

Primjena sastavljenih nosača od hladno oblikovanih čeličnih profila s valovitim hrptom

Emanuel Krupa-Jurić¹, izv. prof. dr. sc. **Ivan Lukačević²**

¹Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, emanuel.krupa.juric@grad.unizg.hr

²Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, ivan.lukacevic@grad.unizg.hr

Sažetak

U radu su istraženi sastavljeni nosača od hladno oblikovanih čeličnih profila s valovitim hrptom povezanih točkastim zavarima. Primjenom hladno oblikovanih čeličnih presjeka i valovitog hrpta postizemo lagani, konstruktivno učinkoviti i ekonomični nosač koji može imati različite primijene. Osim konstrukcijskih prednosti, takav konstrukcijski element ima potencijal za automatiziranu proizvodnju i prednosti u pogledu održivosti. Kako valoviti hrbat i način spajanja hladno oblikovanih elemenata imaju veliku ulogu u ponašanju nosača istražen je njihov utjecaj. Također, istražene su i moguće primjene ovakvih nosača.

Ključne riječi: hladno oblikovani čelik, sastavljeni nosači, točkasti zavari, valoviti hrbat, spregnuta međukatna konstrukcija

Application of built-up corrugated web cold-formed steel girder

Abstract

The study investigates built-up corrugated web cold-formed steel girders that are connected by spot welds. By using cold-formed steel sections and a corrugated web, a lightweight, structurally efficient, and economical girder is achieved, which has various applications. In addition to structural advantages, such an element also has the potential for automated production and offers sustainability benefits. Since the corrugated web and the method of connecting cold-formed elements significantly influence the behaviour of the beam, their effects were examined. Possible applications of these beams were also explored.

Key words: cold-formed steel, built-up beams, resistance spot welds, corrugated web, composite floor system

1 Uvod

Hladno oblikovani profili (eng. *Cold Formed Steel* - CFS) imaju veliku primjenu u građevinarstvu kao sekundarni elementi, a u zadnjim godinama raste interes za upotrebu CFS profila kao primarnih elementa. Atraktivne karakteristike CFS profila su njihova mala vlastita težina i raznolikost oblika poprečnih presjeka koji se oblikuju točno prema zahtjevima namjene. Također, sloboda u oblikovanju poprečnih presjeka omogućuje izvedbu konstruktivno racionalnih presjeka bez nepotrebnog utroška materijala. Mala vlastita težina omogućuje jednostavan transport i montažu na gradilištu. Nadalje, CFS profili imaju veliku otpornost na koroziju. Antikorozivna zaštita se izvodi vrućim cinčanjem limova čija je prednost u tome što nakon hladnog oblikovanja nije potrebno dodatno obrađivati površinu i zaštita može biti učinkovita tijekom cijelog životnog vijeka građevine. Osim konstruktivnih prednosti, CFS profili imaju veliki potencijal u pogledu održivosti. Negativni utjecaji na okoliš uslijed transporta i montaže su znatno smanjeni upotrebom CFS profila. Na kraju životnog vijeka, moguća je demontaža i reciklaža ili ponovna upotreba profila.

Upotreba tankih limova i složene geometrije presjeka uzrokuju i određene poteškoće kod dokaza mehaničke otpornosti i stabilnosti kao što su pojave globalnih, lokalnih i distorzijskih oblika gubitka stabilnosti te interakcije između navedenih oblika. Interakcija između lokalnih i globalnih oblika otkazivanja čini CFS profile izrazito osjetljivim na nesavršenosti radi čega dolazi do redukcije teorijske vrijednosti otpornosti. S obzirom na to da su nesavršenosti uvijek prisutne, interakcija lokalnih i globalnih oblika otkazivanja su kod CFS profila uvijek prisutne. Osim toga, tankostijeni nosači otvorenog presjeka imaju malu torzijsku krutost. Kod jedno osno simetričnih presjeka postoji opasnost od značajnih torzijskih deformacija ako opterećenje ne djeluje u centru posmika [1].

