

Primljen / Received: 5.9.2014.
 Ispravljen / Corrected: 27.1.2015.
 Prihvaćen / Accepted: 31.1.2015.

Dostupno online / Available online: 10.3.2015.

Specifičnosti ponašanja tlačnih elemenata od nehrđajućeg čelika

Autori:



Dr.sc. **Jelena Dobrić**, dipl.ing.građ.
 Sveučilište u Beogradu
 Građevinski fakultet
jelena@imk.grf.bg.ac.rs



Prof.dr.sc. **Zlatko Marković**, dipl.ing.građ.
 Sveučilište u Beogradu
 Građevinski fakultet
zlatko@imk.grf.bg.ac.rs



Prof.dr.sc. **Dragan Buđevac**, dipl.ing.građ.
 Sveučilište u Beogradu
 Građevinski fakultet
budjevac@grf.bg.ac.rs



Željko Flajs, dipl.ing.građ.
 Institut IMS, Srbija
zeljko.flajs@institutims.rs

Pregledni rad

Jelena Dobrić, Zlatko Marković, Dragan Buđevac, Željko Flajs

Specifičnosti ponašanja tlačnih elemenata od nehrđajućeg čelika

Nehrđajući čelik odlikuje niz specifičnosti koje određuju drugačije ponašanje konstrukcijskih elemenata od ovog materijala u odnosu na ekvivalentne od ugljičnog čelika. Ova svojstva, osobito izražena kod tlačnih elemenata, očituju se u nelinearnom odnosu naprezanja i deformacija i izraženim utjecajima očvršćenja materijala uslijed hladnog oblikovanja. U radu su prikazani osnovni principi proračuna tlačnih hladno oblikovanih elemenata od nehrđajućih čelika koji su obuhvaćeni suvremenim tehničkim propisima ili su rezultat aktualnih istraživanja.

Ključne riječi:

nehrđajući čelik, hladno oblikovanje, tlačno opterećenje, nosivost presjeka, nosivost elementa

Subject review

Jelena Dobrić, Zlatko Marković, Dragan Buđevac, Željko Flajs

Specific features of stainless steel compression elements

Stainless steel has a number of features that define different behaviour of structural elements made of this material, as related to equivalent carbon steel elements. These properties, especially prominent in case of compression elements, are manifested through the nonlinear stress and strain relationship, pronounced influences of material hardening due to cold forming. Basic principles for the analysis of cold-formed stainless steel compression elements, either included in modern technical regulations, or resulting from current research, are presented in this paper.

Key words:

stainless steel, cold forming, compression load, carrying capacity of cross-section, carrying capacity of element

Übersichtsarbeit

Jelena Dobrić, Zlatko Marković, Dragan Buđevac, Željko Flajs

Besonderheiten im Verhalten druckbeanspruchter Elemente aus rostfreiem Stahl

Rostfreier Stahl hat bestimmte Eigenschaften, die das Verhalten von Konstruktionselementen im Vergleich zu äquivalenten Elementen aus unlegiertem Stahl beeinträchtigen können. Diese Eigenschaften zeigen sich insbesondere bei druckbeanspruchten Elementen durch das nichtlineare Verhältnis von Spannungen und Verformungen, den betonten Einfluss des Kaltformungsverfahrens auf die Nachhärtung des Materials. In dieser Arbeit werden Grundlagen der Analyse kaltgeformter Elemente aus rostfreiem Stahl dargestellt, die entweder auf modernen Regelwerken oder auf derzeitiger Forschung beruhen.

Schlüsselwörter:

rostfreier Stahl, Kaltformung, Druckbeanspruchung, Tragfähigkeit von Querschnitten, Tragfähigkeit von Elementen

1. Uvod

Nehrđajući čelik je općeniti naziv za širok raspon legura željeza, različitih vrsta i kvaliteta, čija se postojanost na koroziju postiže s najmanje 10,5 % kroma i najviše 1,2 % ugljika. Najveću primjenu u građevinarstvu imaju austenitni i dupleks čelici. Austenitni nehrđajući čelici sadrže željezo, 16 - 28 % kroma i 6 - 32 % nikla. Granica razvlačenja je u rasponu od 190 do 350 N/mm², a vlačna čvrstoća dostiže vrijednost od 950 N/mm². Imaju izražen učinak očvršćivanja uslijed hladne deformacije. Ne pokazuju značajnu redukciju mehaničkih svojstava na visokim i niskim temperaturama. Pružaju izuzetne mogućnosti u obradi površine jer se ne postižu samo estetski efekti već i bolja korozijska otpornost pasivnog površinskog sloja. Nemagnetični su i dobro zavarljivi. Dupleks čelici sadrže dvofaznu austenitno-feritnu mikrostrukturu sa 18 do 26 % kroma i 3,5 do 8 % nikla. Sadže kombinaciju najboljih karakteristika austenitnih i feritnih čelika. U odnosu na austenitne čelike imaju bolja mehanička svojstva: granica razvlačenja je u opsegu od 400 do 650 N/mm², vlačna čvrstoća 630 do 900 N/mm², dok je duktilnost manja i iznosi oko 25 %.

Problematika projektiranja nosivih konstrukcija od nehrđajućeg čelika novijeg je datuma, pa je obuhvaćena tehničkom regulativom u znatno manjem opsegu u odnosu na elemente od ugljičnih čelika. Prvi službeni dokument u ovom području objavljen je 1968. godine u SAD, a objavio ga je AISI [1]. Sadašnja američka norma SEI/ASCE 8-02 [2] daje pravila za projektiranje hladno oblikovanih konstrukcijskih elemenata od nehrđajućeg čelika i dopušta ravnopravnu primjenu metode graničnih stanja i dopuštenih napona. U Europi je tek posljednjih godina prošlog stoljeća pod vodstvom SCI-a proveden opsežan istaživački projekt s ciljem definiranja europskog niza preporuka za proračun. Kao rezultat tih istraživanja Euro Inox objavljuje "Priručnik za proračun konstrukcija od nehrđajućeg čelika" [3], u tri različita i međusobno dopunjena izdanja. Istovremeno, CEN 1996. godine objavljuje prednormu, a šest godina kasnije i normu EN 1993-1-4 [4], koja daje dodatna pravila za nehrđajuće čelike. Ta norma je u značajnoj mjeri usklađena s priručnicima za proračun [3], uz izmjene koje su proizašle iz potrebe za usklađivanjem s odredbama normi za ugljične čelike EN 1993-1-1:2005 [5] i EN 1993-1-3:2006 [6]. Australija i Novi Zeland objavljuju 2001. godine zajedničku normu AS/NZS 4673 [7] koja se, tradicionalno, u velikoj mjeri temelji na američkim propisima. U skladu s europskim normama EN 10027-2 [8], nehrđajući čelici se označavaju brojačno i alfanumerički, prema kemijskom sastavu. Brojčana oznaka se sastoji od pet arapskih znamenki i ima oblik 1.4XXX. Znamenka koja slijedi neposredno iza znamenke 4 u oznaci ovisi o postotnom udjelu nikla i zastupljenosti molibdena, niobija i titanija u leguri nehrđajućeg čelika. U alfanumeričkoj oznaci, na prvom mjestu je simbol X, slijedi broj koji označava postotak prosječnog udjela ugljika, zatim redom, kemijski simboli glavnih legirajućih elemenata i brojevi razdvojeni crtama koji označavaju njihov prosječan udio u postocima. Kemijski sastav za različite vrste nehrđajućeg čelika definiran je prvim dijelom normi EN 10088 [9].

