

Primljen / Received: 21.2.2014.

Ispravljen / Corrected: 3.6.2014.

Prihvaćen / Accepted: 15.10.2014.

Dostupno online / Available online: 10.11.2014.

Primjena hladno oblikovanih šupljih čeličnih profila

Autori:



Dr.sc. **Boris Androić**, dipl.ing.građ.
I.A. projektiranje d.o.o., Zagreb
Akademija tehničkih znanosti Hrvatske
info@iaprojektiranje.com



Prof.dr.sc. **Darko Dujmović**, dipl.ing.građ.
Sveučilište u Zagrebu
Građevinski fakultet
Akademija tehničkih znanosti Hrvatske
dujmovic@grad.hr



Josip Pišković, dipl.ing.građ.
Sveučilište u Zagrebu
Građevinski fakultet
Zavod za konstrukcije
jpiskovic@grad.hr

Stručni rad

Boris Androić, Darko Dujmović, Josip Pišković

Primjena hladno oblikovanih šupljih čeličnih profila

Prema EN 1993-1-1 primjena šupljih profila dopuštena je u izradi čeličnih konstrukcija neovisno o tome jesu li profili tople dogotovljeni prema EN 10210 ili hladno oblikovani prema EN 10219. Kod projektiranja često postoji dvojba u vezi s primjenom hladno oblikovanih profila uslijed negativnog utjecaja hladnog oblikovanja na njihovo ponašanje. Nedoumicu može izazivati i nedorečenost u normi EN 1993-1-8 koja se odnosi na mogućnost zavarivanja u hladno oblikovanim zonama. Osnovna svrha rada je prikazati smjernice za odabir pravokutnih šupljih profila kod projektiranja čeličnih konstrukcija, a posebno se obrazlaže opravdanost primjene hladno oblikovanih profila.

Ključne riječi:

šuplji profili, proizvodnja, zavarivanje, kruti lom, priključci

Professional paper

Boris Androić, Darko Dujmović, Josip Pišković

Application of cold formed hollow steel sections

According to EN 1993-1-1, the application of hollow steel sections is permitted in the execution of steel structures, regardless of whether they are hot finished according to EN 10210 or cold finished according to EN 10219. Steel designers often have doubts about the use of cold formed hollow sections due to unfavourable effects of cold forming. Such doubts may be due to inconsistencies in EN 1993-1-8 relating to the permissibility of welding in cold formed zones. The main objective of this paper is to present guidelines for the selection of appropriate rectangular hollow sections in the design of steel structures, with justification of the use of cold formed hollow sections.

Key words:

hollow sections, manufacturing, welding, brittle fracture, joints

Fachbericht

Boris Androić, Darko Dujmović, Josip Pišković

Anwendung kaltgeformter Stahlhohlprofile

Laut EN 1993-1-1 ist die Anwendung von Stahlhohlprofilen in der Ausführung von Stahlkonstruktionen erlaubt, unabhängig davon ob sie laut EN 10210 warmgefertigt oder laut EN 10219 kaltgefertigt wurden. Konstrukteure haben im Entwurf oft Zweifel bezüglich der Anwendung kaltgeformter Hohlprofile aufgrund der negativen Auswirkungen der Kaltfertigung. Zweifelfälle können auch durch Inkonsistenzen der Norm EN 1993-1-8 bezüglich der möglichen Anwendung von Schweißverbindungen in kaltgeformten Zonen bedingt sein. Das grundlegende Ziel dieser Arbeit ist, Richtlinien für die Auswahl von rechteckigen Hohlprofilen im Entwurf von Stahlkonstruktionen zu präsentieren, und insbesondere die gerechtfertigte Verwendung von kaltgeformten Profilen zu erläutern.

Schlüsselwörter:

