

EKSPERIMENTALNO – TEORIJSKA ANALIZA PARAMETARA OD UTICAJA NA NOSIVOST PRITISNUTIH HOP ŠTAPOVA OD NERĐAJUĆEG ČELIKA

Miroslav T. Bešević¹
Aleksandar S. Landović²

UDK: 669.14.018.8:544.032.2

Rezime: Nerđajući čelik karakteriše osetljivost na plastične deformacije koje izazivaju veću otpornost od otpornosti dobijene u procesu hladne obrade. Različitim načinima opterećenja hladno valjanih poprečnih preseka tokom procesa proizvodnje nastaju preseci jedinstvene šeme distribucije otpornosti i šeme distribucije zaostalih napona, što zavisi od načina proizvodnje. Ispitivan je materijal i raspodela zaostalih napona za dva tipa hladno valjanih profila: hladno valjani preseci i presovani preseci. Otpornost materijala od nerđajućeg čelika, najčešće se uzima kao 0.2% napona granice razvlačenja, u zavisnosti je od veličine plastične deformacije i temperature kojom je izložen tokom proizvodnje i upotrebe. Takođe su razmatrane i početne imperfekcije koje imaju posebnu ulogu kod tanjih poprečnih preseka. Nerđajući čelik iskazuje različite karakteristike u odnosu na ugljenični čelik u vidu anizotropiju, izražen odgovor na proces hladnog oblikovanja, i različite termičke osobine.

Ključne reči: Nerđajući čelik, geometrijske imperfekcije, mehaničke karakteristike zaostali naponi, hop preseci

1. UVOD

Postizanje veće efikasnosti kod projektovanja elemenata od nerđajućeg čelika značajan je za popularizaciju ovog tipa konstrukcija kao i omogućavanje estetski elegantnije i za održavanje komotnije kao i izdržljivije konstrukcije. Na osnovu karakteristične krive otpornosti materijala za nerđajuće čelike, zaključuje se da je on vrlo osetljiv na hladno oblikovanje. Otpornost materijala poprečnih preseka od nerđajućeg čelika, najčešće se uzima kao 0.2% zatezne čvrstoće, što zavisi od veličine plastične deformacije i temperature kojom je izložen tokom proizvodnje i upotrebe. Povećanje otpornosti postignuto tokom proizvodnje hladno valjanih preseka, koji su najzastupljeniji u okviru poprečnih preseka od nerđajućeg čelika, daje im veću otpornost nego što se proračunom pri projektovanju pretpostavlja (1). Upoređivanjem datih rezultata sa rezultatima iz

¹ Dr. Miroslav T. Bešević, v.prof.dipl inž grad., Građevinski fakultet Subotica, Kozaračka 2a, tel: 554-300, e-mail: miroslav.besevic@gmail.com

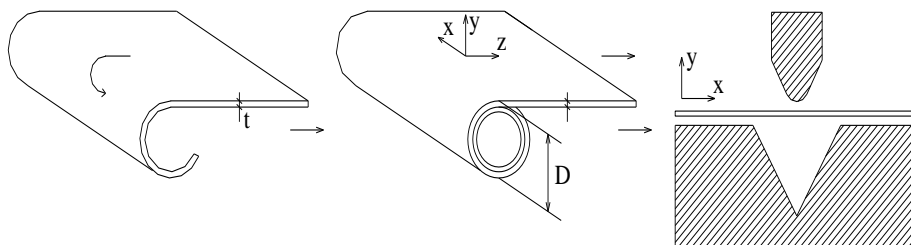
² Aleksandar S. Landović, dipl inž grad., Građevinski fakultet Subotica, Kozaračka 2a, tel: 554-300, e-mail: landovic@gf.uns.ac.rs

drugih analiza ukazuje se na značajan porast izdržljivosti u uglovima presovanih profila od nerđajućih čelika i u ravnim površinama i uglovima hladno valjanih kutijastih profila. Radi kvalitetnijeg određivanja otpornosti materijala izvedeni su Vicker microhardness testovi. Ovim je omogućeno dobijanje naročitih detaljnijih podataka o nadogradnji povećanja otpornosti koji se odnosi na ugaone forme. Otpornost materijala preovlađujuća u segmentima testiranim na zatezanje i izvršena na testovima čvrstoće, upotrebljena je za razvijanje izraza - formula kojim bi se procenila povećanja otpornosti u površinama hladno valjanih kutijastih profila i ujedno uradila provera prethodno predloženih izraza/formula za određivanje povećanja otpornosti u ugaonim zonama presovanih i hladno valjanih profila. U poslednjim godinama može se videti povećana tražnja za visokolegiranim čelicima, uključujući i čelike visoke čvrstoće i nerđajuće čelike u konstruktivnoj primeni. Zahvaljujući kombinaciji otpornosti na koroziju i atraktivne površine i strukturalnim kvalitetima. U prikazanom istraživanju obrađuju se hladno-oblikovani preseći sandučastog oblika od nerđajućeg čelika koji su pogodni za široku upotrebu kao pritisnuti elementi konstrukcije. Nerđajući čelik iskazuje različite karakteristike u odnosu na ugljenički čelik kao što je: nelegirano i asimetrično naponsko-deformacijsko ponašanje, anizotropiju, izražen odgovor na proces hladnog oblikovanja, različit uticaj početnih imperfekcija i različite termičke osobine, stoga raspored zaostalih napona i njihov uticaj na konstrukciju. Elemente od nerđajućeg čelika ne mogu biti zasnovani na istraživanjima na ugljeničnom čeliku. Najsveobuhvatnija merenja u preseccima od nerđajućih čelika su sproveli Cruce i Gardner (2) na tople oblikovanom, presovanom i hladno –oblikovanim preseccima. Najviše magnitude zaostalih napona su uočene u hladno-oblikovanim sandučastim preseccima. Ovi preseći su takođe osnova prikazanog istraživanja, gde je ispitivan odgovor na pritisak i uticaj zaostalih napona. Ostala merenja zaostalih napona na nerđajuće čelike visoke čvrstoće pravouglonog šupljeg preseka RHS 200x110x4 su prikazali Young i Lui (3).