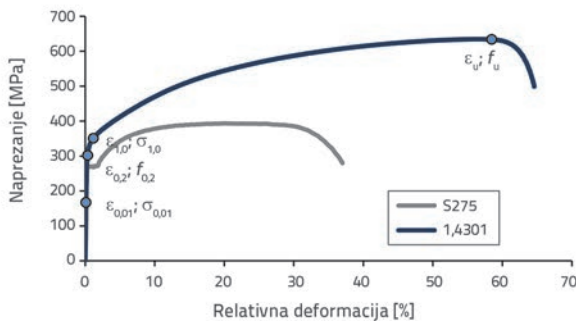
Najranija, ali i najopsežnija ispitivanja nosivosti tlačnih elemenata od austenitnog nehrđajućeg čelika 1.4310, proveli su 1955. godine Hammer i Petersen [10]. Ispitano je oko 200 uzoraka, zatvorenog poprečnog presjeka koji su formirani od dva hladno oblikovana omega profila (eng. *top-hat profile*), vitkosti od 15 do 120. Johnson i Winter [11] ispituju ponašanje stupova i greda od austenitnog čelika 1.4301. Uzorci su formirani kontinuiranim spajanjem hladno oblikovanih elemenata C presjeka bez kutnih prijevaja, u I presjek i alternativno u sandučasti presjek. Analizom rezultata potvrđena je primjena teorije tangentskog modula pri proračunu nosivosti elementa na fleksijsko izvijanje. Dva desetljeća kasnije su intenzivirana istraživanja u ovom području. Coetzee i dr. [12] ispituju uzorke od hladno oblikovanih C profila s rubnim prijevajima različitih vitkosti (10 do 104). Ispitivanja su obuhvatila grupu austenitnih čelika 1.4301 i 1.4401 i feritnog nehrđajućeg čelika 1.4003. Rhodes, Macdonald i McNiff [13] također ispituju hladno oblikovane elemente C presjeka s rubnim prijevajima različite debljine. Bredenkamp i Van den Berg [14] analiziraju nosivost zavarenih elemenata I poprečnog presjeka, dužine od 878 mm do 3580 mm. Osnovni materijal je feritni čelik 1.4003. Talja [15] i Stangenberg [16], provode eksperimentalne i numeričke analize nosivosti na fleksijsko izvijanje zavarenih elemenata I-presjeka od austenitnog i dupleks čelika. Rasmussen i Hancock [17], Liu i Young [18] te Gardner i Nethercot [19] analiziraju nosivost hladno oblikovanih šupljih elemenata od austenitnih nehrđajućih čelika. Young i Wing-Man Lui [20] ispituju nosivost elemenata kvadratnog i pravokutnog presjeka čija je dužina u opsegu od 300 mm do 3000 mm, a osnovni je materijal dupleks nehrđajući čelik visoke čvrstoće. Becque, Lecce i Rasmussen [21] analiziraju nosivost hladno oblikovanih elemenata male debljine stijenke na distorzijno izvijanje i interakciju izbočavanja presjeka i fleksijske stabilnosti elementa. Theofanous i Gardner [22] nastavljaju s ispitivanjem nosivosti elemenata od šupljih profila kvadratnog i pravokutnog presjeka i proširuju područje istraživanja na elemente elipsastog presjeka [23].

Ovaj rad sumira postojeće spoznaje o specifičnostima primjene nehrđajućih čelika kod tlačnih hladno oblikovanih elemenata koje zahtijevaju drugačije postupke proračuna nosivosti presjeka i elementa na fleksijsko izvijanje u odnosu na elemente od ugljičnih čelika.

2. Fizikalno-mehanička svojstva materijala

Osnovne specifičnosti austenitnih nehrđajućih čelika nalaze se u nelinearnoj vezi između naprezanja i deformacija, anizotropiji i nesimetriji materijala, duktilnosti i značajnom kapacitetu plastifikacije. Krivulja naprezanje - deformacija izrazito je nelinearna, nema jasno izraženu granicu razvlačenja i plastični plato, ima nisku vrijednost naprezanja na granici proporcionalnosti, što upućuje na postupnu plastifikaciju materijala. Za granicu proporcionalnosti, koja nije jasno izražena i konvencionalno utvrđena, obično se uzima naprezanje $\sigma_{0,01}$ koje odgovara trajnoj plastičnoj deformaciji od 0,01 % [2, 3].

Stupanj zaobljenja krivulje ovisi o vrsti i postotku zastupljenosti legirajućih elemenata, termičkoj obradi materijala i razini hladne obrade gotovog proizvoda. Ova značajka prikazana je usporedbom krivulja σ - ε za austenitni nehrđajući čelik 1.4301 i ugljični čelik S275 (slika 1.).