Navedene nedostatke moguće je umanjiti ili čak izbjeći povezivanjem pojedinačnih CFS profila pri čemu je moguće dobiti presjeke simetrične oko obje osi s većom torzijskom krutosti i većom otpornošću. Prema navedenom, može se zaključiti da je upotrebom sastavljenih profila moguće ostvariti ideju primjene CFS profila kao primarnih elemenata u konstrukcijama [2].

Primjer inovativnog tehničkog rješenja je sastavljeni nosač kojemu je hrbat izveden valovitim limom na kojeg su povezane četiri pojasnice od C profila (eng. *Corrugated web beam* - CWB), slika 1.



Slika 1. CWB nosač i njegove komponente

U radu su istraženi sastavljeni CWB nosači kao potencijalno lagani, konstruktivno učinkoviti i ekonomični konstrukcijski elementi koji imaju potencijal za automatiziranu proizvodnju te prednosti u pogledu održivosti. Kako valoviti hrbat i način spajanja imaju veliku ulogu u ponašanju nosača detaljnije je obuhvaćen njihov utjecaj, a zatim moguće primjene.

2 Bitni aspekti ponašanja CWB nosača

2.1 Povezivanje CFS profila

Postoji više mogućih rješenja spajanja pojedinih CFS profila kao što su već spomenuti vijci, zakovice i različiti načini zavarivanja. S obzirom na to da CFS profili imaju vrlo tanke stijenke, u slučaju zavarivanja konvencionalne metode nisu primjenjive [1,3]. Prema tome, optimalno rješenje spajanja treba odrediti ovisno o prikladnosti metode spajanja za konkretan slučaj, mehaničkim karakteristikama spoja te karakteristika proizvodnog procesa i cijene.

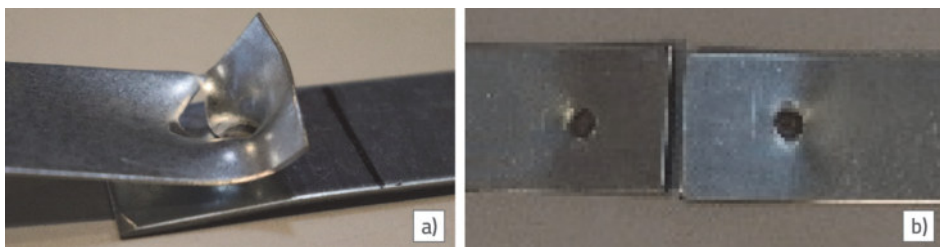
U radu [4] provedena je usporedna studija zakovica (eng. Self-Pierce Riveting - SPR), elektro otpornog točkastog zavarivanja (eng. Resistance Spot Welding - RSW) i točkastog spajanja pomoću trenja (eng. Spot Friction Joining - SFJ). Spojevi sa zakovicama imaju najbolje mehaničke karakteristike, ali je primjena opravdana samo u slučaju značajnih zahtjeva za mehaničkom otpornošću zbog visoke cijene i ograničenja proizvodnog procesa. SFJ spojevi imaju prednost u pogledu potrošnje energije i izvedbe velikog broja istih spojeva, ali su ograničeni u pogledu vremena proizvodnje, debljine limova koji se spajaju te imaju slabije mehaničke karakteristike u odnosu na SPR i RSW. Kao optimalno rješenje se pokazalo RSW, uzimajući u obzir mehaničke karakteristike, cijenu proizvodnje, mogućnost automatizacije i masovne proizvodnje.

Lasersko zavarivanje je također jedna od mogućnosti povezivanja, ali otpornost spoja između limova s pocinčanom površinom u nekim slučajevima može biti značajno reducirana. Isto tako, otpornost je uvjetovana razmakom limova koji se povezuje, a u slučaju većeg razmaka zavarivanje nije moguće [2].

Spajanje pojedinih CFS profila moguće je i samobušećim vijcima, ali veza ostvarena samobušećim vijcima je posmično podatljiva te dolazi do proklizavanja između elemenata što nije slučaj kod RSW spojeva. Primjenom točkastih zavara nema relativnog pomaka između elemenata, prema tome nosač s točkastim zavarima ima veću otpornost i krutost u odnosu na nosač sa samobušećim vijcima [3,5].

