

Društvo građevinskih konstruktora Srbije

SIMPOZIJUM 2020

13-15. maj 2021- ARANĐELOVAC

ZBORNIK RADOVA SA NACIONALNOG SIMPOZIJUMA DGKS



U SARADNJI SA



Република Србија
Министарство
просвете, науке и
технолошког развоја

POKROVITELJ



PLATINASTI SPONZORI

Metal **ink** ara

ŠIRBEGOVIĆ®
INŽENJERING

DELTA
REAL ESTATE

baldini
studio

INTERNATIONAL

STRABAG
TEAMS WORK.

PUT INŽENJERING

ZLATNI SPONZORI



ARMONT
LICA ZGRADA

MORAVACEM
A CRH COMPANY

PERI®

ProClub

MG
PRECAST D.O.O.

DNEC

CIP - Каталогизација у публикацији
Народна библиотека Србије, Београд

624(082)(0.034.2)
69(082)(0.034.2)

ДРУШТВО грађевинских конструктора Србије. Симпозијум 2020 (2021 ; Аранђеловац)
Zbornik radova sa Nacionalnog simpozijuma DGKS [Elektronski izvor] / Društvo
građevinskih konstruktera Srbije, Simpozijum 2020, 13-15. maj 2021, Arandelovac ; [urednici
Zlatko Marković, Ivan Ignjatović, Boško Stevanović]. - Beograd : Univerzitet, Građevinski
fakultet : Društvo građevinskih konstruktera Srbije, 2021 (Arandelovac : Grafopak). - 1 USB
fleš memorija ; 5 x 2 x 1 cm

Sistemska zahtevi: Nisu navedeni. - Nasl. sa naslovne strane dokumenta. - Radovi na srp. i
engl. jeziku. - Tiraž 200. - Bibliografija uz svaki rad. - Summaries.

ISBN 978-86-7518-211-5 (GF)

a) Грађевинарство -- Зборници
COBISS.SR-ID 37696777

Izdavač: Univerzitet u Beogradu Građevinski fakultet
Beograd, Bulevar kralja Aleksandra 73/1

Suizdvač: Društvo građevinskih konstruktera Srbije
Beograd, Bulevar kralja Aleksandra 73

Urednici: prof. dr Zlatko Marković
v.prof. dr Ivan Ignjatović
prof. dr Boško Stevanović

Tehnički urednik: v.prof. dr Jelena Dobrić

Tehnička priprema: doc. dr Nina Gluhović
doc. dr Marija Todorović
Isidora Jakovljević

Gafički dizajn: Tijana Stevanović

Dizajn korica: Tijana Stevanović

Štampa: Grafopak, Arandelovac

Tiraž: 200 primeraka

Beograd, maj 2021.

Aljoša Filipović¹, Jelena Dobrić², Dragan Blagojević³, Mileva Samardžić – Petrović⁴, Dragan Buđevac⁵, Zlatko Marković⁶

POČETNE IMPERFEKCIJE STUBOVA RAVNOKRAKOG L POPREČNOG PRESEKA OD NERĐAJUĆEG ČELIKA

Rezime:

Rad prikazuje merenje početnih geometrijskih imperfekcija i zaostalih napona u okviru istraživanja nosivosti centrično pritisnutih elemenata L poprečnog preseka od nerđajućeg čelika. Istraživanjem su obuhvaćena tri različita tipa L profila – hladnooblikovani, vrućevaljani i laserski zavareni. Postupak i rezultati merenja početnih geometrijskih imperfekcija primenom sistema za lasersko merenje prezentovani su u radu. Merenje zaostalih napona metodom sečenja sprovedeno je na vrućevaljanom i laserski zavarenom uzorku nominalnih dimenzija $100 \times 100 \times 10$, napravljenih od austenitnog nerđajućeg čelika EN 1.4301. Postupak merenja zaostalih napona i rezultati u formi rasporeda zaostalih napona i ekstremnih vrednosti prikazni su u radu.

Ključne reči: nerđajući čelik, L poprečni presek, izvijanje, imperfekcije, zaostali naponi

INITIAL IMPERFECTIONS OF STAINLESS STEEL EQUAL-LEG ANGLE COLUMNS

Summary:

The paper presents initial geometric imperfections and residual stresses measurement as a part of a research on ultimate capacity of axially compressed angle columns made from stainless steel. The research covers three different angle types – cold-formed, hot-rolled and laser-welded. The procedure and results of initial geometric imperfections measurements using a laser measurement system are presented. Measurement of residual stresses using a sectioning method was performed on hot-rolled and laser-welded samples with nominal dimensions of $100 \times 100 \times 10$, made of austenitic stainless steel EN 1.4301. The procedure of residual stresses measurement and obtained results in form of residual stresses distribution and extreme values are presented.

