

Društvo građevinskih konstruktera Srbije

15. KONGRES

ZLATIBOR, 6-8. SEPTEMBAR 2018.

ZBORNİK RADOVA SA NACIONALNOG KONGRESA DGKS

ДГКС АСЕС

U SARADNJI



POKROVITELJ



Република Србија
Министарство
просвете, науке и
технолошког развоја

SPONZORI



ŠIRBEGOVIĆ®
INŽENJERING

PUT INŽENJERING

ADING
sastojak svake građevine



peikko®
group

ME
ENERGOPROJEKT

MARTINI
GRADNJA D.O.O.



CIP - Каталогизација у публикацији
Библиотека Матице српске, Нови Сад

624+69(082)

ДРУШТВО грађевинских конструктора Србије. Конгрес (15 ; 2018 ; Златибор)

Zbornik radova sa nacionalnog kongresa DGKS [Elektronski izvor] / Društvo građevinskih konstruktera Srbije, 15. kongres, 6-8. septembar 2018, Zlatibor ; [urednici Đorđe Lađinović, Zlatko Marković, Boško Stevanović]. - Beograd : Društvo građevinskih konstruktera Srbije, 2018 (Novi Sad : Grafički centar - GRID, Fakultet tehničkih nauka Univerziteta). - 1 elektronski optički disk (CD-ROM) : tekst, slika ; 12 cm

Sistemska zahtevi: Nisu navedeni. - Nasl. sa naslovnog ekrana. - Tiraž 250. - Radovi na srp. i engl. jeziku. - Bibliografija.

ISBN 978-86-6022-069-3

a) Грађевинарство - Зборници
COBISS.SR-ID [325101831](#)

Izdavač:	Društvo građevinskih konstruktera Srbije Beograd, Bulevar kralja Aleksandra 73/I
Urednici:	prof. dr Đorđe Lađinović prof. dr Zlatko Marković prof. dr Boško Stevanović
Tehnički urednik:	doc. dr Jelena Dobrić
Tehnička priprema:	asist. Nina Gluhović asist. Marija Todorović
Grafički dizajn:	asist. Tijana Stevanović
Dizajn korica:	asist. Tijana Stevanović
Štampa:	Grafički centar – GRID Fakultet tehničkih nauka Univerziteta u Novom Sadu
Tiraž:	250 primeraka Beograd, septembar 2018.

Kristina Kostadinović Vranešević¹, Nina Gluhović², Jelena Dobrić³, Milan Spremić⁴

POREĐENJE PONAŠANJA TANKIH CILINDARIČNIH LJUSKI OD UGLJENIČNOG ČELIKA I NERĐAJUĆEG ČELIKA

Rezime:

Tanke kružne cilindrične ljuske predstavljaju jedan od složenijih konstruktivnih elemenata u pogledu ponašanja i osjetljivosti na izbočavanje. U radu je dat kratak teorijski osvrt sa prikazom različitih, trenutno dostupnih, proračunskih preporuka. Prikazana je numerička analiza uticaja početnih imperfekcija na nelinearno ponašanje kružnih cilindričnih ljuski. Analizirane su ljuske različite debljine zida, sa konstantnim vrednostima dužine i prečnika ljuske, kao i sa različitim vrednostima početnih imperfekcija. Analiza obuhvata uticaj materijalne i geometrijske nelinearnosti na ponašanje cilindričnih ljuski od ugljeničnog i nerđajućeg čelika, uključujući eksperimentalne krive napon-dilatacija. U radu je pokazano da materijalna nelinearnost i početna geometrijska imperfekcija dovode do značajnog pada nosivosti na izbočavanje cilindrične ljuske.

Кljučне речи: cilindri srednje dužine, početne imperfekcije, izbočavanje, redukциони faktor

CARBON STEEL vs. STAINLESS STEEL BEHAVIOR OF THIN-WALLED CYLINDRICAL SHELLS

Summary:

Thin-walled cylindrical shells represent one of the most complex constructive elements, considering their behaviour and susceptibility to buckling. In this paper is given a brief theoretical review including the presentation of different currently available design recommendations. Influence of initial imperfections on nonlinear behaviour of cylindrical shells is also presented through numerical analysis. Cylindrical shells with different wall thicknesses and different values of initial imperfections, but constant length and diameter of shell are analysed. Numerical analysis includes materially and geometrically nonlinear analysis of cylindrical shells, using experimentally obtained stress-strain relation of carbonsteel and stainless steel. Material nonlinearity and initial geometrical imperfections resulted in significantly lower buckling resistance of cylindrical shells.

