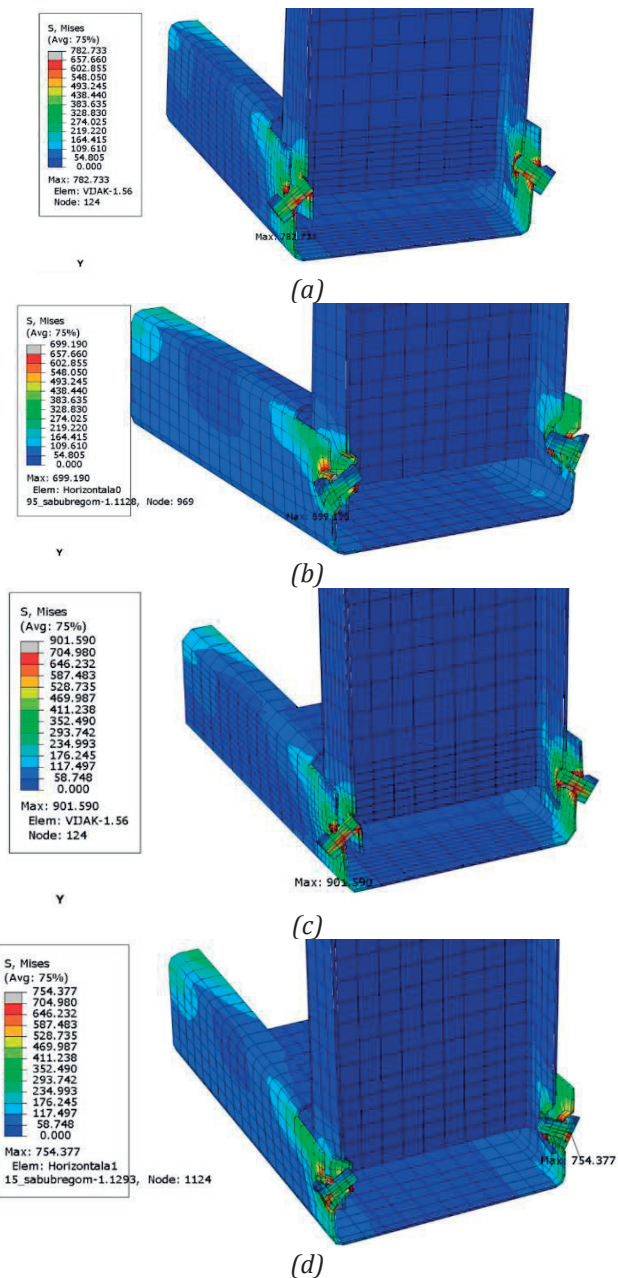
Na slikama 6a–6d prikazana su naprezanja u T-spojevima izrađenima od C-profila različitih debljina, s običnim i ojačanim rupama za vijak.

T-spoj 0,95 (Slika 6a): Spoj s C-profilima debljine 0,95 mm otkazuje uslijed kombiniranog djelovanja naginjanja i izvlačenja vijka, pri čemu dolazi do znatne deformacije profila. Maksimalno naprezanje u vijku iznosilo je 782,73 MPa, što je ispod granice popuštanja vijka (900 MPa). Najveće naprezanje u profilima, 660 MPa, zabilježeno je na rubovima otvora pri pomaku od 5 mm. Otkazivanje spoja počinje pri sili od 5,0 kN, kada naprezanje u limu doseže granicu popuštanja od 653,19 MPa. Kod najveće sile od 5,2 kN, naprezanje u profilu iznosilo je 654,34 MPa, što dovodi do lokaliziranog sloma uslijed tlačnog djelovanja na rubove otvora.

T-spoj 0,95 U (Slika 6b): Kod spoja s ojačanom rupom u istim profilima otkazivanje također nastupa kombinacijom naginjanja i izvlačenja vijka, uz deformaciju profila i slom zbog tlačnog djelovanja po omotaču otvora. Granica popuštanja čelika dosegnuta je pri sili od 5,12 kN (653,19 MPa), a maksimalno naprezanje od 687,93 MPa zabilježeno je pri najvećoj sili od 6,23 kN.

T-spoj 1,15 (Slika 6c): U spoju s debljim C-profilima (1,15 mm), maksimalno naprezanje u vijku iznosilo je 901,59 MPa pri sili od 3,6 kN, čime je dosegnuta granica popuštanja materijala vijka. Najveće naprezanje u čeličnim profilima, 687,46 MPa, zabilježeno je pri pomaku od 5 mm. Pri maksimalnoj sili od 5,99 kN, naprezanje u profilu iznosilo je 677,55 MPa. U oba slučaja, naprezanja su ostala ispod granice popuštanja profila, bez njezina prekoračenja.