Hohlprofile, Herstellung, Schweißen, Sprödbruch, Verbindungen

1. Uvod

Na temelju dugogodišnjeg iskustva autora utvrđeno je da prilikom projektiranja čeličnih konstrukcija postoji dvojba između primjene tople dogotovljenih šupljih profila prema EN 10210 [1] i hladno oblikovanih šupljih profila prema EN 10219 [2]. Pod pojmom "toplo dogotovljeni" prodrзумijevaju se šuplji profili kod kojih se završno oblikovanje provodi u vrućem stanju pri temperaturi $> 700\text{ }^{\circ}\text{C}$, ili koji su hladno oblikovani i naknadno toplinski obrađeni pri temperaturi $> 550\text{ }^{\circ}\text{C}$. Normalizirani i normalizacijski valjani šuplji profili razmatraju se kao tople dogotovljeni jer su proizvedeni ili toplinski obrađeni pri temperaturi normalizacije. S druge strane, hladno oblikovani šuplji profili oblikuju se pri sobnoj temperaturi bez naknadne toplinske obrade, izuzevši zavar koji može biti toplinski obrađen. Navedeni postupci proizvodnje rezultiraju različitim karakteristikama šupljih profila. Toplo dogotovljeni šuplji profili imaju deblje uglove i manji radijus zaobljenosti, kao rezultat toka metala za vrijeme postupka oblikovanja, te nemaju zaostalih naprezanja. Presjek je homogen s obzirom na ujednačenu strukturu materijala i tvrdoću. To, međutim, nije slučaj kod hladno oblikovanih profila, posebno u zonama uglova. Hladno oblikovani profili u uglovima imaju visoku razinu zaostalih naprezanja uslijed hladnog oblikovanja čime se povećava opasnost od pojave pukotina. Iz tog razloga, u normi EN 10219, tablica 3., zahtijevaju se veći radijusi zaobljenosti u uglovima profila u odnosu na tople dogotovljene. S estetskoga gledišta, prednost hladno oblikovanih profila je glatka površina. Kod tople dogotovljenih profila mogu se pojaviti brazgotine, što je prikazano na slici 1. Osnovna svrha rada je usporedba ponašanja tople dogotovljenih i hladno oblikovanih šupljih profila te davanje smjernica za odabir pravokutnih šupljih profila kod projektiranja čeličnih konstrukcija.



Slika 1. Detalj čvora izvedenog iz tople dogotovljenih šupljih profila s vidljivo izbrazdanom površinom [3]

2. Zavarivanje u zonama hladnog oblikovanja

Zavarivanje smanjuje žilavost profila u zonama hladnog oblikovanja što povećava rizik od nastanka pukotina. Stoga je, prema članku 4.14 EN 1993-1-8 [4], zavarivanje unutar širine $5t$ s obje strane hladno oblikovane zone poprečnog presjeka dopušteno ako je zadovoljen jedan od sljedećih uvjeta:

- da su zone nakon hladnog oblikovanja normalizirane prije početka zavarivanja,
- da omjer unutarnjeg radijusa ugla r i debljine profila t zadovoljava uvjete iz tablice EN 1993-1-8, tablica 4.2 [4].

Bitno je napomenuti da prema EN 10219 svi čelici moraju biti potpuno umireni (dezoksidirani i tretirani aluminijem). Prema ispravci EN 1993-1-8 iz srpnja 2009. [5], ako nije zadovoljen uvjet r/t iz članka 4.14 EN 1993-1-8, zavarivanje hladno oblikovanih zona dopušteno je pod sljedećim uvjetima:

- da je debljina stijenke manja od 12,5 mm,

Tablica 1. Uvjeti za zavarivanje u zoni hladnog oblikovanja i preostalim zonama poprečnog presjeka hladno oblikovanog profila (EN 1993-1-8, tablica 4.2)

Omjer r/t	Poduzna deformacija uslijed hladnog oblikovanja [%]	Najveće debljine [mm]		
		Općenito		Čelik potpuno umiren s aluminijem [Al $\geq 0,02\%$]
		Pretežito statičko opterećenje	Dominantno je umaranje	
≥ 25	≤ 2	bilo koje	bilo koje	bilo koje
≥ 10	≤ 5	bilo koje	16	bilo koje
$\geq 3,0$	≤ 14	24	12	24
$\geq 2,0$	≤ 20	12	10	12
$\geq 1,5$	≤ 25	8	8	10
$\geq 1,0$	≤ 33	4	4	6

- da je čelik tijekom proizvodnje umiren dodavanjem aluminija u kvalitetnim podskupinama J2H, K2H, MH, MLH, NH ili NLH, - kemijski sastav čelika mora biti u sljedećim granicama: C ≤ 0,18 %, P ≤ 0,02 % i S ≤ 0,012 %.

U istoj ispravci navedeno je da se zavarivanje u zonama 5t od uglova može dozvoliti i pod uvjetom da se zavarljivost može dokazati ispitivanjem samih uzoraka.

Nedorečenost u EN 1993-1-8 odnosi se na formulaciju da je zavarivanje dopušteno unutar širine 5t od hladno oblikovane zone. Takva formulacija mogla bi podrazumijevati da se u zoni uglova ne dopušta zavarivanje. Ipak, slika u tablici 4.2 EN 1993-1-8 [6], ispravno prikazuje da je u slučaju zadovoljenja uvjeta r/t dopušteno zavarivanje i samih uglova profila. Stoga je radna skupina pripremajući EN 1993-1-8 [6], predložila formulaciju članka 4.14(1) prema sljedećem: "U zoni zaobljenja i širini 5t od tih zona (vidi sliku u tablici 4.2) zavarivanje je dopušteno ako je zadovoljen jedan od sljedećih uvjeta".