Key words: medium-length cylinders, initial imperfections, buckling, knockdown factor

¹Asistent - student doktorskih studija, Univerzitet u Beogradu Građevinski fakultet, kkostadinovic@grf.bg.ac.rs

²Asistent - student doktorskih studija, Univerzitet u Beogradu Građevinski fakultet, nina@imk.grf.bg.ac.rs

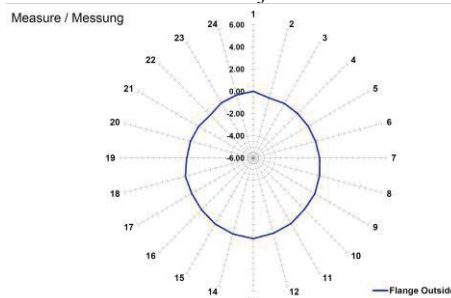
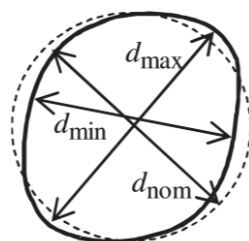
³Doc. dr, Univerzitet u Beogradu Građevinski fakultet, jelena@imk.grf.bg.ac.rs

⁴Doc. dr, Univerzitet u Beogradu Građevinski fakultet, spremic@imk.grf.bg.ac.rs

1. UVOD

Tanke kružne cilindrične ljske su konstruktivni elementi koji su našali široku primenu u praksi. Bilo da se radi o limenci piva ili delu za rakete, neophodno je temeljno poznavanje svih njihovih karakteristika. Naročito je specifična analiza stabilnosti i šablon izbočina (*buckling pattern*) koji se formira.

Stvarne ljske su nesavršeni elementi i kao takvi imaju određene imperfekcije. Može se izvršiti podela na tri osnovna tipa imperfekcija: geometrijske, strukturalne i imperfekcije u opterećenju. U analizi se najčešće koriste geometrijske imperfekcije zbog jednostavnosti njihovog definisanja, a pokazale su se i kao adekvatne za opisivanje bilo koje vrste imperfekcija. Dobro je poznato da najveći uticaj na stabilnost cilindra imaju geometrijske imperfekcije koje se mogu zadati u obliku koji odgovara geometriji sopstvenih tonova izbočavanja. Ovakva pretpostavka značajno odstupa od realne ali je u građevinarstvu našla široku primenu. Razlog je mali broj dostupnih merenja imperfekcija na stvarnim konstrukcijama. Na slici 1 prikazano je merenje geometrijskih imperfekcija poprečnog preseka stuba vetrogeneratora poluprečnika 4 m. Imperfekcije su takođe promenljive u različitim fazama gradnje, kao i u toku eksploatacije. U građevinarstvu, izbočavanje cilindrične ljske je merodavan kriterijum za dimenzionisanje dimnjaka, stubova vetrogeneratora, silosa itd. Viši nivo izvođenja podrazumeva manje geometrijske imperfekcije ali takođe zahteva i znatno viši nivo tehnologije izvođenja što je i direktno povezano troškovima izvođenja.



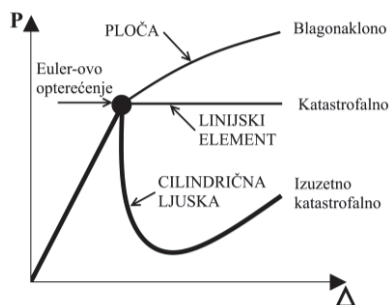
Slika 1 – Geometrijske imperfekcije poprečnog preseka cilindrične ljske

Može se zaključiti da veliki broj parametara utiče na ponašanje kružnih cilindričnih ljski. Za praktičnu primenu potrebno je čitav problem pojednostaviti ali ostati na strani sigurnosti. Zbog toga predmet istraživanja ovog rada jeste uticaj različitih vrednosti početnih geometrijskih imperfekcija koje odgovaraju prvom sopstvenom tonu izbočavanja.