Lei Gao, Hongcai Sun, Fengnian Jin i Hualin Fan (4) su takođe proučavali kapaciteta nosivosti tankovarenih kutijastih profila nevitkih stubova za visokovredni čelik 18Mn2CrMoBA. U poređenju sa predpostavljenim vrednostima od strane AISI koda, testirani kapaciteti nosivosti nevitkih stubova su mnogo veći, što dokazuje na to da metoda efektivne širine i ne bi trebalo biti primenljiva za nevitke stubove od visoko vrednih čelika. Konačnom analizom elemenata zasnovane na ANSYS kodu je primenjen za simuliranje deformacijskih kriva i za određivanje kapaciteta nosivosti. Numeričke vrednosti su uopšteno su se poklapale sa eksperimentalnim vrednostima.

2. PROCES PROIZVODNJE

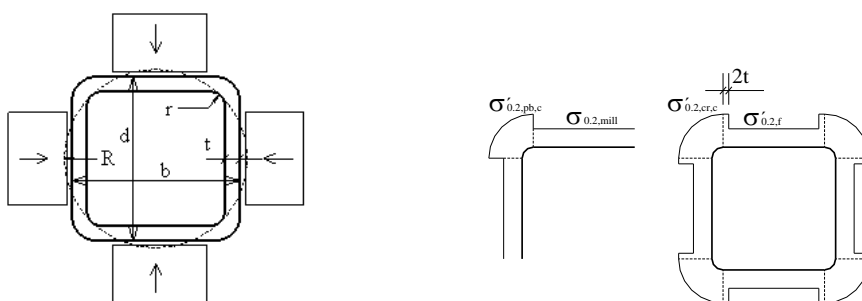
Hladno valjani segmenti od nerđajućeg čelika dobijaju se iz tankih ploča na dva načina. najjednostavniji način formiranja je presovanje, gde se pojedinačni elementi formiraju od ploče materijala pomoću kalupa i alatke. Ovaj način proizvodnje reguliše se ručno i koristi se za proizvodnju malih količina. Ugaoni segmenti kojima smo se bavili u ovoj analizi, formiraju se presovanjem kao što je prikazano na Sl. 1, mada ima i složenijih preseka sastavljenih iz nekoliko delova. Hladno valjanje je više automatizovan proces u okviru kog se iz rolne materijala odvija i izravjava ploča koja se zatim propušta kroz sistem valjaka koji u fazama razvija željeni oblik iz ravne ploče. Ovaj automatizovan proces razvijen je specijalno za proizvodnju velikog broja tipskih elemenata.



Slika 1 – Proces proizvodnje hladnooblikovanih preseka

Kutijasti profili, uključujući i one koji su ovde analizirani, najčešće se dobijaju tako što se prvo formira kružna cev, zatvorena zavarivanjem, naknadno provučena kroz kalup. Ilustracija ovog procesa prikazana je na slici 2-a.

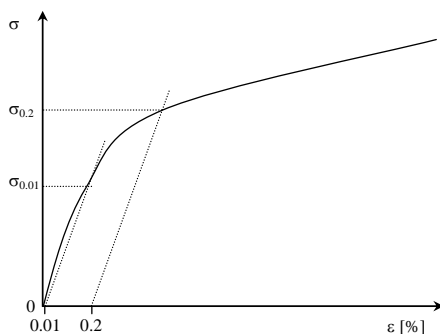
Otpornost materijala dobijenih ploča u svakom od ovih hladnih procesa neophodno je da bude u saglasnosti sa EN 10204(5) a kvalitet se proverava testovima na zatezanje. Ovaj podatak uključuje test 0.2% zatezne čvrstoće. Međutim, nedavno predstavljeni EN 1993-1-4 i EN 10088-2 koda angažuje minimum otpornosti materijala specificiranog u okviru standarda.