Slijedom navedenog, može se zaključiti da je zavarivanje hladno oblikovanih šupljih profila proizvedenih prema EN 10219, ako su zadovoljeni gore navedeni uvjeti, dopušteno po cijelom opsegu profila. Na slici 2. prikazana je izvedba kvalitetno izvedenog vara kod hladno oblikovanog pravokutnog šupljeg profila po cijelom opsegu profila.



Slika 2. Konstrukcijski element iz hladno oblikovanog pravokutnog šupljeg profila zavaren po cijelom opsegu profila [3]

3. Osiguranje od pojave krtog loma

Vrednovanje žilavosti, tj. osiguranje od pojave krtog loma kod konstrukcija izvedenih od hladno oblikovanih šupljih profila proizvedenih prema EN 10219, u EN 1993-1-10 [7] nije jasno definirano. Iz tog razloga, radna skupina European Commission Joint Research Centre (JRC) pripremila je dokument [8] u kojem je predložen postupak za osiguranje od krtog loma i u slučaju primjene hladno oblikovanih šupljih profila. Taj postupak usklađen je s EN 1993-1-10 te je predložen u sklopu izmjene i dopune te norme. U tablici 2.1 EN 1993-1-10 dane su dopuštene debljine stijenke profila za različite kvalitete čelika i referentne

temperature T_{Ed} do -50 °C. U novom predloženom postupku, prilagođenom za hladno oblikovane šuplje profile, određena je prilagodba $\Delta T_{\epsilon_{cf}}$ za stupanj hladnog oblikovanja ϵ_{cf} tako da je tablica 2.1 EN 1993-1-10: 2010 proširena za temperature do -120 °C. Na temelju novog postupka predloženog u [8], u radu [9] izračunane su referentne temperature T_{Ed} kao i najniža temperatura zraka za određeno povratno razdoblje T_{md} kojima je izložen hladno oblikovani šuplji konstrukcijski element prema izrazu:

$$T_{md} = T_{Ed} - \Delta T_{\epsilon_{cf}} \quad (1)$$

Izraz (1) vrijedi ako je

$$\Delta T_r = \Delta T_{\sigma} = \Delta T_R = \Delta T_{\epsilon} = 0 \quad (2)$$

gdje je:

ΔT_r - prilagodba za gubitak zračenjem,

ΔT_{σ} - prilagodba za naprezanje i granicu popuštanja materijala, nesavršenost pukotine, oblik elementa i dimenzije,

ΔT_R - sigurnosni dodatak, ako se zahtijeva, kako bi se obuhvatile različite razine pouzdanosti u različitim primjenama,

ΔT_{ϵ} - prilagodba za brzinu deformacije koja se razlikuje od referentne brzine deformacije $\dot{\epsilon}_0$.

Najniže referentne temperature T_{Ed} i najniže temperature zraka za određeno povratno razdoblje T_{md} kojima su izloženi hladno oblikovani pravokutni šuplji profili, proizvedeni prema EN 10219, prikazani su u tablici 2.

Tablica 2. Najniže referentne temperature T_{Ed} i najniže temperature zraka za određeno povratno razdoblje T_{md} za šuplje profile proizvedene prema EN 10219, preuzete iz [9]

Kvadratni i pravokutni šuplji profili					
Kvaliteta čelika prema EN 10219		Ispitivanje prema Charpyu – oštri V zarez		Najniža proračunska temperatura	
		Temperatura ispitivanja [°C]	Energija pri udaru [J]	T_{Ed} [°C]	T_{md} [°C]
S235	JRH	20	27	-85	-50
	J2H	-20	27	-95	-60
S355	MH	-20	40	-100	-65
	MLH	-50	27	-120	-85
S420	MH	-20	40	-90	-55
	MLH	-50	27	-110	-75
S460	MH	-20	40	-85	-50
	MLH	-50	27	-105	-70

U tablici 2. temperature T_{Ed} i T_{md} izračunane su za debljine stijenke hladno oblikovanih profila $t = 12,5$ mm. Ako su stijenke manjih debljina, vrijednosti su na strani veće pouzdanosti. Za granično stanje upotrebljivosti, proračunske vrijednosti temperatura

određene su na razini računskog naprezanja $\sigma_{Ed} = 0,75 f_v$. Ako je ta razina niža, ove su vrijednosti na strani veće pouzdanosti. Utvrđeno je da za hladno oblikovane šuplje profile prilagodba temperature ΔT_{ef} ovisi o debljini stijenke [8]. Tako za debljine $t \leq 16$ mm ΔT_{ef} iznosi -35°K , a za debljine $16 \text{ mm} \leq t \leq 40$ mm ta prilagodba iznosi -45°K . Kako je prikazano u tablici 2, velik broj hladno oblikovanih pravokutnih šupljih profila s debljinama stijenki $t \leq 12,5$ mm zadovoljavaju zahtjeve za osiguranje od krstog loma pri vrlo niskim temperaturama zraka za određeno povratno razdoblje T_{md} , koje se kreću u granicama od -50°C do -85°C .