T-spoj 1,15 U (Slika 6d): Otkazivanje spoja s ojačanom rupom u profilima debljine 1,15 mm također je rezultat naginjanja i izvlačenja vijka, uz deformaciju čeličnih profila. Najveće naprezanje od 754,38 MPa javlja se na ojačanju oko rupe pri pomaku od 5 mm, što dovodi do sloma uslijed tlačnog djelovanja po omotaču otvora. Granica popuštanja (697,22 MPa) dosegnuta je pri sili od 8,56 kN, dok je pri najvećoj izmjerenoj sili od 8,79 kN naprezanje iznosilo 707,31 MPa.



Slika 6. Von Mises naprezanja za (a) T-spoj 0,95, (b) T-spoj 0,95 U, (c) T-spoj 1,15, (d) T-spoj 1,15 U [10]

4.2 Utjecaj debljine stjenke profila

Usporedba T-spojeva bez ojačanja otvora prikazana je u Tablici 4, gdje su analizirani rezultati za dvije debljine C-profila: 0,95 mm i 1,15 mm. Povećanjem debljine profila za približno 21 %, zabilježeno je povećanje maksimalne nosivosti spoja za 15,2 %. Ovo pokazuje da deblji profil značajno doprinosi povećanju ukupne mehaničke otpornosti spoja.

Tablica 3. Usporedba T-spojeva različite debljine bez ojačanja

Spoj	Debljina lima (mm)	Maks. sila (kN)	Naprezanje u profilu (MPa)	Naprezanje u vijku (MPa)
T-spoj0,95	0,95	5,2	660	782,73
T-spoj1,15	1,15	5,99	680,46	901,59

Uz porast nosivosti, maksimalno naprezanje u čeličnom profilu povećano je za 4,2 %, što upućuje na nešto veću sposobnost profila da prenese veće sile prije otkazivanja. Ipak, najznačajnija promjena uočena je u naprezanju u vijku, koje je poraslo za 15,2 %. Time je naprezanje u vijku kod spoja s debljim profilom doseglo granicu popuštanja materijala vijka (900 MPa).

Ovaj podatak jasno pokazuje da kod spojeva s većom debljinom limova dolazi do promjene dominantnog oblika otkazivanja, dok je kod tanjih profila otkazivanje vezano prvenstveno uz lokalna tlačna naprezanja u čeličnom profilu, a kod debljih limova vijak postaje slabija komponenta spoja. Time je potvrđeno da je ravnoteža između čvrstoće vijka i čvrstoće profila ključna u optimizaciji spojeva, osobito u konstrukcijama koje se izvode s debljim čeličnim elementima. U konačnici, iako povećanje debljine profila doprinosi većoj nosivosti spoja, bez povećanja dimenzija ili čvrstoće vijka može doći do preranog otkazivanja vijaka.

4.3 Utjecaj ojačanja otvora

Usporedba T-spojeva s i bez ojačanja otvora za istu debljinu profila prikazana je u Tablici 4. Rezultati jasno pokazuju pozitivan utjecaj ojačanja otvora na mehanička svojstva spoja, pri čemu je učinak izraženiji kod profila veće debljine.

Tablica 4. Usporedba T-spojeva s i bez ojačanja

Spoj	Debljina lima (mm)	Ojačanje oko rupe	Maks. sila (kN)	Naprezanje u profilu (MPa)
T-spoj 0,95	0,95	Ne	5,2	660
T-spoj 0,95U		Da	6,23	687,93
T-spoj 1,15	1,15	Ne	5,99	687,46
T-spoj 1,15U		Da	8,79	754,38

Kod tanjih C-profila debljine 0,95 mm, uvođenjem ojačanja povećana je maksimalna sila koju spoj može podnijeti s 5,2 kN na 6,23 kN, što predstavlja porast od 19,8 %. Istodobno, najveće naprezanje u čeličnom profilu poraslo je za 4,2 %. Ovo povećanje ukazuje na blago bolju iskoristivost materijala zahvaljujući smanjenju lokalnih koncentracija naprezanja oko rupe za vijak.

Kod debljih profila debljine 1,15 mm, učinak ojačanja još je izraženiji. Maksimalna sila povećana je s 5,99 kN na 8,79 kN, što predstavlja impresivno povećanje od 46,7 %. Također, naprezanje u čeličnim profilima poraslo je s 687,46 MPa na 754,38 MPa, što odgovara porastu od 9,7 %.

Ovi rezultati jasno ukazuju da ojačanje otvora znatno poboljšava nosivost spoja, pri čemu se kod debljih limova učinak povećava višestruko. Razlog tome leži u činjenici da deblji limovi imaju veću sposobnost prenošenja sile, ali istovremeno i veći potencijal za lokalne deformacije i slom uslijed koncentriranih naprezanja. Ojačanje redistribuira naprezanja, čime se smanjuje rizik od lokalnog tlačnog otkazivanja na rubovima otvora, što omogućuje bolje iskorištavanje nosivosti samog profila.