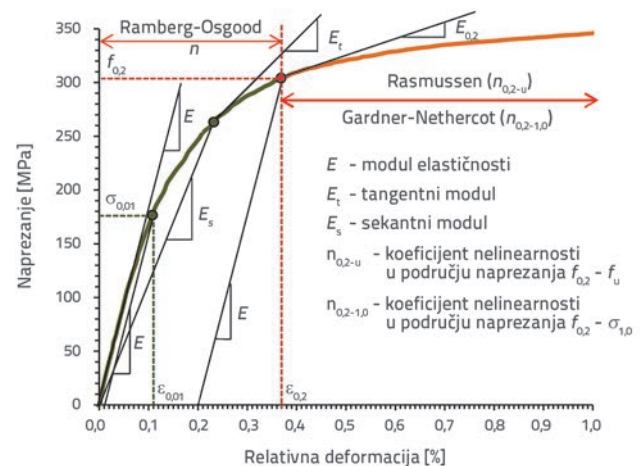
Slika 1. Krivulje naprezanje - relativna deformacija dobivene vlačnim ispitivanjem čelika 1.4301 i S275 [24]

Stvarna matematička interpretacija nelinearne veze između naprezanja i relativne deformacije, sa što manjim brojem parametara, od posebne je važnosti u analitičkim i numeričkim analizama različitih problema nosivosti. Za opisivanje krivulje σ - ε najširu primjenu ima dvofazni model materijala, utemeljen na poznatom Ramberg-Osgoodovom analitičkom izrazu, [25]. U području naprezanja ispod konvencionalne granice razvlačenja $f_{0,2}$, vrijednost relativne deformacije određuje se primjenom Hilllova [26] (modificiranog Ramberg-Osgoodovog) analitičkog izraza u funkciji tri parametra - konvencionalne granice razvlačenja $f_{0,2}$, modula elastičnosti E i koeficijenta nelinearnosti n :

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + 0,002 \left(\frac{\sigma}{f_{0,2}} \right)^n \quad (1)$$

Koeficijent nelinearnosti n , koji definira stupanj zakrivljenosti krivulje u analiziranom području naprezanja, uobičajeno se predstavlja logaritamskom funkcijom odnosa vrijednosti naprezanja $f_{0,2}$ i $\sigma_{0,01}$ i odgovarajućih plastičnih deformacija. Pokazano je da primjena izraza (1) daje zadovoljavajuće rezultate u području naprezanja ispod konvencionalne granice razvlačenja, ali da postoje značajna odstupanja od eksperimentalnih vrijednosti za veće vrijednosti naprezanja. Mirambell i Real, [27], modificiraju Ramberg-Osgoodovu krivulju, analizirajući je u novom koordinatnom sustavu s početkom u točki ($\varepsilon_{0,2}$, $f_{0,2}$), uvodeći kao funkcijske parametre veličine f_u i ε_u , tangenti modul koji odgovara konvencionalnoj granici razvlačenja $E_{0,2}$ i koeficijent nelinearnosti $n_{0,2-u}$. Koristeći rezultate ispitivanja različitih vrsta nehrđajućeg čelika pri vlačnom opterećenju, Rasmussen [28] pojednostavljuje Mirambell-Realov model, smanjujući broj funkcijskih parametara. Izraz u [28] uvršten je u EN 1993-1-4 [4]. Analizirajući Mirambell-Realov model [27] Gardner, Ashraf i Nethercot [29, 30], izvode zaključak o ograničenosti njegove primjene samo na slučaj vlaka. Pri

tlačnom ispitivanju izostaju veličine f_u i ε_u , s obzirom na odsutnost kontrakcije i slom presjeka. U tom smislu, autori modificiraju model [27] u području naprezanja iznad $f_{0,2}$, i umjesto vrijednosti čvrstoće pri vlačnom naprezanju f_u i odgovarajuće ukupne deformacije ε_u , uvode veličine koje odgovaraju trajnoj plastičnoj deformaciji od 1,0 %. Gardner-Nethercotov izraz, [30], ima opću primjenjivost i pokazuje izuzetno visoku razinu podudaranja s eksperimentalnim rezultatima. Osim modela koji nelinearno ponašanje materijala opisuju u funkciji naprezanja, značajnu primjenu ima i jedinstveni Abdellin inverzni oblik jednačbe [31] koji vrijednost naprezanja predstavlja u funkciji deformacija.



Slika 2. Vrijednosti naprezanja i deformacija u početnom dijelu krivulje naprezanje - deformacija za čelik 1.4301

Slika 2. prikazuje parametre koji se uobičajeno koriste za matematičko opisivanje krivulje σ - ε . Nehrđajuće čelike odlikuju različita mehanička svojstva u različitim smjerovima u odnosu na smjer valjanja (anizotropija), pri tlaku i pri vlaku (nesimetrija materijala). Zanimariv utjecaj anizotropije nalazimo jedino kod austenitnih čelika. Utjecaj asimetrije je značajniji, pa tako konvencionalna granica razvlačenja u ispitivanjima pri tlačnom opterećenju ima za uzdužni smjer vrijednosti koje su u prosjeku od 10 % do 15 % niže u odnosu na granicu razvlačenja pri uzdužnom vlaku. Ova specifičnost materijala poznata je kao Bauschingerov efekt i karakteristična je za materijale koji su podvrgnuti istezanju tijekom tehnološkog postupka izrade gotovog proizvoda [32]. Europske norme EN 10088 [9] definiraju tehničke zahtjeve isporuke za konstrukcijske nehrđajuće čelike u okviru kojih su propisane minimalne vrijednosti mehaničkih svojstava materijala. U slučaju limova i traka, te su vrijednosti određene standardnim ispitivanjem na tlak poprečno orijentiranih uzoraka u odnosu na smjer valjanja. Osim za austenitne čelike podvrgnute termičkom postupku žarenja (eng. *annealed condition*), propisane su vrijednosti konvencionalne granice razvlačenja ili vlačne čvrstoće za tri različite razine očvršćenja utjecajem hladne deformacije (CP350, CP500 i CP700), odnosno (C750, C800, C1000). Za razliku od europskog [9], američki propis [2], detaljno obuhvaća

Tablica 1. Mehanička svojstva materijala za čelik 1.4301 prema [2, 4, 9]

1.4301 (SEI/ASCE 304)	SEI/ASCE 8-02				EN 10088, EN 1993-1-4	
	LT	TT	LC	TC	TT	LT
$f_{0,2}$ [N/mm ²]	206,9	206,9	193,1	206,9	210	-
f_u [N/mm ²]	517,1		-	-	520	-
E [N/mm ²]	193100				200000	-
n	8,31	7,78	4,1	8,63	6	8

LT – uzdužno orijentirani uzorak opterećen na vlak; TT – poprečno orijentiran uzorak opterećen na vlak;
LC – uzdužno orijentirani uzorak opterećen na tlak; TC – poprečno orijentiran uzorak opterećen na tlak