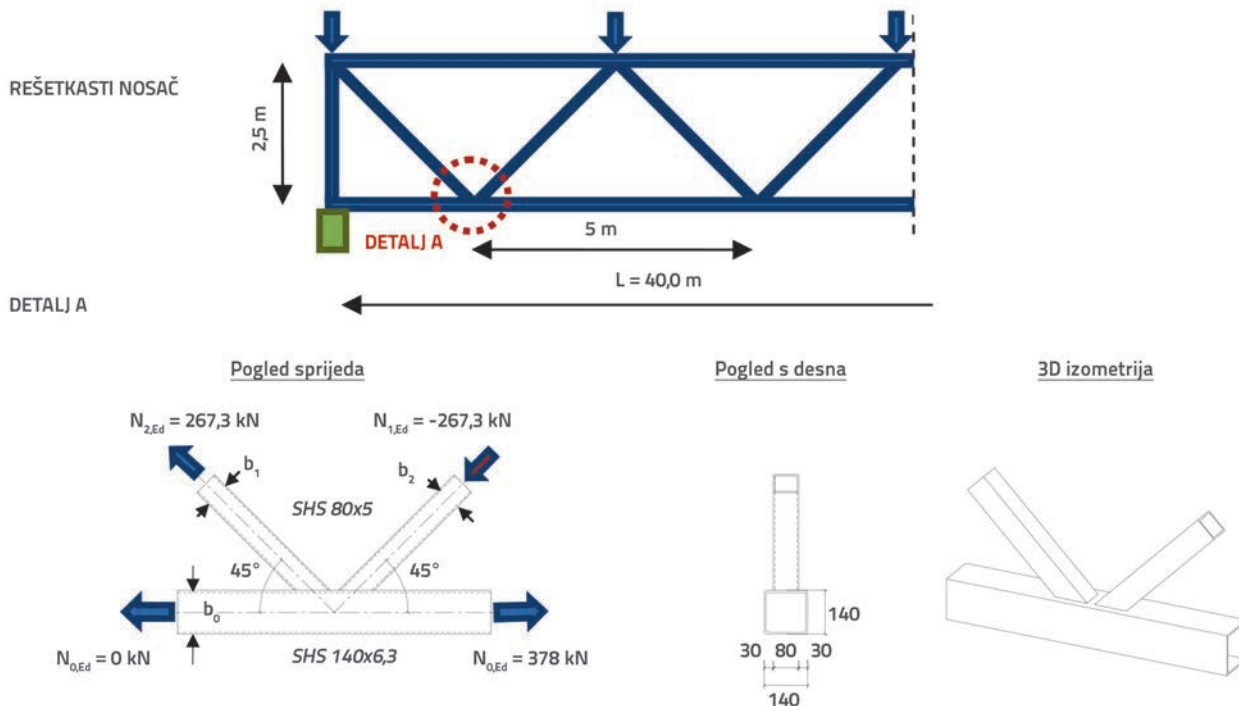
4. Otpornost konstrukcijskih elemenata

Prema EN 1993-1-1 [10], za otpornost konstrukcijskih elemenata izloženih savijanju ili vlaku nema razlika između toplo dogotovljenih i hladno oblikovanih šupljih profila. Za tlačne elemente, između toplo dogotovljenih i hladno oblikovanih profila postoje razlike koje proizlaze iz veličine zaostalih naprezanja uslijed proizvodnje. Kod toplo dogotovljenih profila zaostala naprezanja su manja te se kod proračuna tlačnog elementa usvaja povoljnija krivulja izvijanja "a". S druge strane, hladno oblikovani profili imaju veća zaostala naprezanja što kod proračuna rezultira odabirom nepovoljnije krivulje izvijanja "c". U radu [3] dana je usporedba tlačnih elemenata od hladno oblikovanih i toplo dogotovljenih šupljih profila u pogledu utroška materijala i cijene konstrukcije. Za usporedbu su odabrani kvadratni profili $150 \times 150 \times 6,3$ i $200 \times 200 \times 10$ s efektivnim duljinama 3 m, 4 m, 5 m, 8 m i 10 m, s njihovim mehaničkim karakteristikama i cijenama. Analize su pokazale