Slika 2 – Proces proizvodnje kutijastog preseka i raspodela napona u poprečnom preseku

3. RASPODELA OTPORNOSTI MATERIJALA

Za razliku od preseka od ugljeničnih čelika koji ima jasno izraženu granicu elastičnosti/granica razvlačenja/ nivo tečenja i umereno očvršćavanje, nerđajući čelik ima zaobljenu krivu napon-deformacija uz značajno ojačanje dilatacija u nedostatku jasno definisane tačke tečenja napon 0.2% je usvojen napon $\sigma_{0.2}$ je iz granice proporcionalnosti definisane naponom od 0.01% od plastične dilatacije, prikazano na Sl. 3. Naponsko-deformacijski odgovor preseka od nerđajućeg čelika potiče još iz 1943 godine.



Slika 3 – Dijagram napon-dilatacija za nerđajući čelik

Dodatne glavne razlike u obliku naponsko – deformacijskog odgovora između preseka od nerđajućeg čelika su praćene još i različitim tehničkim osobinama, uključujući specifičnu toplotu, termičku provodljivost, termičko širenje. Sve ovo ima uticaj na formiranje zaostalih napona. Specifična toplota nerđajućeg čelika je oko 500J/kgK dok ugljenični čelik ima ovu vrednost oko 600 J/kgK. Materijal sa nižim specif. toplote ima brže zagrevanje. Za temperature ispod 1000°C termička provodljivost nerđajućih čelika je niža od ugljeničkih čelika, na nižim temperaturama ova razlika je značajna, dok preko 700°C razlika je mala. Koeffcijent termičkog širenja nerđajućeg čelika je i do 50% veća ugljeničnog čelika što može imati za posledicu veću deformaciju materijala tokom unosa toplote i više zaostale napone. Tabelom 1, prikazane su mehaničke karakteristike kod hladno-oblikovanim kvadratnim presecima, serija S1 70x70x2 i S2 70x70x5, sa izmerenim vrednostima E_0 - modula elastičnosti i naponima, prema (6).

Tabela 1 – Izmerene mehaničke karakteristike materijala pri testu na zatezanje

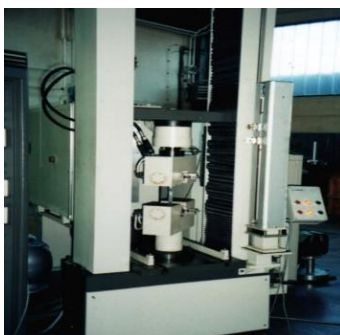
Seriya	D×B×t (mm)	E_0 (GPa)	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	$\sigma_{0.5}$ (MPa)	σ_u (MPa)	ϵ_u (%)	n
S1	70×70×2	195	337	383	636	60	4
S2	70×70×5	194	444	500	688	61	5

Otpornost raste kada se ravne ploče preoblikuju u odgovarajuće ugaone forme, gde umeju da se pojave velike plastične deformacije pri formiranju. Porast otpornosti takođe se može videti u okviru ravnih površina preseka, što je znak da i ravne površine kutijastih profila preseka trpe izvesne plastične deformacije. Ovaj atribut može se uglavnom pripisati početnom kružnom cevastom profilu koji je potom propušten kroz odgovarajući kalup. Sl. 3 prikazuje 0.2% zatezne čvrstoće. Porast otpornosti takođe se može videti u okviru ravnih površina preseka, što je znak da i ravne površine kutijastih profila preseka trpe izvesne plastične deformacije. Ovaj atribut može se uglavnom pripisati početnom kružnom cevastom profilu koji je potom propušten kroz odgovarajući kalup. Ispitivani su uzorci RHS1 i RHS2 su za visokovredne nerđajuće čelike, gde su vrednosti prikazane u tabeli broj 2. Dobijeni podaci zasnivaju se na podacima testova na zatezanje (sl. 4) i opsega ugaonog uvećanja otpornosti definisanog kroz Vickers microhardness testove, za presovane preseke i hladno valjane kutijaste preseke predložena je raspodela 0.2% dokazanog pritiska.

Tabela 2 – Izmerene vrednosti mehaničkih karakteristika

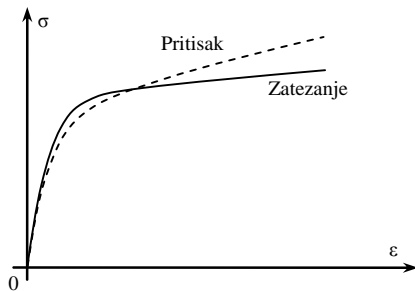
Test serija	Presek D×B×t (mm)	Pozicija	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	σ_u (MPa)	E_o (GPa)	ϵ_f (%)
SHS1	40×40×2	Polje	707	827	216	29
		Ugao	880	1170	214	23
SHS2	50×50×1.5	Polje	622	770	200	37
		Ugao	744	1029	214	23
RHS1	140×80×3	Polje	486	736	212	47
		Ugao	605	804	214	23
RHS2	160×80×3	Polje	536	766	208	40
		Ugao	667	887	214	23

Na sl. 4 prikazan je uređaj –kidalica pri testu na zatezanje epruvete izrađene iz kutijastih preseka.