Eksperimentalna i numerička istraživanja u [5,6] rezultirala su mehaničkim karakteristikama i načinima otkazivanja točkastih zavara. Moguća su dva oblika otkazivanja, 'full button pull out', prikazan na slici 2 a), kod kojega dolazi do otkazivanja limova u okolini zavara i 'interfacial fracture failure', prikazan na slici 2 b), kod

kojega dolazi do otkazivanja zavora. Najčešći oblik otkazivanja je 'full button pull out', ali otpornost spoja nije uvjetovan oblikom otkazivanja. Osobitost ovog spoja je ta što je krajnja otpornost ograničena plastičnom otpornošću tanjeg lima.



Slika 2. Oblici otkazivanja RSW spojeva: a) full button pull out; b) interfacial fracture failure

2.2 Valoviti hrbat

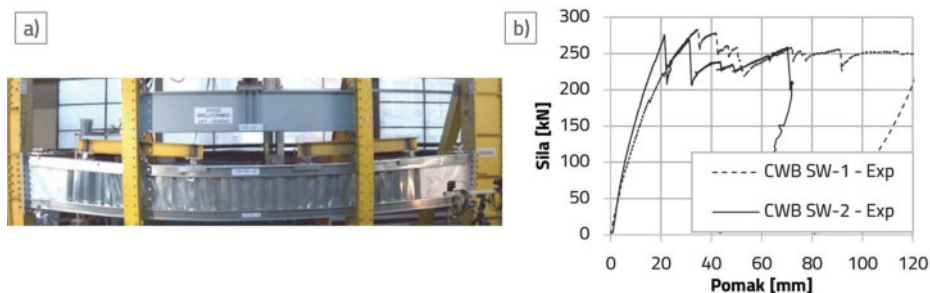
Nosači s valovitim hrptovima se primjenjuju zadnjih nekoliko desetljeća u zgradarstvu i mostogradnji. Primjena valovitih hrptova opravdana je sa konstrukcijskog i ekonomskog stajališta. Valoviti hrptovi imaju veću stabilnost nego ravni hrptovi čime je moguća znatna ušteda u materijalu. U odnosu na konvencionalno proizvedene presjeke procijenjena ušteda je između 10 i 30%, a u odnosu na vruće valjane profile i više od 30%. Otpornost na izvijanje valovitog hrpta debljine od 1.5 do 3 mm je konkurenta otpornosti na izvijanje ravnog hrpta debljine 12 mm [7]. Također, nisu potrebna dodatna vertikalna ukrućenja čime se znatno smanjuje vrijeme izrade i povećava otpornost na umor [8]. Valoviti hrbat sudjeluje samo u prijenosu poprečnih sila dok se moment savijanja prenosi pojasnicama. Prema rezultatima istraživanja nema naznake interakcije savijanja i poprečnih sila [9]. Ovisno o geometriji valovitog hrpta mogu se javiti lokalni i globalni gubitak stabilnosti te njihova interakcija. Kod lokalnog izbočivanja, valoviti hrbat se promatra kao niz ravnih limova pridržanih pojasnicama i po visini s susjednim limovima valovitog hrpta. U slučaju gušćeg rasporeda valova, javlja se globalno izvijanje [10]. Analiza bočno torzijskog izvijanja nosača s valovitim hrptom je pokazala kako je otpornost u odnosu na nosače s ravnim hrptom veća do 10% [11].

3 Primjena sastavljenih nosača od CFS profila s valovitim hrptom

3.1 Eksperimentalna i numerička parametarska analiza CWB nosača

U radu [12] autori su proveli numeričku i eksperimentalnu studiju CWB nosača. Svi čelični CFS profili su međusobno spojeni sa SRW. Nosači su raspona 5157 mm i visine poprečnog presjeka od 600 mm. Eksperimentalno su ispitana dva nosača