da tlačni elementi od toplo dogotovljenih pravokutnih šupljih profila, koristeći krivulju izvijanja "a", imaju 14 % do 28 % veće otpornosti na izvijanje u odnosu na hladno oblikovane proračunate s krivuljom izvijanja "c". Iz tog razloga upotreba toplo dogotovljenih šupljih profila rezultira konstrukcijama prosječno lakšim 14 % do 17 %, ali im je cijena još uvijek 5 % do 33 % viša u odnosu na hladno oblikovane. Ako se razmatraju tlačni elementi prema EN 1994-1-1 [11] od šupljih pravokutnih profila ispunjenih betonom, može se utvrditi da je njihova otpornost na izvijanje jednaka bez obzira na to radi li se o toplo dogotovljenim ili hladno oblikovanim šupljim profilima [12, 13]. Krivulje izvijanja određuju se s obzirom na omjer armiranja. Za omjer armiranja koji je $\rho_s \leq 3\%$ za pravokutne i okrugle šuplje profile usvaja se krivulja izvijanja "a". Za omjer armiranja $3\% < \rho_s \leq 6\%$ usvaja se krivulja izvijanja "b".

5. Otpornost priključaka kod rešetkastih nosača

Prema EN 1993-1-8 otpornost zavarenog priključka čvora rešetke ne ovisi o načinu proizvodnje šupljih profila. U EN 1993-1-8 preporučene su vrijednosti parcijalnih faktora dobivene kalibracijom provedenom probablističkim postupkom, te je preporučena vrijednost $\gamma_{M5} = 1,0$. Ta vrijednost prihvaćena je u gotovo svim zemaljama Europske unije. U hrvatskom nacionalnom dodatku HRN EN 1993-1-8/NA [14] usvojena je vrijednost parcijalnog faktora $\gamma_{M5} = 1,35$. Usvojena vrijednost je konzervativna, što može rezultirati povećanjem težine elemenata rešetke i povećanjem cijene izvedbe konstrukcije. Sljedećim primjerom prikazan je proračun čvora rešetke koji ilustrira navedenu problematiku.



Slika 3. Zavareni priključak čvora rešetke

Za rešetku raspona 40 m i zadana proračunska opterećenja u čvorovima 54 kN (27 kN u rubnim čvorovima) proveden je dokaz pouzdanosti gornjeg pojasa, donjeg pojasa i ispuna na vlak i tlak prema EN 1993-1-1. Odabrani profili su kvadratni 140 x 8 za gornji pojas, 140 x 6,3 za donji pojas, te 80 x 5 za ispunu. Usvojena kvaliteta čelika za sve elemente rešetke je S355. Na slici 3. prikazan je statički sustav rešetke te analizirani zavareni priključak čvora rešetke. Proračun zavarenog priključka rešetke provodi se prema točki 7.5 EN 1993-1-8.

Za prikazani čvor potrebno je dokazati: otkazivanje lica pojasnice (eng. *chord face failure*), proboj pojasnice (eng. *chord punching*), posmik u pojasnici (chord shear) te čvrstoću varova. Kako bi se zadovoljio uvjet prema točki 7.3.1.(4) EN 1993-1-8, minimalna debljina vara za čelik S355 iznosi $a_w \geq 1,1 t$. Za razmatrani čvor usvojena je debljina vara $a_w = 6$ mm po cijelom opsegu poprečnog presjeka ispune. Mjerodavan kriterij za otpornost priključka u ovom primjeru je otkazivanje lica pojasnice, prema sljedećem izrazu:

$$N_{1,Rd} = \frac{8,9 \gamma^{0,5} k_n f_{y0} t_0^2 (b_1 + b_2)}{\sin \theta_1 (2b_0)} / \gamma_{M5} \quad (3)$$

gdje je:

- $\gamma = b_0 / (2t_0)$ - koeficijent koji uzima u obzir geometriju pojasnice širine b_0 i debljine stijenke t_0 ,
- $k_n = 1,3 - \frac{0,4 n}{\beta} \leq 1,0$ - koeficijent koji uzima u obzir naprezanja u pojasnici,
- β - omjer srednje širine elemenata ispune i pojasna,
- $n = \sigma_{Ed} / f_{y0}$ - razina naprezanja u pojasnici.

Dokaz pouzdanosti priključka s preporučenim parcijalnim faktorom $\gamma_{M5} = 1,0$ zadovoljava kriterije prema EN 1993-1-8 i iskorištenost priključka iznosi 79 %. Za vrijednost parcijalnog faktora $\gamma_{M5} = 1,35$, usvojenog u HRN EN 1993-1-8/NA, priključak ne zadovoljava kriterije otpornosti norme i dobiveno je prekoračenje od 7 %. Budući da kriterij nije zadovoljen, potrebno je konstrukcijski ojačati čvor. Ojačati čvor moguće je preklapanjem elemenata ispune, odabirom jačih profila ili dodavanjem čvornih ploča. U svim slučajevima radi se o neekonomičnim rješenjima koja poskupljuju izvedbu i mogu činiti šuplje profile nekonkurentnima.