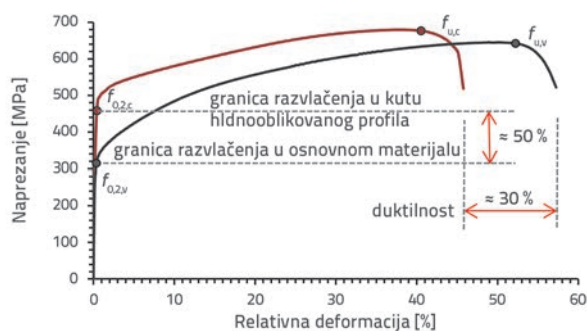
utjecaj nesimetrije i anizotropije materijala. Mehanička svojstva dana su sustavno za uzdužni i poprečni smjer naprezanja pri vlaku i pri tlaku, za austenitne čelike (SEI/ASCE 201, 301, 304, 316), termički obrađene (eng. *annealed*) i različito očvršćene postupcima hladne deformacije (1/16, 1/4 i 1/2 *hard*). U tablici 1. usporedno su prikazane minimalne vrijednosti konvencionalne granice razvlačenja $f_{0,2}$, vlačne čvrstoće f_u , modula elastičnosti E i koeficijenta nelinearnosti n za konstrukcijski austenitni čelik 1.4301 (SEI/ASCE 304) prema europskim [4, 9] i američkim normama [2].

Austenitni nehrđajući čelik je izrazito duktilan materijal s deformacijom pri lomu uzorka od 40 % do 60 %, što je gotovo dva puta više u odnosu na ekvivalentne vrijednosti kod ugljičnih čelika. Ova je značajka posebno važna kad su posrijedi dinamički opterećene konstrukcije i konstrukcije izložene udaru. Značajan kapacitet plastifikacije omogućava primjenu plastične analize pri proračunu i preraspodjelu utjecaja u elementima konstrukcije. Koeficijent temperaturne dilatacije austenitnih nehrđajućih čelika u temperaturnom opsegu od 20 do 500 °C ima vrijednost $18 \cdot 10^{-6}$ 1/°C, što je približno 50 % više u odnosu na ugljični čelik, dok je toplinska vodljivost gotovo tri puta manja, i na temperaturi od 20 °C iznosi 15 W/mK. Ovo uzrokuje pojavu veće razine zaostalih temperaturnih naprezanja i lokalnih deformacija u zoni zavara, posebno kod zavarenih elemenata male debljine stijenke. Za razliku od ugljičnog čelika, zbog visokog udjela nikla, većinu austenitnih nehrđajućih čelika odlikuje postojanost mehaničkih svojstava na povišenim temperaturama. U području visokih temperatura od 600 do 800 °C, normalizirana vrijednost konvencionalne granice razvlačenja (u odnosu na uvjete okoline) je i do četiri puta veća, a u slučaju modula elastičnosti gotovo sedam puta veća nego kod ugljičnih čelika [33]. Ova činjenica, potvrđena brojnim ispitivanjima, utječe na to da se smanjuje, pa i isključuje potreba za različitim sustavima zaštite od požara kod nosivih konstrukcijskih elemenata.

3. Utjecaj hladnog oblikovanja na mehanička svojstva materijala

Mehanička svojstva austenitnih nehrđajućih čelika značajno se povećavaju hladnim oblikovanjem. Kao odgovor na deformaciju, javlja se efekt očvršćivanja materijala praćen povećanjem granice razvlačenja, manjim povećanjem vlačne čvrstoće i

smanjenjem duktilnosti. Priroda i obujam promjene uvjetovani su kemijskim sastavom, vrstom termičke obrade i veličinom plastične deformacije kojoj je materijal izložen. Dosadašnja istraživanja su pokazala da intezitet poboljšanja mehaničkih svojstava materijala ovisi o odnosu $f_u/f_{0,2}$ i odnosu unutrašnjeg polumjera prijevaja i debljine lima r/t . Konvencionalna granica razvlačenja u kutu hladno oblikovanog profila je i do 50 % veća u odnosu na granicu razvlačenja osnovnog materijala. Slika 3. usporedno prikazuje krivulje naprezanja - deformacija dobivene ispitivanjem pri vlačnom opterećivanju uzoraka uzetih iz kuta profila (c) i osnovnog materijala (v).

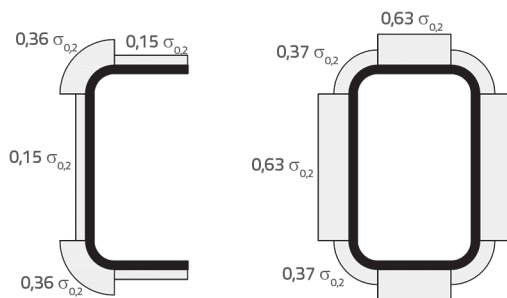
Slika 3. Dijagram σ - ε dobivene ispitivanjem uzoraka iz kuta profila i osnovnog materijala 1.4301 [24]

Povećanje mehaničkih svojstava nije zapaženo kod proizvoda koji su nakon hladnog oblikovanja izloženi termičkoj obradi. Također, zavarivanje u zonama presavijanja hladno oblikovanih profila pogoršava mehanička svojstva i vraća ih gotovo na razinu prije hladnog oblikovanja. Cruse i Gardner, [34], predlažu jednadžbe kojima se procjenjuje veličina konvencionalne granice razvlačenja i čvrstoće pri vlaku u ravnom dijelu hladno valjanog poprečnog presjeka, ali i konvencionalne granice razvlačenja u kutu prešanog i hladno valjanog profila od nehrđajućeg čelika. Autori potvrđuju da kod prešanih profila do značajnog povećanja granice razvlačenja dolazi samo u zoni presavijanja, a da kod hladno valjanih profila, osim prijevoja, značajne, ali nešto manje deformacije trpe i ravni dijelovi presjeka. Kod tih profila zona prijevoja obuhvaća i efektivnu širinu od $2t$ izvan prijevoja. Rossi i dr. [35] definiraju inovativni i opći analitički model procjene konvencionalne granice razvlačenja u funkciji plastičnih deformacija koje nastaju u svim fazama postupka

hladnog oblikovanja. Pretpostavljajući raspodjelu očvršćenja u presjeku prema obrascima koje su definirali Cruse i Gardner, [34], autori daju izraz za prosječnu vijednost konvencionalne granice razvlačenja cijelog hladno oblikovanog presjeka u funkciji površine prijevaja i ukupne površine poprečnog presjeka. Iako nehrđajući čelik u građevinarstvu ima najveću primjenu kao hladno oblikovani proizvod, utjecaj hladne deformacije na poboljšanje mehaničkih svojstava nije obuhvaćen europskim [4] i američkim [2] normama za nehrđajuće čelike. Izraz za prosječnu granicu razvlačenja hladno oblikovanog poprečnog presjeka, prema normi EN 1993-1-3 [6], nema primjenu u slučaju elemenata od nehrđajućeg čelika. Pogodnim oblikovanjem poprečnog presjeka postupcima hladnog oblikovanja poboljšavaju se mehanička svojstva materijala, ali i nosivost presjeka na izbočavanje, što je značajno u smislu racionalizacije utroška materijala, posebno ako se uzme u obzir visoka cijena nehrđajućeg čelika.