s posmičnim limovima različitih dimenzija i debljine. Također, istražen je različiti način povezivanja valovitih hrptova s obzirom na to da je valoviti hrbat sastavljen od više limova. Na jednom nosaču su dijelovi hrpta povezani jednim redom točkastih zavora, a na drugom u dva reda. Oba nosača su imala jednak slijed otkazivanja. Prvo je došlo do otkazivanja posmičnih panela, zatim distorzija valovitih hrptova i na kraju, nakon dosezanja krajnje sile došlo je do otkazivanja pojedinih zavora. Rezultati ispitivanja nosača prikazani su na slici 3. Analizom krivulja sila – pomak zaključeno je kako se nosači ponašaju duktilno s vrlo dobrom otpornošću. Također, usporedbom krivulja uočeno je kako na duktilnost, a u manjoj mjeri na otpornost utječe konfiguracija veze između dijelova valovitog hrpta. Nosač u kojemu su valoviti limovi povezani u dva reda točkastih zavora ima gotovo dvostruko veći krajnji pomak.



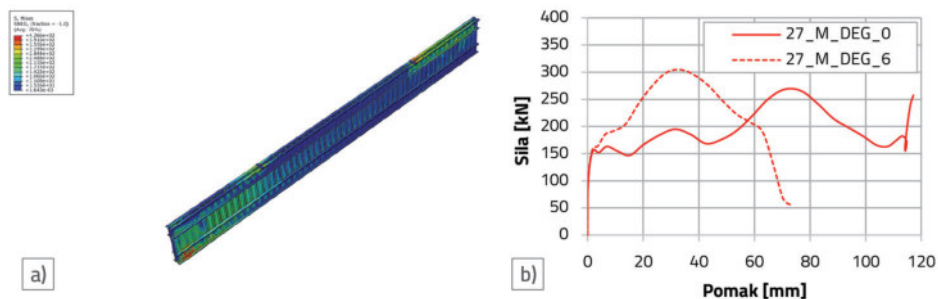
Slika 3. Eksperimentalno ispitivanje CWB nosača [13]: a) deformacija nosača prilikom ispitivanja; b) dijagram sila-pomak

U daljnjim analizama CWB nosača autori rada [13] napravili su numeričku parametarsku analizu s ciljem identifikacije komponenata nosača koje značajno utječu na otpornost. U radu su ispitali utjecaj sljedećih parametara: rubni uvjeti, jednostruki i dvostruki valoviti hrbat, broj točkastih zavora na pojasnicama, razmak točkastih zavora na pojasnicama, debljina pojasnica, debljina valovitog hrpta i debljina posmičnog panela. Usporedbom rezultata nosača s nominalno upetim i zglobnim ležajevima zaključeno je kako je moguće značajno smanjiti kompleksnost sustava izvedbom zglobnih ležajevima jer je redukcija otpornosti zanemariva. S druge strane, krutost i otpornost značajno rastu izvedbom nosača s dvostrukim valovitim hrptom. Također, broj točkastih zavora na pojasnici imaju određeni utjecaj na ponašanje. Inicijalna krutost nosača s dva i tri zavora na pojasnici je gotovo ista, ali postoji odstupanje u krajnjoj otpornosti. U slučaju tri zavora, zavori nisu bili oštećeni dok je u slučaju dva zavora došlo do otkazivanja zavora i naglog pada krutosti i otpornosti. S manjim brojem zavora dolazi do većeg razdvajanja profila što znači da broj zavora utječe na način otkazivanja pa samim time i na otpornost. Suprotno tomu, razmak između zavora na pojasnici

ima zanemariv utjecaj. Debljine pojasnica i valovitog hrpta imaju značajnu ulogu u otpornosti. Za male debljine pojasnica otpornost na savijanje je vrlo mala zbog rane pojave instabiliteta pojasnice a i zbog otkazivanja zavora. S većom debljinom valovitog hrpta se postiže veća otpornost, a dolazi i do promjene načina izvijanja i kod većih debljina nema otkazivanja zavora. Većom debljinom posmičnih panela postiže se veća otpornost, ali je utjecaj manji nego što je to slučaj kod debljine valovitog hrpta.