2. AKSIJALNO OPTEREĆENE KRUŽNE CILINDRIČNE LJUSKE

Tokom poslednjih decenja velika pažnja je bila usmerena na analizu problema stabilnosti cilindričnih ljski. Istraživanja su dovela do zaključaka koji imaju interes i benefit za naučnu ali i stručnu projektantsku javnost i u slučaju aksijalno napregnutih ljski izloženih dejstvu pritiska i/ili torzije. U radu je data analiza aksijalno napregnutih ljski, dok se ostali vidovi naprežavanja nisu razmatrali. Razlog je značajno drugačije ponašanje pri aksijalnom opterećenju

u odnosu na ponašanje ploča i stubova [1]. Slika 2 prikazuje krive sila-deformacija dobijene analizom ponašanja različitih konstruktivnih elemenata izloženih aksijalnom pritisku, inicijalnu fazu, graničnu fazu pri kojoj dolazi do gubitka stabilnosti i postkritičnu fazu nakon izbočavanja.



Slika2 – Krive sila-deformacija za različite pritisnute konstruktivne elemente [2]

2.1. LINEARNA TEORIJA – KRITIČNO OPTEREĆENJE

Ponašanje kružnih cilindričnih ljuski zbog svoje kompleksnosti nije moguće opisati jedinstvenim setom jednačina jer bi one bile previše komplikovane i bez praktične primene. Iz navedenih razloga uvode se određena uprošćenja zanemarujući veličine koje imaju mali uticaj na razmatrani fenomen. Više različitih setova jednačina u zavisnosti od usvojenih pojednostavljenja je razvijeno.

Jedan takav set jednačina za opisivanje ponašanja ljuski predložio je Donnell [3]. U slučaju aksijalno opterećenih ljuski set je moguće svesti na jednu jednačinu osmog reda, koja je poznata kao Donnell-ova jednačina i može se koristiti za određivanje kritičnog opterećenja kako usled aksijalnog pritiska, tako i usled torzije i unutrašnjeg pritiska.

Kritičnu vrednost opterećenja moguće je dobiti rešavanjem Donnell-ove jednačine i jedno takvo rešenje dao je Batdorf [4] za slobodno oslonjen cilindar na oba kraja. Dobijeno rešenje, koje se u literaturi još naziva i klasično rešenje, prikazano je jednačinom (1):

$$\sigma_{cr} = \frac{1}{\sqrt{3(1-\mu^2)}} \frac{Et}{r} \quad (1)$$

gde je:

E modul elastičnosti materijala,

μ Poisson-ov koeficijent,

t debljina zida cilindra,

r poluprečnik cilindra.

Jednačina (1) je primenjiva na cilindre srednje dužine koji su najzastupljeniji u praksi, pa shodno tome i od velike važnosti.

2.2. NELINEARNA TEORIJA - LOM I POST-KRITIČNO PONAŠANJE

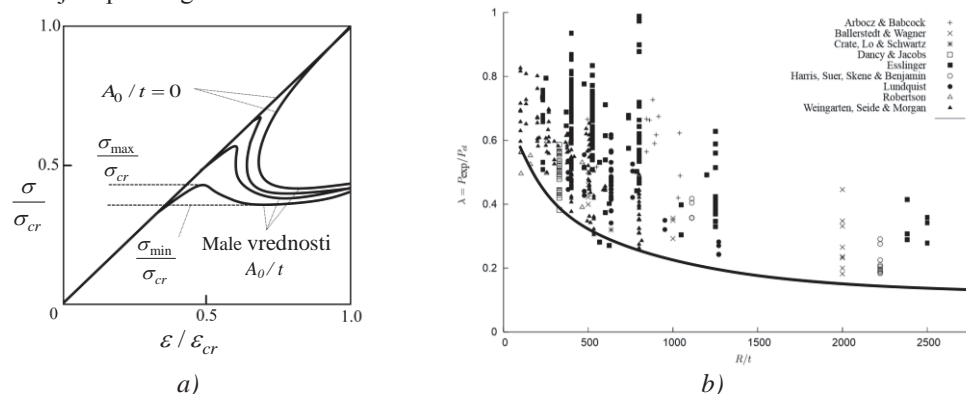
Eksperimentalna ispitivanja ljuski su pokazala da je kritičan napon pri kome dolazi do loma često značajno manji od teorijski dobijenog primenom linearne teorije. Stoga se može izvesti zaključak da je linearna teorija neadekvatna za opisivanje ponašanja aksijalno pritisnutih cilindara, i da se opisivanje realnog ponašanja može postići primenom nelinearne teorije velikih deformacija.