6. Umaranje

Ispitivanja su pokazala da zavareni priključci šupljih profila mogu biti osjetljivi na pojavu umaranja. Također, pokazala su da ne postoje razlike između toplo dogotovljenih i hladno oblikovanih šupljih profila, unatoč razlici u razini zaostalih naprezanja [15, 16]. Stoga se u EN 1993-1-9 [15] ne razlikuje način proizvodnje šupljih pravokutnih profila s obzirom na životni vijek čeličnih konstrukcija izloženih umaranju. Detaljni pregled problematike umaranja šupljih profila dan je u radu [17].

7. Otpornost na požar

Na temelju smjernica za proračun otpornosti na požar za šuplje čelične profile može se zaključiti da ne postoje razlike u ponašanju profila u požaru između toplo dogotovljenih i hladno oblikovanih profila [18]. Ovo vrijedi i za šuplje profile ispunjene betonom. Šupljivi profili koji nisu ispunjeni betonom, neovisno o načinu proizvodnje, imaju otpornost na požar R15 (15 minuta) za debljine stijenke profila $t = 8$ mm, a za debljine stijenke $t = 25$ mm otpornost na požar iznosi R30 (30 minuta). Za zahtjeve vatrootpornosti R60 i više potrebno je odgoditi porast temperature u čeličnom profilu primjenom odgovarajuće zaštite, kako je to predviđeno i za ostale tipove čeličnih poprečnih presjeka. Prema EN 1993-1-2 [19], kod proračuna otpornosti na izvijanje svih čeličnih presjeka u tlaku izloženih požarnom opterećenju, uključujući i šuplje profile koji nisu ispunjeni betonom, nije potrebno uzimati u obzir nesavršenosti. Vrijednost faktora imperfekcija α temelje se na nominalnoj vrijednosti granice popuštanja f_y s vrijednošću

$$\alpha = 0,65 \cdot \sqrt{\frac{235}{f_y}} \quad (4)$$

8. Ponašanje u potresu

U Japanu, području s velikom seizmičkom aktivnošću, često se koriste čelični okvirni sustavi za preuzimanje seizmičkih sila sa stupovima od hladno oblikovanih šupljih profila. Opsežna istraživanja [20] i iskustva iz Japana opravdala su primjenu takvih stupova. U Americi se češće koriste jednostavni okviri poduprti veznim sustavima od okruglih šupljih profila. Vezni sustavi pridonose razgradnji seizmičke energije tečenjem u vlaku te izvijanjem u tlaku. Istraživanja na okruglim šupljim profilima [21] pokazala su da je za duktilnost mjerodavan faktor vitkosti presjeka (d/t) te da hladno oblikovani kao i toplo dogotovljeni profili zadovoljavaju kriterije za primjenu u seizmički aktivnim područjima.

9. Uvjerjenje o dokazu kvalitete

U suvremenoj građevinskoj industriji jedna od bitnih značajki je dokaz kvalitete proizvoda. Ispitivanje i uvjerenje o kvaliteti za toplo dogotovljene profile proizvedene prema EN 10210 i hladno oblikovane profile proizvedene prema EN 10219 isti su, i suštinski se dijele na dvije kategorije. Prva kategorija odnosi se na specifično ispitivanje (engl. *specific test*), a druga na nespecifično ispitivanje (engl. *non-specific test*). Specifično ispitivanje odnosi se na stvarni korišteni materijal i predstavljeno je certifikatom o ispitivanju (engl. *test certificate*). Takav certifikat osigurava ispravnu prezentaciju kvalitete proizvoda. Nespecifično ispitivanje provodi proizvođač u skladu s vlastitom proizvodnjom i predstavljeno je izvješćem o ispitivanju (engl. *test report*). Takvo izvješće sadrži rezultate ispitivanja koji nisu od proizvoda koji je isporučen, katkada čak ni od proizvoda jednakih dimenzija, i daje samo reprezentativnu vrijednost razreda materijala. Stoga ono

ne osigurava korektnu prezentaciju kvalitete proizvoda. Hladno oblikovani profili koji su prikladni za konstrukcijsku upotrebu moraju imati certifikat o ispitivanju, za razliku od profila za opću inženjersku primjenu za koje se daje izvješće o ispitivanju, i koji imaju nižu cijenu.