3.2 Numerička analiza CWB nosača većih raspona

Nadalje, u radu [14] provedena je numerička parametarska analiza CWB nosača za veće raspone. U gore navedenim radovima analizirani su rasponi nosača do 6 m, a u ovom radu autori proširuju analizu na raspone od 12 m i 27 m. Na Slici 4 a) prikazan je deformirani oblik, raspodjela von Mises naprezanja kod doseganja maksimalnog kapaciteta za polovicu modela raspona 27 m, a na slici 4 b) prikazan je pripadni dijagram sila-pomak. Uzimajući u obzir primjere industrijskih građevina, jednostrešni i dvostrešni krovovi podrazumijevaju nosače u nagibu pa je stoga analiziran i taj slučaj. Osim raspona i nagiba nosača, analiziran je utjecaj debljina posmičnog panela, visina i debljina pojasnica, debljina valovitog hrpta i visina poprečnog presjeka. Utjecaj debljina pojedinih komponenata jednak je kao i u radu [13]. Povećanjem momenta tromosti C profila otpornost se ne povećava jer nosač otkazuje na posmičnim komponentama što je osobito za nosače manjih raspona. Kod nosača većih raspona zbog povećanja omjera momenta i poprečne sile dolazi do koncentracije naprezanja na ležajevima. To uzrokuje tečenje koje se vidi kao plastični plato u dijagramu sila-pomak. Kod nosača pod nagibom, javlja se uzdužna tlačna sila i dolazi do redukcije momenta savijanja i poprečne sile. Iako se javlja uzdužna tlačna sila, zbog redukcije momenta savijanja i poprečne sile, nagib nosača povoljno utječe na krutost i otpornost. Kod većih raspona opažena je distorzija pojasnica.



Slika 4. Rezultati numeričke analize CWB nosača većih raspona [14]: a) Deformirani oblik i raspodjela von Mises naprezanja za nosač raspona 27 m; b) Dijagram sila pomak za nosač raspona 27 m

3.3 Eksperimentalna i numerička analiza CWB nosača s otvorima

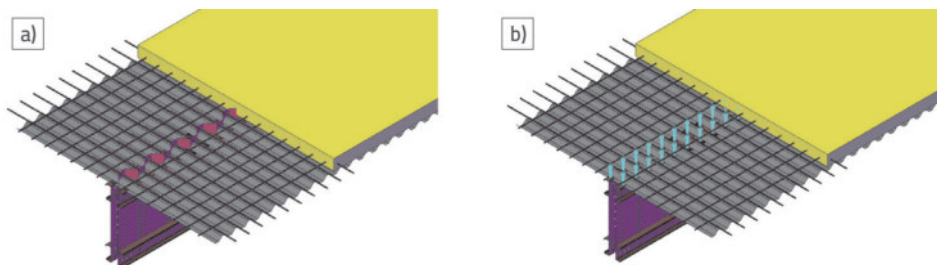
Moguća primjena CWB nosača je i u međukatnim konstrukcijama. U tom slučaju, potrebno je omogućiti prostor za vođenje instalacija izvođenjem otvora u hrptu. U radu [15] predstavljena je eksperimentalna i numerička analiza takvog elementa. Autori su ispitali dvije konfiguracije ojačanja otvora na pojedinim nosačima. Prvo ojačanje je izvedeno ravnim čeličnim limom točkasto zavarenim s jedne strane zbog ne mogućnosti zavarivanja i sa druge strane. Također, lim je savinut pod pravim kutom i točkasto zavaren na pojasnicu kako bi dodatno ojačao konturu otvora. Drugi otvor je ojačan tako što je lim savijen u obliku konture i zavaren MIG postupkom (eng. Metal Inert Gas - MIG). Položaj otvora se odredio tako da se izbjegnu maksimalna naprezanja od posmika na ležaju i od savijanja na polovini raspona, a visina otvora određena je prema dimenzijama instalacija dok je širina uvjetovana razmakom između valova hrpta. Primijećene su znatne deformacije u dijelu nosača između otvora i bližeg ležaja. Otkazivanje je išlo sljedećim tokom: izbočivanje posmičnih panela, deformacija kutova otvora, distorzija valovitog hrpta u blizini ležajeva, posmično izbočivanje valovitog hrpta, otkazivanje točkastih zavora pri povećanju ostalih deformacija i lokalno izbočivanje pojasnica u mjestima unosa sile. S obzirom na to da se jedino razlikuje način ojačavanja otvora, usporedbom rezultata se zaključilo kako nosač u kojemu je lim zavaren MIG zavarivanjem ima veću krutost i otpornost jer zavar sprečava distorziju valovitog lima. U slučaju točkastog zavarivanja došlo je do distorzije valovitog lima u početnim fazama opterećivanja što je uzrokovalo pad krutosti. Iako rješenje ojačanja otvora s MIG zavarivanjem ima veću krutost i otpornost, radi jednostavnije izvedbe i mogućnosti automatizacije proizvodnog procesa kao optimalno rješenje odabrano je rješenje u kojemu je ojačanje spojeno točkastim zavarima. Analizom je utvrđeno kako izvedba ojačanja otvora ima vrlo pozitivan učinak te dolazi do manjih redukcija u otpornosti i krutosti koje mogu biti vrlo značajne u slučaju izvedbe otvora bez ojačanja.