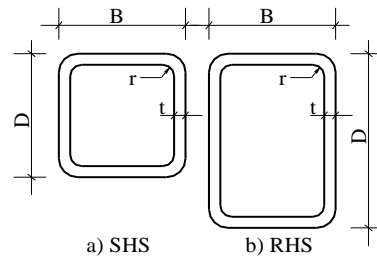


Slika 4 – Uređaj za ispitivanje granice razvlačenja, zatezne čvrstoće, modula elastičnosti i izduženja

Gardner i Nethcot (7) su istraživali uticaje za štapove kvadratnog, pravougaonog i kružnog poprečnog preseka od nerđajućeg čelika klase čvrstoće "Grade 1.4301". Ispitivanje materijala je rađeno tako što su uzorci na ravnim delovima ispitivani na zatezanje i na pritisak dok su uzorci iz uglova ispitivani na zatezanje. Predložena je modifikacija Ramberg-Osgood prikaza kako bi se osiguralo bliže slaganje ponašanja pri pritisku i pri zatezanju za pun raspon dilatacija koje su od interesa. Konvencionalno dimenzionisanje se u značajnoj meri oslanja na činjenicu da je uobičajeno primenjivati materijalni zakon napon-dilatacija u obliku bilinerane krive. Iako su studije ponašanja nerđajućeg čelika manje česte, ipak ih je dovoljno da pokažu kako materijalni zakon nerđajućeg čelika ima zaobljeniju krivu bez oštro iskazanih tačaka tečenja. Ovaj rad opisuje ispitivanja kratkih stubova, zajedno sa odgovarajućim ispitivanjem materijala. Takođe se opisuje kako, modifikovana, verzija poznate Ramberg-Osgood formule može da se koristi kao zavisnost napon-dilatacija za ravan materijal pri zatezanju ili pri pritisku kao i za, nešto drugačije, ponašanje materijala u uglovima. Osnovna namena ispitivanja kratkih stubova je dobijanje zavisnosti između apliciranog opterećenja i deformacijskog kapaciteta u obliku krive "opterećenje-skraćenje". Ove krive su onda korišćene za izražavanje eksplicitnog izraza za odnos između deformacijskog kapaciteta i deformabilnosti poprečnog preseka, uključujući i tolerancije kod oslanjanja najkritičnijih pločastih elementa u odnosu na okolne komponente. U ovim odnosima i leži osnovna ideja za novi pristup dimenzionisanju. Ispitivanja stubova i greda su predstavljena u drugom delu ovog rada.



Slika 5 – Poređenje prosečnih kriva napon-dilatacija



Slika 6 – Testirani uzorci pri zatezanju i pri pritisku

Na osnovu daljih analiza raspoloživih podataka sa ispitivanja datih u Tabeli 3, zaključeno je da bi napon na granici razvlačenja 0.2% ($\sigma_{0.2c}$) mogao da bude precizno opisan kao fiksni procenat granične vrednosti napona materijala na ravnom delu profila σ_u . Prema tome, predlaže se da $\sigma_{0.2c}$ bude izražen kao: $\sigma_{0.2c} = 0.85 \sigma_u$. Na osnovu izraženog stepena ojačanja materijala preko dilatacija koju pokazuje nerđajući čelik, hladno oblikovane zone uglova hladno valjanih nerđajućih SHS i RHS profila imaju napon na granici razvlačenja 0.2% najčešće između 20% i 100% veće nego isti napon na ravnim delovima. Ovo je praćeno odgovarajućim gubitkom duktilnosti.

Tabela 3 – Rezultati ispitivanja na zatezanje materijala uzetog u ravnim zonama i u zonama uglova hladno valjanih SHS i RHS profila.

Serije	r_s/t	u polju preseka		u uglu preseka			ugao / polje			
		$\sigma_{0.2}$ (MPa)	σ_u (MPa)	$\sigma_{0.2c}$ (MPa)	$\sigma_{1.0c}$ (MPa)	$\sigma_{u,c}$ (MPa)	$\sigma_{0.2c}/\sigma_{0.2}$	$\sigma_{0.2c}/\sigma_u$	$\sigma_{1.0c}/\sigma_u$	$\sigma_{u,c}/\sigma_u$
SHS80×80×3 ^a	0.84	408	695	580	-	805	1.42	0.83	-	1.16
SHS80×80×4 ^b	1.18	457	706	594	723	820	1.30	0.84	1.02	1.16
SHS100×100×2 ^b	0.68	382	675	587	745	820	1.54	0.87	1.10	1.21
SHS150×150×4 ^b	1.57	314	659	563	649	844	1.79	0.85	0.98	1.28
RHS100×50×6 ^b	0.93	605	754	631	773	802	1.04	0.84	1.03	1.06
RHS150×100×4 ^b	1.46	297	663	572	690	809	1.93	0.86	1.04	1.22