4. Zaostala naprezanja

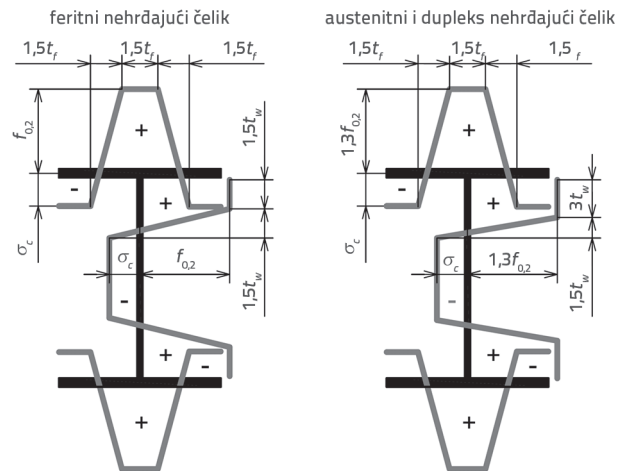
Nesavršenosti stvarnih elemenata - zaostala naprezanja i geometrijske imperfekcije mogu znatno utjecati na smanjenje granične nosivosti tlačnih elemenata. Cruise i Gardner, [36], su 2008. godine proveli opsežan istraživački program radi određivanja razine i raspodjele zaostalih naprezanja kod vruće valjanih, hladno oblikovanih i zavarenih I profila od nehrđajućih čelika.



Slika 4. Intenzitet i raspodjela zaostalih naprezanja uslijed savijanja kod hladno oblikovanih presjeka, [36]

U slučaju hladno oblikovanih profila, karakteristične vrijednosti uzdužnih naprezanja uslijed savijanja imaju maksimum u prijevajima profila, gdje je zbog savijanja došlo do značajne lokalne plastifikacije materijala, dok je u slučaju šupljih hladno valjanih profila raspodjela naprezanja po inverznom obrascu, slika 4. U oba slučaja vrijedi pretpostavka o pravokutnoj raspodjeli po debljini stijenke i vlačnim naprezanjima na vanjskoj površini presjeka. U slučaju zavarenih I-presjeka, potvrđena je raspodjela zaostalih naprezanja s maksimalnim vlačnim naprezanjima u području spoja i nižim vrijednostima tlačnih naprezanja u ostalim dijelovima presjeka. Uočeno je da je vlačno naprezanje na spoju rebra i pojasnice većeg intenziteta kod austenitnih i dupleks čelika, kao i veličina utjecajne površine, što je posljedica termičkih svojstava ovih materijala. Što se tiče

feritnih nehrđajućih čelika, predložena je primjena modela za ugljični čelik koji daje švedska norma BSK 99. Slika 5. prikazuje analitičke modele raspodjele zaostalih naprezanja kod zavarenih I-presjeka prema [36].



Slika 5. Model raspodjele zaostalih uzdužnih naprezanja kod zavarenog I-presjeka [36]

5. Nosivost poprečnog presjeka na tlak

Elastična teorija izbočavanja kod elastoplastičnih materijala može se primijeniti samo u početnom području naprezanja. Na osnovi zaključaka do kojih je došao Stowell (1948.), Bleich, [37], definira izraz za kritično naprezanje izbočavanja tlačno opterećene pravokutne ploče u neelastičnom području $\sigma_{cr,inel}$ u funkciji tangentskog modula E_t :

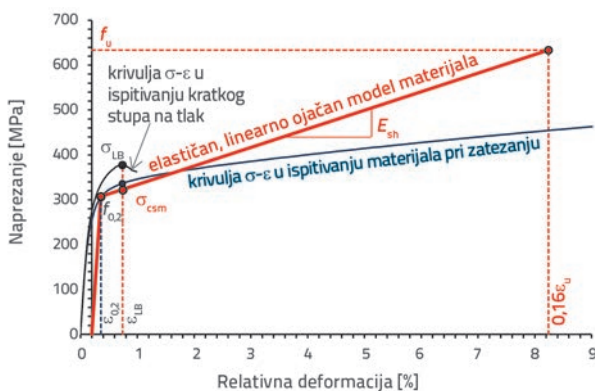
$$\sigma_{cr,inel} = \sqrt{(E_t/E)} \frac{k_\sigma \pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t}{b}\right)^2 = \eta \frac{k_\sigma \pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t}{b}\right)^2 = \eta \sigma_{cr,el} \quad (2)$$

gdje je η plastični koeficijent redukcije, a k_σ koeficijent izbočavanja koji ima istu vrijednost kao u elastičnom području naprezanja. Analizirajući utjecaje nelinearne veze naprezanja i deformacija na kapacitet nosivosti ukrućenih i neukrućenih hladno oblikovanih presjeka, Van den Berg, [38], potvrđuje utjecaj tangentskog modula na vrijednost kritičnog naprezanja izbočavanja u izrazu (2), uz zaključak da kod neukrućenih presjeka prevladava utjecaj sekantskog modula E_s . Rezultati do kojih je došao Van den Berg, [38], uvršteni su u postupak proračuna nosivosti presjeka prema američkoj normi, [2]. Prema [2], nosivost presjeka se određuje kao rezultat bruto površine presjeka A i dopuštenog tlačnog naprezanja σ_b koji se dobije redukcijom kritičnog naprezanja izbočavanja σ_{cr} , a koji nije veći od konvencionalne granice razvlačenja $f_{0,2}$. Proračun nosivosti poprečnog presjeka prema europskoj normi za nehrđajuće čelike, [4], osniva se na konceptu efektivnog presjeka, prema kojem do iscrpljenja granične nosivosti dolazi uslijed potpune plastifikacije ili izbočavanja u elastičnom području naprezanja. Taj proračunski koncept,

utemeljen na analizi ponašanja elastoplastičnih materijala s bilinearnom vezom između naprezanja i deformacija, ne uzima u obzir utjecaj postupne plastifikacije materijala koji posjeduju austenitni nehrđajući čelici. Prema [4], proračunska nosivost presjeka određuje se kao umnožak konvencionalne granice razvlačenja $f_{0,2}$ i bruto površine (klasa 1, 2 ili 3), odnosno efektivne površine presjeka u slučaju klase 4. Uzimajući kao osnovu značajno veći broj dostupnih eksperimentalnih podataka pri analizi ponašanja kratkog stupa uslijed centričnog tlaka i grednih nosača na savijanje (2008.), Gardner i Theofanous, [39], korigiraju postojeće vrijednosti za granične vitkosti kod hladno oblikovanih i zavarenih poprečnih presjeka od nehrđajućih čelika prema [4], i u značajnoj mjeri usklađuju ih s vrijednostima koje vrijede za ugljične čelike.