3.4 LWT-FLOOR sustav

Konkretna primjena CWB nosača u međukatnim konstrukcijama je ostvarena LWT-FLOOR projektom [16]. Prikaz sustava i rješenja ostvarivanja posmičnog spoja kod LWT-FLOOR sustava prikazana su na slici 5.

U okviru projekta provedena su opsežna eksperimentalna i numerička istraživanja predloženog sustava. Rad [17] obrađuje rezultate eksperimentalnog ispitivanja točkastih zavora, 'push-out' ispitivanja demontažnog posmičnog spoja i savijanje spregnutog CWB nosača s ciljem kalibracije numeričkih modela. Nadalje, autori su u radu [18] proveli numeričku analizu savijanja spregnute međukatne konstrukcije od CFS sastavljenog nosača i betona. Usporedba eksperimentalnih i

numeričkih rezultata pokazuje vrlo dobro poklapanje. U parametarskoj analizi ispitani su utjecaji sljedećih parametara: stupanj posmične veze, gustoća točkastih zavora, klasa betona, debljina čeličnih limova i promjer moždanika. Analizom je zaključeno da na otpornost na savijanje nosača najviše utječu gustoća točkastih zavora, debljina limova i stupanj posmičnog spoja veze kao najznačajniji parametar.



Slika 5. LWT-FLOOR sustav-rješenja ostvarivanja posmičnog spoja: a) Betonski moždanici; b) Demontažni moždanici s glavom

4 Zaključak

U radu su istraženi sastavljeni CWB nosači sastavljeni od C profila kao pojasnica i valovitog hrpta koji su povezani RSW zavarima. Takvom kombinacijom hladno oblikovanih čeličnih profila i limova postiže se vrlo lagani nosač s izvrsnim mehaničkim karakteristikama. Primjena valovitog hrpta omogućuje upotrebu vrlo tankih limova zbog odlične otpornosti na izvijanje čime se značajno smanjuje vlastita težina nosača i cijena te se pojednostavljuje izvedba jer nije potrebno izvoditi ukrčenja. Dosadašnja istraživanja CWB nosača pokazala su kako imaju veliku otpornost i duktilnost te da je moguća izvedba nosača velikih raspona kao sastavni dio čelične okvirne konstrukcije ili u kombinaciji s betonskom pojasnicom međukatne konstrukcije. Osim konstrukcijskih prednosti, takav konstrukcijski element ima potencijal za automatiziranu proizvodnju i prednosti u pogledu održivosti. S obzirom da za ovakav čelični element ne postoji normirani postupak proračuna, potrebno je privesti daljnja istraživanja za primjene u različitim uvjetima.

Financiranje

Ovaj rad je sufinancirala Hrvatska zaklada za znanost projektom UIP-2020-02-2964 (LWT-FLOOR).