Key words: stainless steel, angle section, buckling, imperfections, residual stresses

¹ MSc, asistent – student doktorskih studija, Bulevar kralja Aleksandra 73 Beograd, afilipovic@grf.bg.ac.rs

² Dr, vanredni profesor, Bulevar kralja Aleksandra 73 Beograd, jelena@imk.grf.bg.ac.rs

³ Dr, redovni profesor, Bulevar kralja Aleksandra 73 Beograd, bdragan@grf.bg.ac.rs

⁴ Dr, docent, Bulevar kralja Aleksandra 73 Beograd, mimas@grf.bg.ac.rs

⁵ Dr, profesor emeritus, Bulevar kralja Aleksandra 73 Beograd, budjevac@grf.bg.ac.rs

⁶ Dr, redovni profesor, Bulevar kralja Aleksandra 73 Beograd, zlatko@grf.bg.ac.rs

1. UVOD

Nosivost centiročno pritisnutih čeličnih elemenata određena je gubitkom njihove globalne stabilnosti, koja se, u zavisnosti od oblika poprečnog preseka, dužine elementa i graničnih uslova, opisuje fleksionim, torziono-fleksionim ili torzionim izvijanjem. Osim navedenih karakteristika, značajan uticaj na graničnu nosivost pritisnutog elementa imaju strukturne imperfekcije. Raspored i veličina početnih imperfekcija nije definisana preciznom zakonitošću pojave, koja za značajan broj konstruktivnih čeličnih elemenata i dalje predstavlja nepoznanicu. Kontrolom kvaliteta proizvodnje čeličnih elemenata, kontrolom proizvodnje i montaže čelične konstrukcije obezbeđuje se da veličine strukturnih imperfekcija budu u okvirima dopuštenih tolerancija. U opštem slučaju, nosivost pritisnutih elemenata na izvijanje uslovljena je sa tri tipa strukturnih imperfekcija:

- geometrijske imperfekcije koje uključuju početne globalne geometrijske nesavršenosti (početna zakrivljenost ose štapa u odnosu na idealizovanu osu) i odstupanja stvarnih dimenzija poprečnog preseka od nominalnih vrednosti;
- materijalne imperfekcije koje uključuju nehomogenost materijala (promene u mehaničkim svojstvima materijala) i zaostale napone;
- imperfekcije veza koje mogu biti posledica odstupanja geometrije izvedene veze stuba sa drugim elementima ili detalja oslanjanja stuba u odnosu na projektovana, nominalna rešenja.

Maksimalne vrednosti početnih geometrijskih imperfekcija ne smeju prelaziti vrednosti tolerancija koje su definisane u relevantnim standardima koji se odnose na proizvodnju čeličnih elemenata.

U procesu proizvodnje čeličnih elemenata usled neravnomernog zagrevanja ili hlađenja kod vrućevaljanih ili zavarenih preseka, ili trajnih plastičnih deformacija kod hladnooblikovanih preseka, u čeličnim elementima se javljaju uravnoteženi zaostali naponi. Raspored i veličina zaostalih napona zavisi od proizvodnog procesa, oblika i dimenzija (debljine zida) poprečnog preseka.

Pored mnogobrojnih istraživanja ponašanja centrično pritisnutih elemenata ravnokrakog L poprečnog preseka od ugljeničnog čelika, broj ispitivanja L profila na ovom tipu elemenata od nerđajućeg čelika je vrlo ograničen, što je motivisalo više naučnih grupacija da se posvete ovoj naučnoj tematici u poslednjih nekoliko godina. U objavljenim radovima koji se bave analizom stubova L preseka od nerđajućeg čelika prezentovana su merenja početnih geometrijskih imperfekcija [1], [2], [3], [4], [5], [6], ali ne i merenje zaostalih napona. Različita termička providljivost ugljeničnog čelika u odnosu na nerđajući čelik navodi na zaključak da raspored i veličina zaostalih napona nije ista kod konstruktivnih elemenata izrađenih od ovih materijala.

Razvojem tehnologije zavarivanja, pored tradicionalnih procesa proizvodnje profila L preseka postupkom vrućeg valjanja i hladnog oblikovanja, poslednjih godina se na tržištu nalazi i tip elemenata dobijen postupkom laserskog zavarivanja (slika 1). Vrućevaljani ugaonici dostupni su na tržištu sa različitim debljinama zidova kraka, ali sa maksimalnom širinom kraka od 150 mm [7]. Postupcima hladnog oblikovanja ili laserskog zavarivanja mogu se dobiti L profili sa većim dimenzijama kraka. Laserski zavareni L profili predstavljaju najsavremeniji tip proizvoda od nerđajućih čelika, jer ovaj postupak uključuje primenu specijalizovanih lasera za međusobno zavarivanje ravnih čeličnih limova bez primene dodatnog materijala za zavarivanje. Postupkom laserskog zavarivanja, dobijaju se proizvodi koje karakterišu preseki sa oštrim uglovima bez

zaobljenja i vidnog šava. Hladnooblikovani elementi L poprečnog preseka najčešće se dobijaju postupkom presovanja na sobnoj temperaturi, primenom hladnovaljanih traka u debljini od 1 do 6 mm. Plastičnim deformacijama u zonama prevoja uganika dobijenim postupkom hladnog oblikovanja dolazi do značajnog poboljšanja mehaničkih svojstava materijala, što ima značajan benefit na graničnu nosivost elemenata od nerđajućeg čelika u oblasti male vitkosti.