Za proizvode iz konstrukcijskog čelika obavezna je oznaka CE (eng. *Conformity European*). Prije nego što je proizvod obilježen s oznakom CE, proizvođači moraju zadovoljiti postupke ocjene sukladnosti prema CPD (eng. *Construction Products Directive*). To znači da CE oznaka i za topla dogotovljene i za hladno oblikovane šuplje pravokutne profile treba pokazati sukladnost s EN 1090 [22, 23] kao i s [1-4, 10]. Dakle, svi profili koji su korektno specificirani, proizvedeni i isporučeni s odgovarajućim certifikatom prikladni su za izvedbu svih tipova čeličnih konstrukcija.

10. Vruće cinčanje

Vruće cinčanje često se koristi za zaštitu od korozije konstrukcijskih elemenata od šupljih profila. Ukoliko hladno oblikovani pravokutni profili nemaju odgovarajuće karakteristike, kod postupka vrućeg cinčanja može doći do raspucavanja uglova. Taj problem pripisuje se efektu LME (eng. *liquid metal embrittlement*) koji je posljedica interakcije triju uvjeta [24]. To su:

- kritična razina zaostalih naprezanja uslijed hladnog oblikovanja ili zavarivanja,
- osjetljiv materijal, npr. neumireni čelik, visok omjer granice tečenja i čvrstoće, već postojeće pukotine zbog oblikovanja ili nepovoljnog kemijskog sastava,
- tekući metal (cink), naročito u slučaju kada sadrži nečistoće ili aditive.

Ispitivanja su pokazala [25, 26] da kvalitetno oblikovani šupljih profila proizvedeni prema EN 10219 klase S355 J2H, S420MH, S500MH nisu osjetljivi na LME. Isto tako, zavareni sklopovi izvedeni od kvalitetno oblikovanih šupljih profila proizvedenih prema EN 10219 od navedenih kvaliteta čelika mogu se vruće cinčati bez opasnosti od LME [26].

LITERATURA

- [1] EN 10210 (2006): Hot finished structural hollow sections of non-alloy and fine grain steels – Part 1: Technical delivery conditions; – Part 2: Tolerances, dimensions and sectional properties.
- [2] EN 10219 (2006): Cold formed welded structural hollow sections of non-alloy and fine grain steels – Part 1: Technical delivery conditions; – Part 2: Tolerances, dimensions and sectional properties.
- [3] Puthli, R., Packer, J. A.: Structural design using cold-formed hollow sections. *Steel Construction*, 6 (2013), No. 2, pp. 150-157.

11. Zaključak

Primjena hladno oblikovanih šupljih profila proizvedenih prema EN 10219 može biti upitna ili ograničena uslijed negativnih utjecaja hladnog oblikovanja na njihovo ponašanje. U pogledu mogućnosti njihovog zavarivanja, hladno oblikovani profili koji zadovoljavaju kriterije iz članka 4.14 EN 1993-1-8 smiju se zavarivati po cijelom opsegu poprečnog presjeka. Nadalje, novi postupak predložen u sklopu dopuna EN 1993-1-10 omogućuje odabir materijala i za hladno oblikovane profile za osiguranje od krto g loma.

Ako se zaštita od korozije izvodi vrućim cinčanjem, hladno oblikovani pravokutni šupljih profila mogu biti osjetljivi na raspucavanje uslijed efekta LME. Odgovarajuće kvalitete pravokutnih šupljih profila mogu se vruće cinčati bez opasnosti od LME.

Elementi od hladno oblikovanih šupljih profila imaju manju otpornost na izvijanje u odnosu na topla dogotovljene. Ipak, s obzirom na nižu cijenu hladno oblikovanih profila, odabir hladno oblikovanog profila većih dimenzija ili deblje stijenke, konačno može rezultirati manjom cijenom konstrukcije. U proračunu otpornosti na izvijanje u slučaju šupljih profila ispunjenih betonom ili za djelovanje požara, između topla dogotovljenih i hladno oblikovanih ne postoje razlike. Hladno oblikovani profili estetski su prihvatljiviji jer imaju glatku površinu što može biti arhitektonska prednost kod konstrukcija koje trebaju imati vidljivu čeličnu strukturu. Često se ne spominje njihova velika prednost koja se odnosi na postizanje boljih geometrijskih tolerancija poprečnog presjeka. Zbog toga se naprimjer kod sučeonog zavarivanja hladnooblikovanih šupljih profila može primijeniti automatsko zavarivanje. Uz veće tolerancije nije moguće izvesti kvalitetan zavar automatskim zavarivanjem, te je potrebno pribjeći "ručnom" zavarivanju što može poskupiti proizvodnju.