Literatura

- [1] Dubina D, Ungureanu V, Landolfo R. Design of Cold-formed Steel Structures. Wiley; 2012. <https://doi.org/10.1002/9783433602256>.
- [2] Landolfo R, Mammana O, Portioli F, Di Lorenzo G, Guerrieri MR. Laser welded built-up cold-formed steel beams: Experimental investigations. *Thin-Walled Structures* 2008;46:781–91. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2008.03.009>.
- [3] Rasmussen KJR, Khezri M, Schafer BW, Zhang H. The mechanics of built-up cold-formed steel members. *Thin-Walled Structures* 2020;154:106756. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2020.106756>.
- [4] Briskham P, Blundell N, Han L, Hewitt R, Young K, Boomer D. Comparison of Self-Pierce Riveting, Resistance Spot Welding and Spot Friction Joining for Aluminium Automotive Sheet, 2006. <https://doi.org/10.4271/2006-01-0774>.
- [5] Ungureanu V, Both I, Burca M, Tunea D, Grosan M, Neagu C, et al. WELDING TECHNOLOGIES FOR BUILT-UP COLD-FORMED STEEL BEAMS: EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS . Ninth International Conference on Advances in Steel Structures (ICASS'2018), Hong Kong: 2018.
- [6] Rajić A, Lukačević I, Ćurković I, Žuvelek V. Performance evaluation of cold-formed steel spot weld connections. *Ce/Papers* 2023;6:1959–64. <https://doi.org/10.1002/cepa.2627>.
- [7] Ungureanu V, Dubina D. Influence of Corrugation Depth on Lateral Stability of Cold-Formed Steel Beams of Corrugated Webs. *Acta Mechanica et Automatica* 2016;10:104–11. <https://doi.org/10.1515/ama-2016-0017>.
- [8] Elgaaly M, Seshadri A, Rodriguez R, Ibrahim S. Bridge Girders with Corrugated Webs. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2000;1696:162–70. <https://doi.org/10.3141/1696-19>.
- [9] Elgaaly M, Seshadri A, Hamilton RW. Bending Strength of Steel Beams with Corrugated Webs. *Journal of Structural Engineering* 1997;123:772–82. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1997\)123:6\(772\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1997)123:6(772)).
- [10] Elgaaly M, Hamilton RW, Seshadri A. Shear Strength of Beams with Corrugated Webs. *Journal of Structural Engineering* 1996;122:390–8. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1996\)122:4\(390\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1996)122:4(390)).
- [11] Moon J, Yi J-W, Choi BH, Lee H-E. Lateral–torsional buckling of I-girder with corrugated webs under uniform bending. *Thin-Walled Structures* 2009;47:21–30. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2008.04.005>.

- [12] Ungureanu V, Both I, Burca M, Radu B, Neagu C, Dubina D. Experimental and numerical investigations on built-up cold-formed steel beams using resistance spot welding. *Thin-Walled Structures* 2021;161:107456. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2021.107456>.
- [13] Lukačević I, Ungureanu V. Numerical parametric study on corrugated web built-up beams with pinned end supports. *Cold-Formed Steel Research Consortium Colloquium 2022, Baltimore (MD); 2022*.
- [14] Ungureanu V, Lukačević I, Both I, Dubina D. Numerical investigations on built-up cold-formed steel beams for long spans. *Ce/Papers* 2021;4:2277–84. <https://doi.org/10.1002/cepa.1550>.
- [15] Cristian AA, Ungureanu V. Parametric Study on Built-Up Cold-Formed Steel Beams with Web Openings Connected by Spot Welding. *Buildings* 2023;13:237. <https://doi.org/10.3390/buildings13010237>.
- [16] Lukačević I, Ćirković I, Rajić A, Bartolac M. Lightweight Composite Floor System-Cold-Formed Steel and Concrete-LWT-FLOOR Project. *Buildings* 2022;12:209. <https://doi.org/10.3390/buildings12020209>.
- [17] Lukačević I, Ćirković I, Rajić A, Žuvelek V. Advancements in Lightweight Cold-Formed Composite Steel-Concrete Floor Systems: Recent Findings from the LWT-FLOOR Project. *IABSE Congress San Jose 2024 Beyond Structural Engineering in a Changing World, San Jose: 2024*, p. 64–72. <https://doi.org/10.2749/sanjose.2024.0064>.
- [18] Rajić A, Lukačević I, Ćirković I, Žuvelek V. Numerical study of cold-formed steel-concrete composite floor system with demountable shear connectors. *Cold-Formed Steel Research Consortium Colloquium 2022 (CFSRC Colloquium 2022), Baltimore: Baltimore (MD); 2022*.