(a) Vrućevaljani

(b) Laserski zavareni

(c) Hladnooblikovani

Slika 1 – Ugaonici dobijeni različitim proizvodnim procesima

Ovaj rad prikazuje deo opsežnog i sistematskog naučnog istraživanja koje je sprovedeno na Univerzitetu u Beogradu, Građevinski fakultet, sa ciljem da se prošire saznanja o ponašanju centrično pritisnutih stubova ravnokrakog L preseka od nerđajućeg čelika i time upotpuni tehnička regulativa za projektovanje ovih elemenata. Obimnim eksperimentalnim ispitivanjem [6] obezbeđen je osnov za detaljne numeričke studije iz kojih su proizašle preporuke za njihov proračun [8]. Rad opisuje procedure merenja početnih geometrijskih imperfekcija i zaostalih napona i dobijene rezultate, koji predstavljaju važan deo eksperimentalnog programa ispitivanja i neophodne ulazne parametre za numeričke studije i utvrđivanje finalnih zaključaka.

2. PROGRAM EKSPERIMENTALNOG ISPITIVANJA

Eksperimentalno ispitivanje koje je sprovedeno u cilju utvrđivanja zakonitosti realnog ponašanja stubova ravnokrakog L preseka od nerđajućeg čelika može se podeliti u pet faza:

- ispitivanje mehaničkih karakteristika materijala,
- merenje početnih geometrijskih imperfekcija, merenje zaostalih napona,
- ispitivanje nosivosti poprečnog preseka na pritisak (ispitivanje kratkog stuba pri pritisku),
- ispitivanje nosivosti elemenata na izvijanje.

Faze ispitivanja sprovode se na ugaonicima dobijenim postupkom hladnog oblikovanja, vrućeg valjanja i laserskog zavarivanja. Izuzetak od ovoga su merenja zaostalih napona, koja nisu sprovedena kod hladnooblikovanih elemenata, imajući u vidu njihove relativno male vrenosti i zanemarljiv uticaj na graničnu nosivost [9], [10]. Eksperimentalnim programom obuhvaćene su dve legure nerđajućeg čelika koje imaju najširu primenu. Laserski zavareni i vrućevaljani ugaonici izrađeni su od austenitnog nerđajućeg čelika klase EN 1.4301, za koju je definisana nominalna granica razvlačenja od 190 MPa [11]. Dve različite dimenzije poprečnog preseka korišćene su za eksperimentalno ispitivanje vrućevaljanih i laserski zavarenih L profila - $60 \times 60 \times 6$ i $100 \times 100 \times 10$. Dupleks čelik klase EN 1.4162 sa nominalnom granicom razvlačenja od 480 MPa [11] korišćen je za izradu hladnooblikovanih L profila. Postupkom hladnog oblikovanja od vrućevaljane trake debljine 4 mm sa dimenzijom unutrašnjeg radijusa

od 12 mm napravljeni su hladnooblikovani ugaonici nominalnih dimenzija poprečnog preseka $80 \times 80 \times 4$.

Najobimnija i najznačajnija faza eksperimentalnog dela istraživanja predstavlja ispitivanje nosivosti elemenata na izvijanje. Ispitano je ukupno 48 uzoraka, koji su podeljeni u 12 serija, tako da se u okviru svake serije nalaze po četiri ponovljena uzorka sa istim nominalnim vrednostima geometrijskih karakteristika poprečnog preseka i dužine uzoraka. Od ukupnog broja uzoraka 8 elemenata pripadaju grupi hladnooblikovanih L profila, dok 20 uzoraka pripadaju vrućevaljanim i laserski zavarenim L profilima. Rekapitulacija serija uzoraka sa nominalnim podacima o geometriji i vrednostima vitkosti prikazana je u tabeli 1. Prva tri slova u oznaci uzoraka ukazuju na to da li je reč o vrućevaljanim (AHR), laserski zavarenim (ALW) ili hladnooblikovanim (ACF) ugaonicima. Dužine uzoraka i nominalne dimenzije poprečnih preseka pažljivo su birane vodeći računa o tome da uzorci koji se ispituju pripadaju oblasti male vitkosti, oblasti srednje vitkosti i oblasti velike vitkosti. Dužine uzoraka su odabrane tako da pored fleksionog izvijanja, dominantan oblik loma bude i i fleksiono – torziono izvijanje.