5.1. Metoda kontinuirane čvrstoće

Koncept efektivnog presjeka je metoda kojom se kapacitet nosivosti poprečnog presjeka određuje u funkciji granice razvlačenja, kao maksimalne, granične vrijednosti naprezanja koja se u presjeku može dostići. Kod austenitnog nehrđajućeg čelika se ovom metodom zanemaruje značajan utjecaj očvršćivanja uslijed deformacije, što za posljedicu može dati konzervativne rezultate, pogotovo kod punih presjeka čiji je kapacitet nosivosti određen većim vrijednostima naprezanja u odnosu na granicu razvlačenja.



Slika 6. Model materijala prema metodi kontinuirane čvrstoće

Metoda kontinuirane čvrstoće, [40], predstavlja suvremeni pristup u vrednovanju utjecaja izbočavanja poprečnog presjeka koji je razvijen posljednjih godina na Sveučilištu Imperial u Londonu, kao rezultat opsežnih istraživanja u ponašanju elemenata od nehrđajućeg čelika opterećenih na tlak i savijanje. Osnova metode je kontinuirana veza između vitkosti poprečnog presjeka i kapaciteta deformacije, materijalna nelinearnost i značajan utjecaj ojačanja uslijed deformacije. Priroda veze između naprezanja i deformacija kod nehrđajućeg čelika, uz odsutnost jasno izražene granice razvlačenja, podrazumijeva da maksimalna vrijednost naprezanja pri kojoj dolazi do iscrpljenja nosivosti presjeka nije određena naprezanjem pri kojem započinje njegova plastifikacija. Prema

ovoj metodi, naprezanje pri kojem dolazi do izbočavanja presjeka predstavlja jedinu fizičku granicu u kontinuiranom poboljšanju mehaničkih svojstava materijala. Metoda kontinuirane čvrstoće ima primjenu kod poprečnih presjeka čija relativna vitkost λ_p ima vrijednost manju od 0,68. Tom je vrijednošću određena granica između vitkih poprečnih presjeka kod kojih do iscrpljenja nosivosti dolazi uslijed izbočavanja u elastičnom području naprezanja i punih presjeka kod kojih se izbočavanje događa u neelastičnom području. Kapacitet deformacije poprečnog presjeka izražava se u normaliziranom obliku, i kod punih presjeka predstavlja odnos deformacije koja odgovara vrijednosti graničnog opterećenja pri kojem dolazi do izbočavanja, ε_{CSM} ($=\varepsilon_{lb}-0,002$) i elastičnog dijela deformacije pri granici razvlačenja $\varepsilon_{0,2,el}$ ($=f_{0,2}/E$).

Prve verzije metode kontinuirane čvrstoće temelje se na Ramberg-Osgoodovom materijalnom modelu, a rezultirale su relativno složenim jednadžbama. Istraživanja su pokazala da usvajanjem pojednostavljenog materijalnog modela proračunske jednadžbe dobivaju oblik prihvatljiviji za implementaciju u tehničke propise. Zbog toga je usvojen dvofazni elastičan - "linearno ojačan" analitički model materijala (slika 6.). Nagib elastičnog područja određen je vrijednošću modula elastičnosti $E=f_{0,2}/\varepsilon_{0,2,el}$ a nagib ojačanog područja E_{sh} nagibom pravca koji prolazi kroz točke određene koordinatama $(\varepsilon_{0,2,el}; f_{0,2})$ i $(0,16\varepsilon_u; f_u)$. Za koordinatni početak usvojena je vrijednost koja odgovara plastičnom dijelu ukupne deformacije od 0,2 %, koja u kombinaciji s definiranim deformacijskim kapacitetom presjeka ε_{CSM} daje točnu procjenu vrijednosti graničnog naprezanja pri kojem dolazi do iscrpljenja nosivosti presjeka, σ_{CSM} :

$$\sigma_{CSM} = f_{0,2} + \frac{f_{0,2}(f_u - f_{0,2})}{E(0,16\varepsilon_u - \varepsilon_{0,2,el})} \left(\frac{0,25}{\lambda_p^{3,6}} - 1 \right) \quad (3)$$

Konačno, proračunska tlačna nosivost poprečnog presjeka određuje se kao rezultat graničnog naprezanja σ_{CSM} i bruto površine poprečnog presjeka A koji je reduciran koeficijentom γ_{M0} . Primjena metode kontinuirane čvrstoće, uz promatranje utjecaja poboljšanja materijala u kutovima hladno oblikovanog presjeka, pokazuje izuzetno visoku razinu podudaranja s rezultatima eksperimentalnog tlačnog ispitivanja kratkog stupa [24] u odnosu na europsku normu [4] koja daje znatno konzervativnije rezultate.

6. Analiza nosivosti elementa na fleksijsko izvijanje

Uzimajući u obzir nelinearnost odnosa naprezanja i deformacija, Engeser (1889) zamjenjuje modul elastičnosti E tangentskim modulom E_t u izrazu za Eulerovu kritičnu silu izvijanja. Teorija tangentskog modula, koja je osnova proračuna u američkim propisima [2], polazi od pretpostavke da je element idealno ravan i bez strukturnih imperfekcija. Prema [2], nominalna vrijednost graničnog naprezanja pri fleksijskom izvijanju σ_n može se izračunati na sljedeći način:

$$\sigma_n = \frac{\Pi^2 E_t}{(kL/i)^2} \quad (4)$$

gdje je k koeficijent dužine izvijanja, a i polumjer inercije. Tangentni modul predstavlja nagib tangente na krivulju σ - ε u točki koja odgovara vrijednosti naprežanja pri kojem dolazi do izvijanja i određuje se prema Ramberg Osgoodovom izrazu:

$$E_t = \frac{E f_{0,2}}{f_{0,2} + 0,002nE(\sigma / f_{0,2})^{n-1}} \quad (5)$$

Budući da se nagib krivulje mijenja s promjenom naprežanja, nužno je primijeniti iterativnu metodu proračuna. Nominalna vrijednost granične sile fleksijskog izvijanja F_n određuje se kao rezultat graničnog naprežanja σ_n i odgovarajuće bruto ili efektivne površine poprečnog presjeka A čiji se proračun temelji na konceptu efektivne širine.