U radu je pokazano da hladno oblikovani šupljih profila proizvedeni prema EN 10219, koji su korektno specificirani i isporučeni s odgovarajućim certifikatom, mogu biti pogodni za sve oblike izgradnje čeličnih konstrukcija.

- [4] EN 1993-1-8 (2005): Eurocode 3: Design of steel structures. Part 1-8: Design of joints;
- [5] EN 1993-1-8 (2005): Eurocode 3: Design of steel structures. Part 1-8: Design of joints; including Corrigendum dated July 2009.
- [6] Ummenhofer, T.: Proposal of Amendments or Corrigenda on EN1993-1-8:2005-05, Evolution Group on EN 1993-1-8, 2013.
- [7] EN 1993-1-10 (2010): Eurocode 3: Design of steel structures. Part 1-10: Material toughness and through thickness properties.

- [8] Feldmann, M., Eichler, B., Kühn, B., Stranghöner, N., Dahl, W., Langenberg, P., Kouhi, J., Pope, R., Sedlacek, G., Ritakallio, P., Iglesias, G., Puthli, R. S., Packer, J. A., Krampen, J.: *Choice of steel material to avoid brittle fracture for hollow section structures*. Report EUR 25400 EN, European Commission Joint Research Centre Scientific and Policy Report for the evolution of Eurocode 3, 2012.
- [9] Ongelin, P., Valkonen, I.: *Structural hollow sections. EN 1993 Handbook*, Rautaruukki Oyj, Finland 2012.
- [10] EN 1993-1-1 (2010): Eurocode 3: Design of steel structures. Part 1-1: General rules and rules for buildings.
- [11] EN 1994-1-1 (2010): Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures. Part 1-1: General rules and rules for buildings.
- [12] Androić, B., Dujmović, D., Lukačević, I.: *Projektiranje spregnutih konstrukcija prema Eurocode 4, prvo izdanje*, I.A. Projektiranje, Zagreb, 2012.
- [13] Dujmović, D., Androić, B., Lukačević, I.: *Primjeri proračuna spregnutih konstrukcija prema Eurocode 4, prvo izdanje*, I.A. Projektiranje, Zagreb, 2014.
- [14] HRN EN 1993-1-8 (2008)/NA:2013: Eurokod 3: Projektiranje čeličnih konstrukcija - Dio 1-8: Proračun priključaka - Nacionalni dodatak.
- [15] EN 1993-1-9 (2010): Eurocode 3: Design of steel structures. Part 1-9: Fatigue.
- [16] Zhao, X. L., Herion, S., Packer, J. A., Puthli, R., Sedlacek, G., Wardenier, J., Weynand, K., van Wingerde, A. M., Yeomans, N.: *Design guide for circular and rectangular hollow section welded joints under fatigue loading, CIDECT Design Guide No. 8*. Köln: TÜV-Verlag 2000.
- [17] Bäckström, M. et al.: A new fatigue testing method for the corners of structural hollow Sections. Design and Analysis of Welded High-Strength Steel Structures, Proceedings of Fatigue 2002, 8th International Fatigue Congress, Stockholm, 2–7 June 2002, pp. 277–302.
- [18] Twilt, L., Hass, R., Klingsch, W., Edwards, M., Dutta, D.: *Design guide for structural hollow section columns exposed to fire. CIDECT Design Guide No. 4*. Köln: TÜV-Verlag 1994.
- [19] EN 1993-1-2 (2010): Eurocode 3: Design of steel structures. Part 1-2: General rules – Structural fire design.
- [20] Kurobane, Y., Packer, J. A., Wardenier, J., Yeomans, N.: *Design guide for structural hollow section column connections. CIDECT Design Guide No. 9*, Köln: TÜV-Verlag 2004.
- [21] Packer, J. A., Chiew, S. P., Tremblay, R., Martinez-Saucedo, G.: Effect of material properties on hollow section performance. Structures and Buildings, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers* 163 (2010), No. SB6, pp. 375–390.
- [22] EN 1090-1 (2006): Steel and aluminium structural components. Part 1: General delivery conditions.
- [23] EN 1090-2 (2007): Steel and aluminium structural components. Part 2: Technical requirements for steel structures.
- [24] Galvanizing structural steelwork – An approach to the management of liquid metal-assisted cracking. BCSA & GA Publication No. 40/05, 1st Ed., British Constructional Steelwork Association & Galvanizers Association, London, 2005.
- [25] Poag, G., Zervoudis, J.: Influence of various parameters on steel cracking during galvanizing. AGA Tech Forum, Kansas, MO, USA, 2003.
- [26] Ritakallio, P. O.: Cold-formed high-strength tubes for structural applications. *Steel Construction*, 5 (2012), No. 3, pp. 158–167.