Tabela 1 – Nominalne dimenzije i vitkost za uzorke korišćene u testu izvijanja

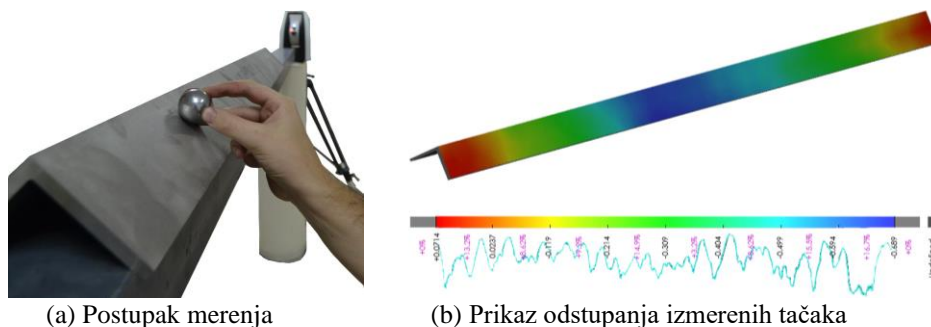
Oznaka serije uzoraka	Materijal	Geometrija uzorka			Vitkost oko slabije ose inercije λ_v
		Širina kraka (mm)	Debljina (mm)	Dužina (mm)	
AHR $100 \times 100 \times 10 - 500$	EN 1.4301	100	10	500	26
AHR $100 \times 100 \times 10 - 1500$				1500	77
AHR $100 \times 100 \times 10 - 2500$				2500	128
AHR $60 \times 60 \times 6 - 800$	EN 1.4301	60	6	800	70
AHR $60 \times 60 \times 6 - 2000$				2000	170
ALW $100 \times 100 \times 10 - 500$	EN 1.4301	100	10	500	25
ALW $100 \times 100 \times 10 - 1500$				1500	76
ALW $100 \times 100 \times 10 - 2500$				2500	127
ALW $60 \times 60 \times 6 - 800$	EN 1.4301	60	6	800	68
ALW $60 \times 60 \times 6 - 2000$				2000	172
ACF $80 \times 80 \times 4 - 1000$	EN 1.4162	80	4	1000	65
ACF $80 \times 80 \times 4 - 2000$				2000	130

3. MERENJE POČETNIH GEOMETRIJSKIH IMPERFEKCIJA

U cilju određivanja veličine i raspodele početnih geometrijskih imperfekcija sproveden je niz međusobno povezanih aktivnosti za sve uzorke koji pripadaju serijama prikazanim u tabeli 1. Prva aktivnost predstavlja određivanje koordinata velikog broja proizvoljno odabranih tačaka na spoljašnjoj površini uzoraka primenom visoko preciznog mernog sistema, laserskog interfeometra za „praćenje“ (eng. *laser interferometric tracker*), proizvođača *Hexagon Manufacturing Intelligence* iz Velike Britanij, *Leica Absolute Tracker AT960*. Ovaj merni

sistem u osnovi čine sam merni uređaj (merna stanica), ciljni uređaj (sferni reflektor) i računar sa aplikativnim softverom. Leica Absolute Tracker AT960 je projektovan kao prenosivi merni sistem sa šest stepeni slobode (tri položaja parametra x , y i z i tri orijentaciona / rotaciona parametra po svakoj od osa). Standardni Leica Absolute Tracker za svaku mernu tačku meri udaljenost od stanice do reflektora, zenitni ugao i hortalizalni ugao, pružajući informacije na osnovu kojih se određuju precizni podaci o poziciji reflektora sa tri stepena slobode (tri položajna parametra x , y i z). Pored interferometra, koji je sastavni deo standardnog *Laser Tracker* - a, *Leica Absolute Tracker AT960* sadrži i integrisanu kameru koja obezbeđuje dodatne informacije na osnovu kojih se određuje precizna pozicija i orijentaciji sfernog reflektora (tri parametra položaja x , y i z i tri rotaciona parametra po svakoj od osa). Optičko centriranje sfernog reflektora sa tačnošću od $\pm 3 \mu\text{m}$ obezbeđuje da se merenje proizvoljne tačke izvrši sa preciznošću od $15 + 6 \cdot L \mu\text{m}$, gde L predstavlja rastojanje merene tačke od merne baze izraženo u metrima.

Nakon fiksiranja uzorka i definisanja referentnih tačaka vrši se kontinuirano snimanje spoljne površine kraka L profila. Sferom se laganim pokretima prelazi preko površine uzorka, dok merni sistem kontinuirano određuje koordinate položaja prizme. Ovakav postupak određivanja koordinata tačaka na spoljnoj konturi ponovljen je za oba kraka L profila. Broj određenih tačaka na jednom uzorku, u zavisnosti od njegove dužine, se kreće između 8000 i 15000 tačaka. Na slici 2 prikazan je postupak merenja pomoću *Leica Absolute Tracker AT960*, kao i raspored odstupanja izmerenih tačaka na konturi uzorka u odnosu na idealizovanu geometriju.