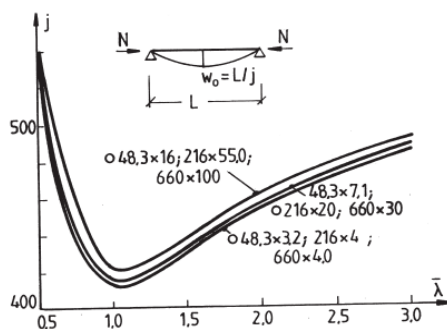
Za proučavanje kapaciteta nosivosti tankozidnih kutijastih profila nevitkih stubova od visoko vrednog čelika 18Mn2CrMoBA izveden je eksperiment jednoosilalnog pritiska uzoraka sa različitim geometrijskim dimenzijama prema Lei Gao, Hongcai Sun, Fengnian Jin i Hualin Fan (8).

U poređenju sa pretpostavljenim vrednostima od strane AISI koda, testirani kapaciteti nosivosti nevitkih stubova su mnogo veći što dokazuje na to da metoda efektivne širine i ne bi trebalo biti primenljiva za nevitke stubove od visoko vrednih čelika. Konačnom analizom elemenata zasnovane na ANSYS kodu je primenjen za simuliranje deformacijskih kriva i za određivanje kapaciteta nosivosti. Numeričke vrednosti su uopšteno su se poklapale sa eksperimentalnim vrednostima.

Na osnovu izraženog stepena ojačanja materijala preko dilatacija koju pokazuje nerđajući čelik, hladno oblikovane zone uglova hladno valjanih nerđajućih SHS i RHS profila imaju napon na granici razvlačenja 0.2% najčešće između 20% i 100% veće nego isti napon na ravnim delovima. Ovo je praćeno odgovarajućim gubitkom duktilnosti.

4. GEOMETRIJSKE IMPERFEKCIJE

Za upoređenje, prema (9) početne izmerene imperfekcije- w_0 za cevaste preseke koje su date u funkciji dužine profila i parametar imperfekcije j . Slika 7 prikazuje grafičku interpretaciju izmerenih vrednosti.



Slika 7 – Parametar imperfekcije j za cevaste preseke u funkciji krive izvijanja

Rad (10) analizira kutijaste hladnooblikovane profile od nerđajućeg visokovrednog čelika sa naponom $\sigma_u=680$ MPa. Početne geometrijske imperfekcije za kutijaste profile, serije S1L i S2L, su izmerene vrednosti za x i y osu i vrednosti su prikazane u Tabeli 4.

Tabela 4 – Izmerene geometrijske početne imperfekcije prema (10)

Uzorak	δ_x/L	δ_y/L
S1L1200	1/4970	1/44100
S1L2000	1/2100	1/10500
S1L2800	1/4410	1/44100
S1L3600	1/950	1/5150
S2L1200	1/44100	1/3780
S2L2000	1/5250	1/1050
S2L2800	1/1100	1/44080
S2L3600	1/950	1/28350

Autori Lei Gao, Hongcai Sun, Fengnian Jin i Hualin Fan su prikazali u tabeli 5 izmerene vrednosti uzoraka i početna imperfekcija štapova serije SC1, SC2, SC3 i SC4 visokovrednih nerđajućih čeličnih preseka.

Tabela 12 – Merene dimenzije ispitivanih uzoraka sa početnom imperfekcijom

Uzorak	t (mm)	L (mm)	h (mm)	b (mm)	λ_x	λ_y	δ (mm)	δ/L
ts1	3.44	29		20.02				
ts2	3.30	29		20.00				
ts3	3.34	29		20.10				
SC1	3.28	347	61.08	58.62	14.7	15.2	0.4	1/867
SC2	3.24	399	62.00	121.4	9.1	15.3	0.75	1/532
SC3	3.30	399	61.62	120.8	9.1	15.5	0.3	1/1330
SC4	3.20	395	88.34	182.2	5.9	10.5	0.7	1/564

5. ZAOSTALI NAPONI

Kao rezultat na ponašanje poprečnih preseka od nerđajućih čelika utiču čvrstoća, duktilnost i prisustvo zaostalih napona, koji direktno zavise od načina proizvodnje preseka. U radu se ispituje prisustvo i uticaj zarobljenih napona u hladno-oblikovanim sandučastim presecima pomoću eksperimentalnih i numeričkih metoda. U ranijim radovima vrednosti zaostalih napona su bili računati pomoću merene površinske dilatacije, a raspodela napona po debljini zida preseka se pretpostavljala.