Osnovu proračuna nosivosti elemenata na fleksijsko izvijanje prema europskoj normi [4] predstavlja Ayrton-Perryeva funkcija kojom se uzimaju u obzir nesavršenosti stvarnih elemenata na graničnu nosivost: zaostala naprežanja i geometrijske imperfekcije. Izvjesne razlike u izboru koeficijenta imperfekcije α i granične (početne) relativne vitkosti λ_{cr} , u odnosu na norme za ugljične čelike, [5, 6], nalaze se u utjecajima niske granice proporcionalnosti, značajnom kapacitetu plastifikacije i drugačijoj raspodjeli zaostalih naprežanja. Predložene su samo dvije krivulje izvijanja, C i D, koje uzimaju u obzir ekvivalentne geometrijske imperfekcije elementa, a čiji izbor ovisi o obliku poprečnog presjeka i osi oko koje se izvodi izvijanje. Treba naglasiti da norma [4] ne tretira eksplicitno problematiku nosivosti elemenata na torzijsko i torzijsko-fleksijsko izvijanje, kao i izvijanje elemenata višedijelnog presjeka, a u mnogim odredbama se poziva na norme za ugljične čelike [5, 6]. Ispitivanja provedena posljednjih godina na različitim vrstama nehrđajućih čelika su pokazala da je nužno modificirati Ayrton-Perryevu funkciju uvođenjem koeficijenta nelinearnosti n , prema [41, 42]. Rezultati koje su dobili Rasmussen i Rondal [41] implementirani

su u austalski propis AS/NZS 4673 [7], kao alternativa postupku proračuna prema teoriji tangentnog modula. Utjecaj nelinearnosti je najveći u području srednjih vitkosti elemenata u kojoj materijal s nižim vrijednostima koeficijenta nelinearnosti ima veću vrijednost tangentnog modula, pa samim tim i veću nosivost. U području velike vitkosti, kada do izvijanja elementa dolazi u elastičnom području naprežanja, utjecaj nelinearnosti je zanemariv, a razlike u ponašanju elemenata od ugljičnog i nehrđajućeg čelika su beznačajne. U području malih vitkosti, u kojima nosivost elementa uslijed utjecaja očvršćivanja materijala prekoračuje vrijednost $Af_{0,2}$, nehrđajući čelici su manje osjetljivi na izvijanje od ugljičnih.

7. Zaključak

Općenito uzevši problematika ponašanja konstrukcija od nehrđajućih čelika je novijeg datuma i stoga manje istražena. Što se tiče projektiranja elemenata od nehrđajućeg čelika opterećenih centričnom tlačnom silom, EN 1993-1-4:2006 nije sveobuhvatan i detaljan kao u slučaju ugljičnih čelika. Najnovija istraživanja pokazuju da je ta norma u nekim segmentima prilično konzervativna, što je svakako otežavajuća okolnost u pogledu veće primjene nehrđajućeg čelika, uzimajući u obzir njegovu visoku cijenu. Istraživanja su pokazala važnost boljšega razmatranja postupne plastifikacije i utjecaja očvršćivanja materijala uslijed hladne deformacije. Metoda kontinuirane čvrstoće daje značajno bolje predviđanje tlačne nosivosti punih poprečnih presjeka u odnosu na EN 1993-1-4:2006 i američki propis SEI/ASCE 8-02. Što se tiče fleksijskog izvijanja, u EN 1993-1-4:2006 su predviđene samo dvije krivulje izvijanja (C i D) koje ne obuhvaćaju na jasan način oblik poprečnog presjeka. Također nisu eksplicitno navedene preporuke za proračun nosivosti na torzijsko i torzijsko-fleksijsko izvijanje. Radi poboljšanja konkurentne primjene nehrđajućih čelika u građevinarstvu, nužno je provesti daljnja istraživanja koja će detaljno razmotriti posebnosti i prednosti ovog materijala i ocijeniti ih kroz odgovarajuću tehničku regulativu.

LITERATURA

- [1] Specification for the Design of Light Gauge Cold-Formed Stainless Steel Structural Members, American Iron and Steel Institute, 1968.
- [2] Specification for the Design of Cold-Formed Stainless Steel Structural Members [SEI/ASCE 8-02], American Society of Civil Engineers, 2002.
- [3] Design Manual for Structural Stainless Steel, first Edition, Euro Inox, 1993, second edition, Euro Inox and Steel Construction Institute, 2002, third edition, Euro Inox and Steel Construction Institute, 2006.
- [4] EN 1993-1-4:2006. Eurocode 3. Design of Steel Structures: General rules. Supplementary rules for stainless steels, CEN, 2006.
- [5] EN 1993-1-1:2005. Eurocode 3. Design of Steel Structures: General rules and rules for buildings, CEN, 2005.
- [6] EN 1993-1-3:2006. Eurocode 3. Design of Steel Structures: General rules. Supplementary rules for cold-formed members and sheeting, CEN 2006.
- [7] AS/NZS 4673:2001, Cold formed stainless steel structures, 2001.
- [8] EN 10027-2:1992: Designation systems for steels. Steel numbers, CEN 1992, 2005.