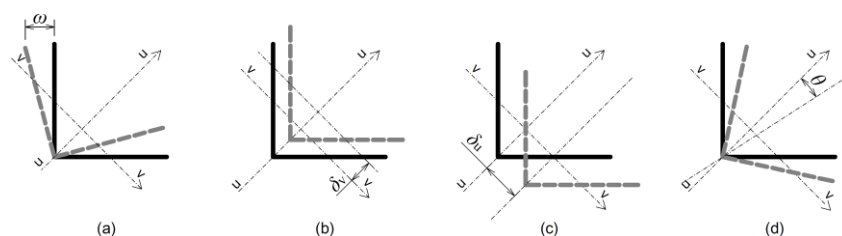


Slika 2 – Merenje početnih geometrijskih imperfekcija

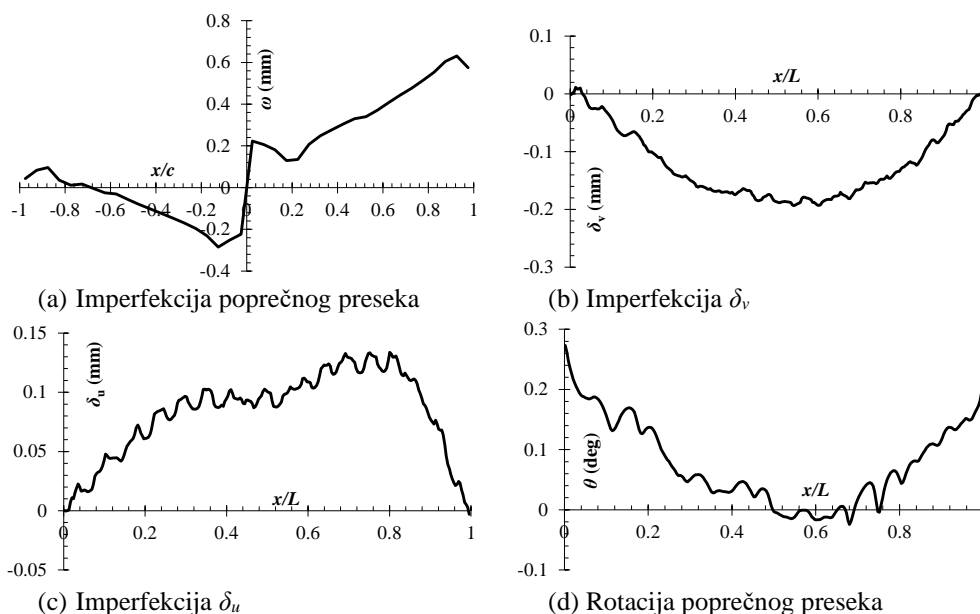
Merenjem površine L profila sistemom za lasersko merenje dobijeno je odstupanje niza nasumično izabranih tačaka na površini L profila u odnosu na idealizovane unapred definisane površi. Za potrebe obrade rezultata, definisana je mreža konačnih elemenata na površini uzoraka i mreža tačaka, koje predstavljaju težište konačnih elemenata na koje je uzorak podeljen. Dimenzija konačnih elemenata kod laserski zavarenih i vrućevaljanih uzoraka poprečnog preseka $60 \times 60 \times 6$ iznosi 3×3 mm, dok kod svih ostalih uzoraka iznosi 5×5 mm. Interpolacijom vrednosti odstupanja izmerenih tačaka došlo se do vrednosti odstupanja svake tačke koja pripada definisanoj mreži. Ovakav skup podataka predstavlja uređeni skup sa kojim se može vršiti naknadna obrada i analiza rezultata.

Ako se sa z označi podužna osa uzorka, tada se za sve tačke u mreži tačaka koje imaju istu z koordinatu može se reći da pripadaju istom poprečnom preseku uzorka. Broj ovakvih poprečnih preseka duž uzorka definiše se bezdimenzionalnim parametrom L/a , gde a predstavlja veličinu konačnog elementa, a L predstavlja dužinu uzorka. Za svaki od poprečnih preseka poznata su

odstupanja tačaka na poprečnom preseku, pa se mogu odrediti ključne veličine imperfekcija — lokalna imperfekcija kraka L profila, pomeranje težišta preseka u pravcu glavnih osa inercije poprečnog preseka i obrtanje (rotacija) poprečnog preseka u odnosu na idealizovane pravce i površine. Na slici 3 je prezentovano fizičko značenje ovih parametara. Imperfekcija poprečnog preseka (otklon) označena je sa ω i predstavlja horizontalno odstupanje kraka L profila u odnosu na idealizovan položaj kraka L profila. Sa δ_v i δ_u označena su odstupanja koordinata težišta stvarnog poprečnog preseka u odnosu na težište idealizovanog poprečnog preseka u pravcu osa $u-u$ i $v-v$, respektivno. Torziona imperfekcija označena je sa θ i predstavlja ugao obrtanja poprečnog preseka u odnosu na idealizovan poprečni presek.