Može se zaključiti da ojačanje otvora predstavlja ključnu mjeru u spojevima izvedenim s debljim čeličnim profilima budući da značajno doprinosi povećanju nosivosti i boljem ponašanju spoja. Kod tanjih profila učinak ojačanja također je prisutan, no njegov doprinos je nešto umjereniji, što je posljedica manje izraženih lokalnih deformacija u području rupe za vijak.

4.4 Učinkovitost T-spoja i oblici otkazivanja

Kod tanjih limova debljine 0,95 mm, otkazivanje spoja nastupa pri nižim razinama opterećenja i nižim vrijednostima naprezanja, što je očekivano s obzirom na manju ukupnu nosivost presjeka. U tim slučajevima su plastične deformacije izraženije, osobito u zoni oko rupe za vijak, gdje dolazi do koncentracije lokalnih naprezanja uslijed tlačnog djelovanja vijka. Oblik otkazivanja uglavnom uključuje lokalni pritisak po omotaču rupe i savijanje stjenki profila, pri čemu spoj gubi nosivost zbog progresivnog deformiranja limova.

Uvođenjem ojačanja rupe kod ovakvih spojeva dolazi do smanjenja lokalnih koncentracija naprezanja i boljeg rasporeda sila u zoni spoja. Time se omogućuje ravnomjernije opterećenje čeličnih limova, smanjuju se lokalna oštećenja i omogućuje veće iskorištenje materijala prije pojave otkazivanja. Iako ukupni porast nosivosti nije dramatičan kao kod debljih profila, pozitivan učinak ojačanja ipak je značajan u smislu povećanja sigurnosti i uporabivosti spoja.

Kod debljih limova, kapacitet profila postaje znatno veći, a spoj može podnijeti veće sile i viša naprezanja. No, istodobno dolazi do preraspodjele naprezanja s čeličnih limova na vijak. Uočeno je da u tim slučajevima naprezanje u vijku raste i iznad granice popuštanja materijala vijka, što ukazuje da vijak postaje najugroženiji element sustava. Iako su limovi sposobni prenositi veće sile, nedovoljno dimenzioniran vijak može dovesti do preranog otkazivanja vijka, što može ugroziti sigurnost konstrukcije.

Ova pojava posebno dolazi do izražaja u spojevima bez ojačanja rupe za vijak, gdje su lokalne sile koncentrirane na manjoj površini oko otvora te dodatno opterećuju vijak. Stoga, pri oblikovanju spojeva s debljim limovima i visokim zahtjevima nosivosti, nužno je voditi računa ne samo o profilu, već i o odabiru odgovarajuće klase čvrstoće i promjera vijka, kao i o mogućem dodatnom ojačanju zone spoja. Na taj se način postiže uravnotežena nosivost svih komponenti spoja, čime se smanjuje rizik od lokalnog otkazivanja i povećava ukupna pouzdanost konstrukcije.

5. Zaključak

Analiza T-spojeva izrađenih od hladnooblikovanih C-profila različitih debljina, s i bez ojačanja otvora, pokazala je važnost pravilnog oblikovanja spojeva u čeličnim konstrukcijama. Uočeno je da debljina profila, kao i prisutnost lokalnog ojačanja oko otvora, značajno utječu na mehaničko ponašanje spoja, način otkazivanja i raspodjelu naprezanja između vijka i čeličnih elemenata. Kod tanjih profila (0,95 mm), otkazivanje se javlja pri nižim silama, uz izraženije deformacije u zoni otvora. U tim slučajevima,

dominantan oblik otkazivanja je lokalni tlačni slom profila zbog pritiska vijka po rubu otvora. Uvođenjem ojačanja postiže se smanjenje koncentracije naprezanja i ravnomjernija preraspodjela sila, čime se povećava nosivost i iskorištenje materijala bez znatnog povećanja naprezanja. Iako su apsolutna povećanja nosivosti umjerena, pozitivni učinci ojačanja jasno su vidljivi i opravdavaju njegovu primjenu. Kod debljih profila (1,15 mm), povećanjem debljine limova dolazi do znatnijeg povećanja nosivosti spoja, ali istodobno se mijenja kritičan oblik otkazivanja. Naime, naprezanje u vijku postaje dominantno i, u nekim slučajevima, doseže ili prelazi granicu popuštanja materijala vijka.