U ovom radu raspodela zaostalih napona po debljini zida preseka hladno-oblikovanih preseka je izmerena pomoću difrakcije x-zraka, a njihov efekat na konstruktivno ponašanje je bilo pažljivo procenjeno kroz detaljno nelinearno numeričko modeliranje. Takođe su eksperimentalno ispitivani i geometrijske imperfekcije, osobine materijala ravnih i zaobljenih delova, kao i ponašanje pri pritisku sandučastog čeličnog preseka, što je u radu i prikazano. Iz merenja difrakcije x-zraka (DX-Z) je zaključeno da se uticaj rasporeda zaostalih napona po debljini zida kod pravougaonih preseka od nerđajućeg čelika može efektivno predstaviti pomoću pravougaone blok raspodele. Prilikom razvijanja ABAQUS računskog modela uzete su u obzir i nelinearne karakteristike materijala, početne geometrijske imperfekcije, zaostali naponi (membranski i savojni) i povećanje čvrstoće na uglovima profila. Zaostali naponi zajedno sa odgovarajućim plastičnim dilatacijama su uračunati u računski model pomoću Sigini i Hardini fortranskih podprograma. Od dve komponente zaostalih napona, naponi od savijanja su određeni da imaju veću vrednost i veći (često pozitivni) uticaj na konstruktivno ponašanje tankozidnih hladno-oblikovanih preseka od nerđajućeg čelika.

U prikazanom istraživanju obrađuju se hladno-oblikovani preseki sandučastog oblika od nerđajućeg čelika koji su pogodni za široku upotrebu kao pritisnuti elementi konstrukcije. Najsveobuhvatnija merenja u presecima od nerđajućih čelika su sprovedi Cruce i Gardner (11) na toplo oblikovanim, presovanim i hladno-oblikovanim presecima. Najviše magnitude zaostalih napona su uočene u hladno-oblikovanim sandučastim presecima. Ovi preseki su takođe osnova prikazanog istraživanja, gde je ispitivan odgovor na pritisak i uticaj zaostalih napona. Ostala merenja zaostalih napona na nerđajućem čeliku visoke čvrstoće pravouglog šupljg preseka RHS 200x110x4 su prikazali Young i Lui.

Eksperimentalni program sproveden u sklopu ove analize, se sastojao u merenju zaostalih napona u pravougaonim sandučastim presecima od nerđajućeg čelika difrakcijom X – zraka i ispitivanju ovih preseka na pritisak, gde su rezultati kasnije korišćeni pri računskom modeliranju. Sav testiran materijal je od nerđajućih čelika klase 1.4301 koji se široko koristi u konstruktivne svrhe. Prateća merenja su obuhvatila testiranje materijala na pravim i ugaonim delovima preseka kako je to prikazano slici 8.

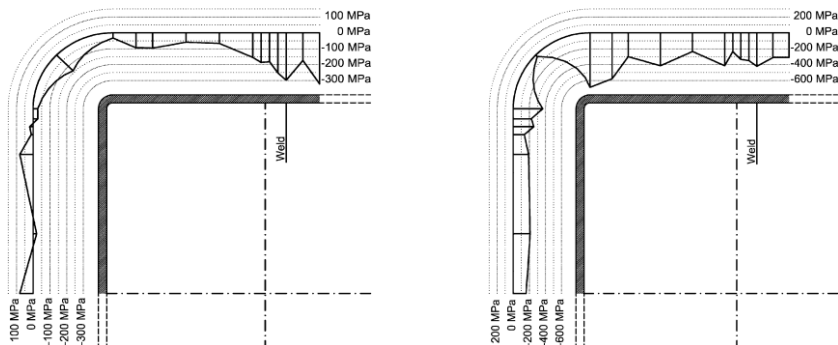
Zaostali naponi u konstrukcijskim presecima se najčešće procenjuju metodom presecanja, kod koje se vrednosti zaostalih napona zaključuju iz kombinacije merenja površinske dilatacije i pretpostavljene raspodele napona po debljini preseka.

Difrakcijom X-zraka omogućeno je direktno određivanje zaostalih napona po debljini preseka. Metoda DX-Z se zasniva na merenju promene rastojanja između ravni kristalne rešetke u mikrostrukтури materijala, otkrivajući elastične deformacije kao što je to opisno Borgovim zakonom.



Slika 8 – Merenje zaostalih napona difrakcijom X-zraka

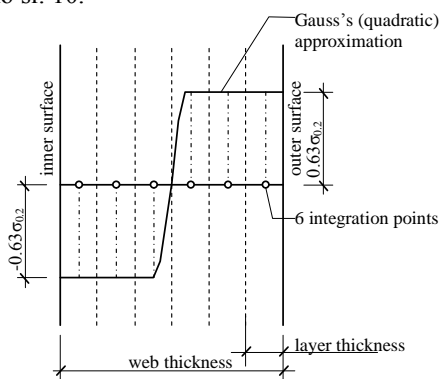
Površinski napon se može odrediti do dubine od 5-10 mikrona. Za merenje po debljini preseka pojedini slojevi moraju biti elektrolitski uklonjeni. U opisanim merenjima korišćen je X- zrak prečnika 1.8 mm, zajedno sa 10 mm uzorkom oscilacija po dužoj osi uzorka kako bi se poboljšala pouzdanost merenja. Aparatura za merenje DX-Z i konfiguracija je prikazana na slici 8. Ukupno je izvršeno 20 površinskih merenja i dva merenja do polovine debljine zida preseka profila 100x80x2. Površinska merenja su pokazala tanak sloj pritisnutih zaostalih napona na spoljašnjoj površini preseka, za koje se veruje da su nastali kontaktom sa alatom za oblikovanje i mogu biti povoljni u smislu poboljšanja otpornosti napona-korozije–prskanja. Vrednosti ovih površinskih napona u poprečnom –transverzalnom pravcu su 2 puta veći od onih u podužnom – longitudinalnom pravcu. Dva merenja po debljini zida izvršena su u tački 3 (na mestu šava) i tački 1 (8mm od šava).