Slika 3 – Definicija parametara imperfekcije: (a) otklon; (b) imperfekcija u pravcu ose u ; (c) imperfekcija u pravcu ose v ; (d) rotacija [12]



Slika 4 – Raspored početnih geometrijskih imperfekcija uzoraka ALW $60 \times 60 \times 6 - 800 - 1$ [13]

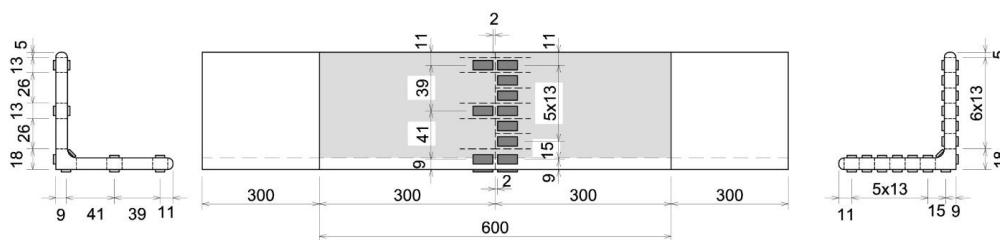
Na slici 4 prikazan je normalizovan zapis raspodele početnih geometrijskih imperfekcija za uzorak ALW $60 \times 60 \times 6 - 800 - 1$. Slika 4a prikazuje raspodelu lokalnih imperfekcija, odnosno odstupanja (otklona) kraka L profila od idealizovanih ravni koje međusobno zaklapaju ugao od

90°, u funkciji normalizovane dužine kraka L profila. Na slikama 4b, 4c i 4d prikazane su raspodele globalnih imperfekcija zakrivljenja u pravcu glavnih osa inercije preseka $u-u$, $v-v$ i torziona imperfekcija u funkciji normalizovane dužine elementa, respektivno. Za generisanje ova tri dijagrama bilo je neophodno izvršiti matematičke procedure na translaciji i rotaciji skupa tačaka u cilju definisanja referentnih nultih vrednosti koje se poklapaju sa vrednosima idelizovane geometrije elemenata, tako da u slučaju imperfekcija zakrivljenja krajevi elemenata imaju nulte vrednost pomeranja, dok u slučaju imperfekcije usled rotacije preseka, poprečni presek u sredini raspona ima nultu rotaciju.

Na osnovu izmerenih i obrađenih rezultata, maksimalne amplitude početnih geometrijskih imperfekcija iznose: $\delta_v = L/3562$ i $\delta_u = L/3834$ za hladnooblikovane ugaonike, $\delta_v = L/4141$ i $\delta_u = L/4830$ za vrućevaljane ugaonike i $\delta_v = L/4250$ i $\delta_u = L/1871$ za laserski zavarene ugaonike. Amplitude početnih geometrijskih imperfekcija imaju znatno niže vrednosti od proizvodne tolerancije definisane standardom EN 1090-2 [14] prema kome su one ograničene na $L/750$. Maksimalno obrtanje poprečnog preseka normirano po dužini n u jednom od hladnooblikovanih uzoraka ne prelazi graničnu vrednost definisanu u EN 10162 [15] koja iznosi $1^\circ/m$. Maksimalni dopušteni otklon za vrućevaljane L profile čija dimenzija kraka nije veća od 100 mm prema EN 10056-2 [16] ograničena je na 1 mm što je veće od izmerenih vrednosti kod testiranih uzoraka.

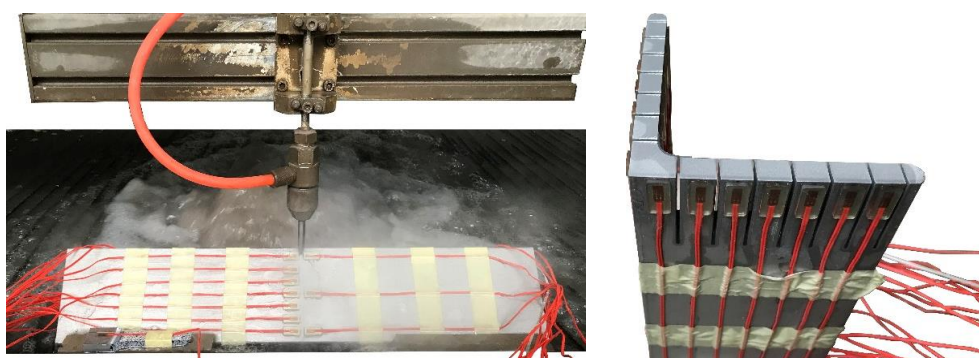
4. MERENJE ZAOSTALIH NAPONA

Merenje veličine i raspodele zaostalih napona izvršeno je na jednom vrućevaljanom i jednom laserski zavarenom uzorku ravnokrakog L preseka nominalnih dimenzija $100 \times 100 \times 10$ mm. Materijal ispitanih L profila je austenitni nerđajući čelik EN 1.4301. Merenje je sprovedeno primenom destruktivne metode sečenja na sobnoj temperaturi, po proceduri opisanoj u publikovanom radu koja opisuje merenja zaostalih napona na L profilima od ugljeničnog čelika [17]. Ova metoda merenja zaostalih napona podrazumeva sečenje materijala tehnologijom vodenog mlaza, u toku koga se, vodonepropusnim mernim trakama, kontinuirano snimaju dilatacije. Tehnologija sečenja vodenim mlazom prigodna je za ispitivanje zaostalih napona, jer se mogu vršiti precizni rezovi bez promene naponskog stanja u zoni reza usled zagrevanja materijala koji se seče. Prilikom sečenja dolazi do relaksacije materijala u zoni reza koji je napregnut uravnoteženim zaostalim naponima. Primenom Hukovog zakona, na osnovu izmerenih dilatacija, sračunavaju se naponi relaksacije koji predstavljaju zaostale napone.