Ojačanje otvora u ovom slučaju ne samo da povećava ukupnu nosivost, već i omogućuje bolju preraspodjelu opterećenja, čime se maksimalno iskorištavaju kapaciteti profila bez preopterećenja vijka. Time se osigurava viša razina sigurnosti i smanjuje rizik od lokalnog sloma u zoni spoja. Rezultati istraživanja potvrđuju da je za postizanje optimalnih svojstava spoja nužno promatrati spoj kao cjelinu, uzimajući u obzir međudjelovanje profila, vijka i lokalnih ojačanja. Pravilnim odabirom debljine limova, dimenzioniranjem vijaka i primjenom ojačanja moguće je značajno unaprijediti mehanička svojstva spoja, povećati nosivost i produljiti vijek trajanja konstrukcije. Ova saznanja posebno su važna u kontekstu modernih čeličnih konstrukcija, gdje se od spojeva očekuje visoka pouzdanost i racionalna potrošnja materijala.

Rezultate provedenih numeričkih simulacija potrebno je dodatno potvrditi laboratorijskim ispitivanjima na stvarnim uzorcima spojeva, sve kako bi se osigurala njihova valjanost i pouzdanost u realnim uvjetima opterećenja. Eksperimentalna ispitivanja omogućit će preciznu identifikaciju stvarnih mehanizama otkazivanja, ponašanja materijala i kontaktnih fenomena, uključujući utjecaj deformacija, trenja i lokalnih plastičnih zona koje je teško u potpunosti obuhvatiti numeričkim modelima. Na temelju tako dobivenih rezultata moguće je provesti kalibraciju i optimizaciju numeričkih modela, uključujući poboljšanja u definiranju graničnih uvjeta, kontaktnih parametara i materijalnih nelinearnosti. Time će se povećati točnost predviđanja ponašanja spojeva, što je od presudne važnosti za buduću inženjersku primjenu i razvoj sigurnih i učinkovitih konstrukcijskih sustava izrađenih od tankostjenih čeličnih profila.

Zahvala. Istraživanje financirano je iz znanstveno razvojnog projekta UNIRI INOVA „Inovativni priključak za spajanje konstrukcijskih elemenata od tankostjenih čeličnih C-profila“ provedenog uz potporu Sveučilišta u Rijeci, te iz IRI 2 projekta „Pregdotovljene zgrade gotovo nulte energije proizvedene na industrijski način“. Ovo istraživanje predstavlja nastavak i

proširenje istraživanja započetog u okviru Diplomskog rada studenta Josipa Malčića.

Literatura

- [1] Kajaharan T., Elilarasi K., Perampalam G., Keerthan P., Heshachanaa R., Thadshajini S. and Madhushan D. (2021) Sustainable Performance of a Modular Building System Made. Buildings, 11(460)
- [2] Kozlovská M., Mokrenko D., Struková Z., and Špak M., (2022) The Potential of Lightweight Panel Systems in Building Industry. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 1252
- [3] Liang, H., Roy, K., Fang, Z., and Lim, J. B. P. (2022) A Critical Review on Optimization of Cold-Formed Steel Members for Better Structural and Thermal Performances. Buildings, 12(34)
- [4] Komara, I.; Wahyuni E.; Suprobo, P. A study on Cold-formed Steel Frame Connection: A review, The Journal for Technology and Science, 2017, vol. 28, no. 3, pp. 83-89
- [5] Lee, Y. H.; Tan, C. S.; Mohammad, S.; Tahir, M. M.; Shek, P. N. Review on Cold-Formed Steel Connections, The Scientific World Journal, 2014, vol. 2014, p. 11 pages.
- [6] Dubina, D., Ungureanu, V., Landolfo, R. (2012) Design of Cold-Formed Steel Structures, Eurocode 3: Design of Steel Structures Part 1-3- Design of Cold-Formed Steel Structures, 1st Edition
- [7] Yu, W.-W., Laboube, R. A. and Chen, H. (2020) Cold-Formed Steel Design (First edition), Chennai: John Wiley & Sons.
- [8] Chao, S., Lu, L., & Wu, H. (2018). Shearing Bearing Capacity of Screwed Connections of Thin Steel Sheets. International Journal of Steel Structures.
- [9] ABAQUS/Standard User's Manual, Version 6.14. Dassault Systèmes Simulia Corp.
- [10] Taranu, G., Toma, I.-O. (2021) Experimental Investigation and Numerical Simulation of C Shape Thin-Walled Steel Profile Joints. Buildings, 11(12), 636
- [11] HRN EN ISO 6892-1:2010, Metalni materijali -- Vlačno ispitivanje -- 1. dio: Metoda ispitivanja pri sobnoj temperaturi
- [12] Krolo, P., Bakran, A., Lukačević, L. (2021) Polimerna pjena, gips vlaknaste ploče, hladno oblikovani čelik, kompozitni paneli. Izvještaj o ispitivanju. Građevinski fakultet, Sveučilište u Rijeci
- [13] Malčić, J. (2022) Nosivost spojeva sa samobušećim vijcima u tankostjenim C-profilima. Diplomski rad. Građevinski fakultet, Sveučilište u Rijeci