Slika 9 – Izmerene vrednosti zaostalih napona u podužnom i poprečnom pravcu

Na sl. 9 uopšteno su prikazani zatežuci naponi u podužnom pravcu na spoljašnjoj debljini zida uzorka uz izoliranje pomenutog tankog pritisnutog sloja. Ovi naponi, čini se imaju uniformnu raspodelu po polovini debljine i samim time se mogu predstaviti pravougaonom blok raspodelom kao što su pretpostavili Cruse, Cruse i Gardner kada su ustanovili magnitude zaostalih napona. iz oslobodene površinske dilatacije presecanjem. Osnovni uticaj zaostalih napona na konstruktivne element je izazivanje razvlačenja koje

dovodi do slabljenja nosivosti, stoga treba uzeti u obzir značaj ovih uticaja pri predviđanju ponašanja konstrukcije. Dve komponente podužnog zaostalog napona mogu biti identifikovane iz napona oslobođenih prilikom pravljenja preseka: membrane (povezane sa osnim/aksijalnim naponom) i savijanjem (povezan sa promenom napona u zavisnosti od promene debljine materijala). Na osnovu izmerenih vrednosti napona tokom segmentiranja izvodi se zaključak da se u okviru 2 tipa hladno obrađenih preseka javlja mali površinski napon (10%-40% od odgovarajuće vrednosti 0.2% napona koji prevladavaju u uzorcima testiranim na zatezanje), ali veći zaostali napon savijanja, posebno u hladno valjanim profilima (10%-40% od odgovarajuće vrednosti 0.2% napona koji prevladavaju u uzorcima testiranim na zatezanje). Zaostali napon savijanja zasniva se na pretpostavljenoj pravougaonoj blok distribuciji zaostalnih napona kroz debljinu, kao što je detaljno prikazano sl. 10.



Slika 10 – Raspodela zaostalnih napona po debljini preseka

Zaostali naponi savijanja se principijelno povezani sa plastičnom deformacijom. Pošto je zaostali napon savijanja ponovo unet u krivu tokom testova na zatezanje (pri ojačavanju) podaci o materijalu ovde upotrebljeni za procenu stepena ojačanja uključuju i sve efekte izazvane zaostalim naponima savijanjem. Površinski napon nije uračunat u stanje napona koji egzistiraju u uzorcima pri testovima na zatezanje i smatra se da imaju mnogo veći uticaj na ponašanje/reakcije konstrukcije. Kao takvi često su uključenu u konačne simulacije elemenata. Brojne studije su utvrdile da je uticaj površinskih zaostalnih napona na ponašanje konstruktivnih hladno formiranih preseka generalno mali.

Prvenstveni uticaji zaostalnih napona su prema R.B. Cruise, Leroy.Gardner (12) na konstruktivne elemente je pojava preuranjenog tečenja što ima posledicu gubitka krutosti i redukciju nosivosti. Zaostale napone u hladnooblikovanim presecima su još istraživali Chen i Ross i Koto i Aoki , a presovane preseke su istraživali Wang i Whute.

Uz povećanu upotrebu nerđajućih čelika u konstrukcijama važno je odrediti zaostale napone, koji postoje u elementima konstrukcije. Ne može se pretpostaviti da su zaostali naponi u presecima od nerđajućih čelika, iste veličine i rasporeda kao u presecima ugljeničnih čelika i to zahvaljujući različitim termičkim osobinama nerđajućih čelika.

Postoje 3 uočena tipa zaostalnih napona. Tip 1 zaostalnih napona se ponaša i uravnotežava na mikroskali. Upravo napon tip 1 kada se javlja po dužini elementa ima najveći uticaj na konstruktivno ponašanje. Tip 2 i 3 zaostalnih napona utiče na mikro skali i povezani su lokalnim rasporedom napona izazvanim između metalnih čestica. Tehnike za merenje zaostalnih napona tipa 1 mogu se svrstati u destruktivne i u ne destruktivne. U ne

destruktivne metode spadaju rendgen, neutronska ili elektronska difrakcija, ultrasonična metoda i magnetna metoda. Destruktivne metode se oslanjaju na merenje deformacija usled oslobađanja zaostalih napona pri uklanjanju materijala sa uzorka. Presecanje je glavna destruktivna tehnika koja se upotrebljava za merenje zaostalih napona u strukturnim članovima. Ova metoda se često koristi za analizu zaostalih napona u strukturi ugljeničnog čelika, aluminijuma i nerđajućeg čelika.