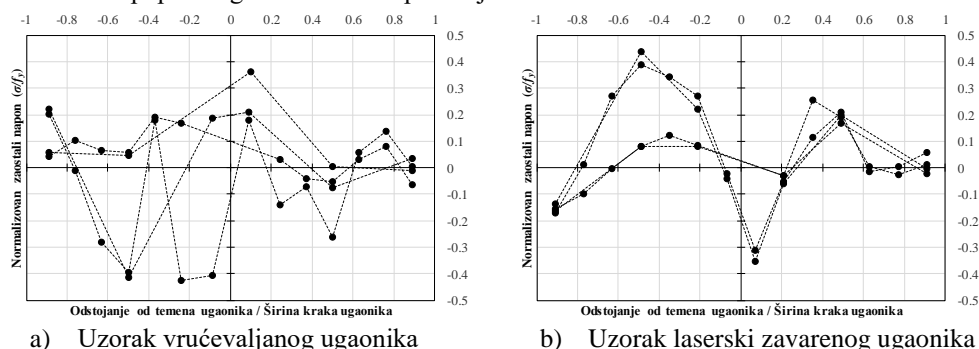
Slika 5 – Dimenzija i položaj mernih traka i rezova za ispitivanje zaostalih napona kod vrućevaljanog uzorka [12]

Na slici 5 prikazan je raspored mernih traka i dimenzije vrućevaljanog uzorka za ispitivanje zaostalih napona. Dužina ispitivanog dela uzorka iznosi 600 mm, koji je od kraja elementa udaljen 300 mm sa obe strane kako bi se neutralisao efekat kraja uzorka. Za merenje dilatacija prilikom ispitivanja korišćene su vodonepropusne merne trake WFLA-3-17-3LDBB-F širine 3 mm. Merne trake su postavljene i sa spoljne i sa unutrašnje strane kraka L profila. Dodatno su postavljene kontrolne merne trake sa suprotne strane poprečnog reza. Za merenje dilatacija u toku ispitivanja kod uzorka vrućevaljanog L profila postavljeno je ukupno 38 mernih traka, dok je kod laserski zavarenog uzorka broj mernih traka iznosio 40.



Slika 6 – Uzorci u toku i nakon ispitivanja zaostalih napona [12]

Ispitivanje sečenjem vodenim mlazom uzorka sprovedeno je u pogonu za sečenje kompanije “Limar” u Beogradu pod kontrolisanim uslovima temperature vazduha. Najpre je izvršen poprečni rez, kojim je praktično uzorak podeljen na dva dela, što je izazvalo relaksaciju napona. Nakon poprečnog, izvršeni su podužni rezovi dužine 40 mm sa obe strane svake merne trake. U cilju anuliranja uticaja eventualne promene temperature postavljena je i merna traka za kompenzaciju, koja se nalazila na limu od istog materijala u neposrednoj blizini uzorka tokom ispitivanja. Stanje dilatacija u mernim trakama beleženo je na akvizicionom uređaju MGC+ proizvođača HBM u toku čitavog postupka ispitivanja, kao i 30 minuta nakon poslednje aktivnosti sečenja. Treba naglasiti da je tokom poprečnog reza zabeležen značajno veći prirast dilatacija u odnosu na dilatacije izmerene za vreme podužnih rezova. Na slici 6 prikazan je uzorak u toku poprečnog reza i nakon ispitivanja.



Slika 7 – Raspored zaostalih napona u uzorcima

Vrednosti zaostalih napona, normalizovane naponom na granici razvlačenja, prikazane su u funkciji normalizovane koordinate širine kraka L profila na slikama 7a i 7b za vrućevaljani i laserski zavareni uzorak, respektivno. Na prikazanim dijagramima naponi zatezanja imaju pozitivne vrednosti, a naponi pritiska imaju negativne vrednosti. Raspodela zaostalih napona kod vrućevaljanog uzorka praćena je rasipanjem vrednosti bez uoćenog trenda. Za razliku od vrućevaljanog, kod laserski zavarenog uzorka distribucija upućuje na prediktivni model za vrućevaljane ravnokrake L profile od ugljeničnog čelika sa rapodelom zaostalih napona kroz tri tačke [18].

5. ZAKLJUČCI

Strukturne imperfekcije imaju bitnu ulogu u nosivosti pojedinačnih elemenata na izvijanje. Veličina i raspored početnih geometrijskih imperfekcija i zaostalih napona kod stubova L preseka ključni su za numeričke simulacije sprovedenih eksperimentalnih ispitivanja, razvoj numeričke parametarske analize i izvođenje zaključka o njihovom ponašanju i graničnim nosivostima.