- [9] EN 10088: Stainless steels; EN 10088-1:2005: List of stainless steels; EN 10088-2:2005: Technical delivery conditions for sheet/plate and strip of corrosion resisting steels for general purposes; EN 10088-3:2005: Stainless steels. Technical delivery conditions for semifinished products, bars, rods and sections for general purposes; EN 10088-4:2009: Stainless steels. Technical delivery conditions for sheet/plate and strip of corrosion resisting steels for construction purposes; EN 10088-5:2009: Stainless steels. Technical delivery conditions for bars, rods, wire, sections and bright products of corrosion resisting steels for construction purposes; European Standard, CEN 2005, 2009.
- [10] Hammer, E., Petersen, R.: Column Curves for Type 301 Stainless Steel Aeronautical Engineering Review, Vol. 14, Part 12, pp. 33-39, 45, 48, 1955.
- [11] Johnson, A., Winter, G.: Behaviour of stainless steel columns and beams. *Journal of the Structural Division, ASCE*, 92(ST5), pp. 97-118, 1966.
- [12] Coetzee, J., Van den Berg, G., Van der Merwe, P.: The Behaviour of Stainless Steel Lipped Channel Axially Loaded Compression Members Faculty of Engineering, Rand Afrikaans University, Report MD-55, 1990.
- [13] Rhodes, J., Macdonald, M., McNiff, W.: Buckling of cold-formed stainless steel columns under concentric and eccentric loading. Fifteenth international specialty conference on cold-formed steel structures, St. Louis, Missouri, USA, October 19-20, 2000.
- [14] Bredenkamp, P. J., Van den Berg, G. J.: The Strength of stainless steel built up I section. *Journal of Constructional Steel Research* 34, pp. 131-144, 1995., doi: [http://dx.doi.org/10.1016/0143-974X\(94\)00023-B](http://dx.doi.org/10.1016/0143-974X(94)00023-B)
- [15] Talja, A.: Test Report on Welded I and CHS Beams, Columns and Beam-Columns. Report to ECSC, VTT Building Technology, Finland, 1997.
- [16] Stangenberg, H.: WP3.1, 3.1 & 3.3 Beams, columns and beam-columns - welded I-sections, ECSC Project - Development of the use of stainless steel in construction, Contract number 7210SA/134, RWTH, 2000.
- [17] Rasmussen, K. J. R., Hancock, G. J.: Stainless Steel Tubular Columns - Tests and Design Tenth International Speciality Conference on Cold-Formed Steel Structures, St. Louis, Missouri, USA, 1990.
- [18] Liu, Y., Young, B.: Buckling of stainless steel square hollow section compression members, *Journal of Constructional Steel Research*, 59, pp. 165-177, 2003., doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0143-974X\(02\)00031-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0143-974X(02)00031-7)
- [19] Gardner, L., Nethercot, D.A.: Experiments on Stainless Steel Hollow Sections-Part 2: Member Behaviour of Columns and Beams, *Journal of Constructional Steel Research*, 60, pp. 1319-1332, 2004., doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcsr.2003.11.007>
- [20] Young, B., Wing-Man Lui.: Tests of cold-formed high strength stainless steel compression members, *Thin-Walled Structures* 44, pp. 224-234, 2006., doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.tws.2006.01.006>
- [21] Becque, J., Lecce, M., Rasmussen, K.J.R.: The direct strength method for stainless steel compression members. *Journal of Constructional Steel Research*, 64, pp. 1231-1238, 2008.
- [22] Theofanous, M., Gardner, L.: Testing and numerical modelling of lean duplex stainless steel hollow section columns, *Engineering Structures*, 31(12), 3047-3058, 2009., doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2009.08.004>
- [23] Theofanous, M., Chanb, T. M., Gardner, L.: Structural response of stainless steel oval hollow section compression members. *Engineering Structures*, 31, pp. 922-934, 2009., doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2008.12.002>
- [24] Dobrić, J.: Ponašanja centrično pritisnutih elementa složenog poprečnog preseka od nerđajućih čelika, Doktorska disertacija, Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet, 2014.
- [25] Ramberg, W., Osgood, W.R.: Description of stress-strain curves by three parameters, Technical Note No. 902; 1943.
- [26] Hill, H.N.: Determination of stress-strain relations from offset yield strength values, Technical Note No. 927; 1944.
- [27] Mirambell, E., Real, E.: On the calculation of deflections in structural stainless steel beams: an experimental and numerical investigation, *Journal Constructional Steel Research*, 54, pp. 109-133, 2000., doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0143-974X\(99\)00051-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0143-974X(99)00051-6)
- [28] Rasmussen, K.J.R.: Full-range stress-strain curves for stainless steel alloys, *Journal Constructional Steel Research*, 59, pp. 47-61, 2003., doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0143-974X\(02\)00018-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0143-974X(02)00018-4)
- [29] Gardner, L., Nethercot, D.: Experiments on stainless steel hollow sections - part 1: material and cross-sectional behaviour, *Journal Constructional Steel Research*, 60, pp. 1291-318, 2004., doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcsr.2003.11.006>
- [30] Ashraf, M., Gardner, L., Nethercot, D.A.: Finite element modelling of structural stainless steel cross-sections. *Thin-Walled Struct*, 44, pp. 1048-1062, 2006., doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.tws.2006.10.010>
- [31] Abdella, K.: Inversion of a full-range stress-strain relation for stainless steel alloys, *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 41, pp. 456-63, 2006., doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijnonlinmec.2005.10.002>
- [32] Structural design of cold worked austenitic stainless steel, Final Summary Report, ECSC Project Contract 7210-PR/318 EC, 2005.
- [33] Stainless steel in fire, Final report, Directorate-General for Research, European Commission, Technical Steel Research, 2008.
- [34] Cruise, R.B., Gardner, L.: Strength enhancements induced during cold forming of stainless steel sections, *Journal Constructional Steel Research*, 64, pp. 1310-1316, 2008., doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcsr.2008.04.014>
- [35] Rossi, B., Afshan, S., Gardner, L.: Strength enhancements in cold-formed structural sections - Part II: Predictive models. *Journal Constructional Steel Research*, 83, pp. 189-196, 2013., doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcsr.2012.12.007>
- [36] Gardner, L., Cruise, R.B.: Modeling of residual stresses in structural stainless steel sections. *Journal of Structural Engineering*, 135, pp. 42-53, 2009., doi: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2009\)135:1\(42\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2009)135:1(42))
- [37] Bleich, F.: Buckling Strength of Metal Structures, McGraw-Hill Book Company, pp. 176-179, 1952.
- [38] Van den Berg, G.J.: The Effect of the Non-Linear Stress-Strain Behaviour of Stainless Steel on Member Capacity, *Journal of Constructional Steel Research*, 54, pp.135-160, 2000., doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0143-974X\(99\)00053-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0143-974X(99)00053-X)
- [39] Gardner, L., Theofanous, M.: Discrete and continuous treatment of local buckling in stainless steel elements, *Journal of Constructional Steel Research*, 64, pp. 1207-1216, 2008., doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcsr.2008.07.003>
- [40] Gardner, L., Afshan, S.: The continuous strength method for structural stainless steel design, *Thin-Walled Structures*, 68, pp. 42-49, 2013., doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.tws.2013.02.011>
- [41] Rasmussen, K.J.R., Rondal, J.: Strength curves for metal columns. *Journal of Structural Engineering*, 123, pp. 721-728, 1997., doi: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1997\)123:6\(721\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1997)123:6(721))
- [42] Petr, H., Ludovic, F., Asko, T.: Global stability of thin-walled ferritic stainless steel members, *Thin-Walled Structures*, 61, pp. 106-114, 2012., doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.tws.2012.05.006>