Dodatni uticaj na zaostale napone kod hladnooblikovanih kutijastih profila imaju varovi korišćeni za zatvaranje preseka i formiranje cevi.

6. ZAKLJUČAK

Ponašanje tankozidnih kutijastih kratkih elemenata od nerđajućih i visokovrednih čelika je proučavano preko parametra koji utiču na nosivost pritisnutih štapova-stubova. U ovom radu su analizirani osnovni parametri od uticaja kao što su:

- povećane mehaničke karakteristike - otpornost hladnooblikovanih profila kao posledica ojačanja posebno u uglovima profil usled tehnologije proizvodnje.
- Raspodela, vrste i veličine zaostalih napona kao posledica dilatacije materijala. Analizirani su i uticaji zaostalih napona po debljini zida preseka, koja je sprovedena metodom bez razaranja-pomoću difrakcije x-zraka. Na osnovu ovog merenja konstatovana je pravougaona raspodela zaostalih napona, na jednoj strani zida pritisak, a na drugoj zatezanje.
- Početne geometrijske imperfekcije uzoraka koji su obuhvaćeni testovima pritiska.
- Dobijene vrednosti parametara su upoređivane sa vrednostima koje su pretpostavljene važećim standardima, gde su testirane vrednosti nosivosti visokovrednih tankih kutijastih kratkih stubova mnogo veće. Metod proračuna predložen od strane AISI standarda je previše konzervativan za visokovredne varene kutijaste kratke stubove.
- Konačna formula nosivosti za visokovredne čelilne kratke stubove predložena je i slaže se sa numeričkim vrednostima. Iako podaci testiranja nisu u potpunosti dovoljni da bi otkrili mehaničko ponašanje, dizajneri –projektanti mogu dobiti neke korisne savete od eksperimenata i analitičkih analiza visokovrednih čeličnih kratkih elemenata. Za primenu navedenih aplikacija na druge visokovredne čelike i više različitih geometrijskih preseka i dimenzija, trebalo bi izvršiti više eksperimata i simulacija.

LITERATURA

- [1.] M. Bešević, Doktorska disertacija –Građevinski fakultet u Beogradu /1999/
- [2.] Rachel B. Cruise, Leroy Gardner/2008/352-366, Journal of Constructional Steel Research
- [3.] Ben Young, Wing-Man Lui, Thin –Walled structures/2006,224-234/Test of cold high strength stainless steel compression members
- [4.] Lei Gao, Hongcai Sun, Fengnian Jin, Hualin Fan, Load-carrying capacity of high-strength steel box-sections I: Stub columns/2008/July, Journal of Constructional Steel Research

- [5.] EUROCODE 3 / EN 1993-1-4 i EN 10088-2 Cruise, /2006/
- [6.] Ehab Ellobady, Ben Young, Structural performance of cold-formed high strength stainless steel columns- Journal of Constructional Steel Research-- 2005/1631-1649
- [7.] L.Gardner, D.A. Nethercot: Experiments on stainless steel hollow sections- Part 1: Material and cross-sectional behavior - Journal of Constructional Steel Research 2004/1291-1318
- [8.] Ehab Ellobady, Ben Young, Structural performance of cold-formed high strength stainless steel columns- Journal of Constructional Steel Research-- 2005/1631-1649
- [9.] J. Lidnder- Stability of structure members-General report – Journal of Constructional Steel Research/ 2000/29-44
- [10.] Y.Liu, B.Young :Buckling of stainless steel square hallow section compression members – Journal of Constructional Steel Research--2003/165-177
- [11.] Rachel B. Cruise, Leroy Gardner, Strength enhancements induced during cold forming of stainless of steel section - Journal of Constructional Steel Research, 2008/1310-1316
- [12.] M. Jandera, L.Gardner, J.Machacek, Residual stresses in cold-rolled stainless steel hollow section, Journal of Constructional Steel Research-2008/1255-1263

EXPERIMENTAL – THEORETICAL ANALYSIS OF PARAMETERS THAT INFLUENCE THE RESISTANCE OF COMPRESSED STAINLESS STEEL HOLLOW MEMBERS

***Summary:** Stainless steel has characteristic that plastic deformation produce greater resistance from resistance obtained during proces of cold forming. Different patterns of loading during the proces of cold rolling produce typical distribution of strength enhancements and distribution of residual stress, which depends on manufacturing process. Material characteristics and residual stress distribution were examined for two types of cold formed section, which are: cold rolled section and press braked section. In analysis of section made from stainless steel resistance is taken from 0.2% stress proof test. Resistance also depends on magnitude of induced plastic deformation and temperature used during manufacturing process. Also, this paper deals with initial geometrical imperfections which are of great importance in thin wall cross section. Stainless steel shows different characteristics compared with carbon steel, such as anisotropy, pronounced response on cold forming process and different thermic characteristics.*

***Key words:** Stainless steel, geometric imperfection, mechanical properties, residual stress, hollow section*