Merenje početnih geometrijskih imperfekcija predstavlja multidisciplinarnu aktivnost koja zahteva savremene tehničke resurse. Merenje početnih geometrijskih imperfekcija na ukupno 48 uzorka hladnooblikovanih, vrućevaljanih i laserski zavarenih L profila je pokazalo da su maksimalne vrednosti manje od proizvodnih tolerancija.

Nedostatak rezultata istraživanja u oblasti merenja zaostalih napona kod L profila od nerđajućeg čelika čini ovaj segment istraživanja veoma značajnim. Raspored zaostalih napona izmernih na laserski zavarenom uzorku odgovaraju raspodeli zaostalih napona prema prediktivnom modelu kroz tri tačke. Izmereni zaostali naponi dobijeni u ovom ispitivanju kod vrućevaljanih i laserski zavarenih L profila pokazuju veće vrednosti u odnosu na zaostale napone kod ekvivalentnih poprečnih preseka od ugljeničnog čelika.

ZAHVALNOST

Ovo istraživanje podržano je od strane Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Vlade republike Srbije u okviru projekta 200092.

Za podršku u istraživanju autori se zahvaljuju kompanijama Montanstahl ag Switzerland, Vetroelektrane Balkana Beograd, Armont SP Beograd, Institutu IMS, Institutu za materijale i konstrukcije Građevinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu, ConPro Novi Sad, Energoprojekt Industrija AD Beograd, Vekom Geo Beograd, CO-Designing, Peri Oplate Beograd, North Engineering Subotica, Amiga Kraljevo, Mašinoprojekt koprings AD Beograd, Sika Beograd, DvaD Solutions Beograd i Soko Inžinjerings Beograd.

LITERATURA

- [1] Zhang L, Tan K. H, Zhao O.: Experimental and numerical studies of fixed-ended cold-formed stainless steel equal-leg angle section columns, Eng. Struct., vol. 184, pp. 134–144, 2019.

- [2] Liang Y, Jeyapragasam V.V.K, Zhang L, Zhao O.: Flexural-torsional buckling behaviour of fixed-ended hot-rolled austenitic stainless steel equal-leg angle section columns, *J. Constr. Steel Res.*, vol. 154, pp. 43–54, 2019.
- [3] Sarquis F.R., de Lima L.R.O, da S Vellasco P.C.G, Rodrigues M.C.: Experimental and numerical investigation of hot-rolled stainless steel equal leg angles under compression, *Thin-Walled Struct.*, vol. 151, 2020.
- [4] Sirqueira A. da S, da S Vellasco P.C.G, de Lima L. R. O, Sarquis F.R.: Experimental assessment of stainless steel hot-rolled equal legs angles in compression,” *J. Constr. Steel Res.*, vol. 169, 2020.
- [5] Zhang L, Liang Y, Zhao O.: Experimental and numerical investigations of pin-ended hot-rolled stainless steel angle section columns failing by flexural buckling, *Thin-Walled Struct.*, vol. 156, 2020.
- [6] Dobrić J, Filipović A, Marković Z, Baddoo N.: Structural response to axial testing of cold-formed stainless steel angle columns, *Thin-Walled Struct.*, vol. 156, 2020.
- [7] www.montanstahl.com
- [8] Dobrić J, Filipović A, Baddoo N, Marković Z, Buđevac D.: Design procedures for cold-formed stainless steel equal-leg angle columns, *Thin-Walled Struct.*, 2020.
- [9] Rasmussen K.J.R, Hancock G.J.: Design of cold-formed stainless steel tubular members I: Columns, *J. Struct. Eng.*, ASCE 119 (8) (1993) 2349–2367.
- [10] Gardner L, Nethercot D.A.: Numerical modeling of stainless steel structural components a consistent approach, *J. Struct. Eng.*, ASCE 130 (10) (2004) 1586–1601.
- [11] EN 10088-4: Stainless steels - Part 4: Technical delivery conditions for sheet/plate and strip of corrosion resisting steels for construction purposes. Brussels, Belgium, CEN 2009.
- [12] Filipović A, Dobrić J, Baddoo N, Može P.: Experimental response of hot-rolled stainless steel angle columns, *Thin-Walled Struct.*, submitted for publication.
- [13] Filipović A, Dobrić J, Buđevac D, Fric N, Baddoo N.: Experimental response of laser-welded stainless steel angle columns, *Thin-Walled Struct.*, submitted for publication.
- [14] EN 1090-2: Execution of steel structures and aluminium structures – Part 2: Technical requirements for steel structures. Brussels, Belgium, CEN 2008.
- [15] EN 10162: Cold rolled steel sections – Technical delivery conditions – Dimensional and cross-sectional tolerances. Brussels, Belgium, CEN 2003.
- [16] EN 10056-2: Structural steel equal and unequal leg angles – Part 2: Tolerances on shape and dimensions. Brussels, Belgium, CEN 1998.
- [17] Može P, Cajot L G, Sinur F, Rejec K, Beg D. Residual stress distribution of large steel equal leg angles. *Engineering Structures* 2014;7:35–47.
- [18] ECCS. Manual on stability of steel structures. European Convention for Constructional Steelwork; 1976.