Značajan napredak u razumevanju ponašanja cilindričnih ljuski napravio je Donnell 1934. godine. On je uvideo važnost primene nelinearne teorije, odnosno značaj iznalaženja ne samo opterećenja pod kojim dolazi do bifurkacione stabilnosti cilindrične ljuske, već i postkritičnog ponašanja ljuski. Prva primenjiva rešenja pojavila su se 1941. godine od strane von Kármán-a i Tsien-a. U osnovi njihovo rešenje koristi iste jednačine teorije velikih deformacija kao i Donnell, aproksimirajući poprečne deformacije funkcijom kojom se dolazi do realnog šablona izbočavanja aksijalno pritisnutog cilindra. Njihovo najvažnije zapažanje je nagli pad na dijagramu napon-deformacija nakon dostizanja kritičnog opterećenja cilindra. Zaključak je da i mala distorzija može dovesti do značajnog pada kritične sile. Svojim daljim radom ova dva naučnika su postavila temelje teorije velikih deformacija aksijalno pritisnutih cilindara.

Naredni korak u poznavanju ponašanja aksijalno pritisnutih cilindričnih ljuski napravili su Donnell i Wan 1950. godine. Oni su uveli u analizu početne imperfekcije i došli do zaključka da one mogu značajno da smanje kritičnu silu dobijenu za idealan cilindar, bez imperfekcija.

U pogledu šablona izbočina koje nastaju pri aksijalnom opterećenju cilindričnih ljuski, u oblasti malih deformacija, moguća su dva moda izbočavanja [5]:

- prstenasto ili simetrično izbočavanje – radijalna pomeranja su u obliku talasa po dužini cilindra, sa konstantnim pomeranjima po obimu u svim poprečnim presecima;
- šahovska tabla – pomeranja imaju formu talasa i u podužnom i u poprečnom pravcu obrazujući pravougaone uvale i izbočine.



Slika 3 – a) Efekti početnih imperfekcija na postkritično ponašanje cilindra [6], b) Rezultati ispitivanja aksijalno pritisnutih izotropnih cilindričnih ljuski [8]

Kada cilindar uđe u postkritičnu oblast, deformacije više nisu male, cilindar prelazi u treći mod izbočavanja – šablon dijamanta. Da bi dobili stvarni šablon izbočavanja, Donnell i Wan su pretpostavili odgovarajuću funkciju pomeranja w koja je predstavljena u radu [6] zajedno sa rezultatima ovakve pretpostavke. Grafički prikaz rešenja je dat na slici 3a.

Iako su dalja ispitivanja pokazala da su dobijeni rezultati manje tačni, izvedeni su zaključci:

- i najmanja imperfekcija vodi do značajnog smanjenja vrednosti kritičnog napona;
- minimalna vrednost nije pod velikim uticajem veličine imperfekcije, pa bi usvajanje ove vrednosti kao kritične dovelo do konzervativnog rešenja za projektante.

Do rešenja koje je značajno doprinelo problemima u praksi došao je Koiter [7] koristeći uprošćenu teoriju velikih deformacija na primeru aksisimetričnih početnih imperfekcija. Dobijeni rezultati imaju dobro poklapanje sa donjim vrednostima dobijenim eksperimentalnim ispitivanjima. Na slici 3b prikazani su rezultati eksperimentalnih ispitivanja cilindričnih ljuski, obavljenih od strane različitih autora. Može se uočiti velika razrušenost rezultata ispitivanja što samo ukazuje na veliku osetljivost ovih elemenata.

2.3. PRORAČUNSKE PREPORUKE

Pri projektovanju tankih, kružnih cilindričnih ljuski, u inženjerskoj praksi se koriste različiti standardi i priručnici. Svi oni u osnovi primenjuju klasično rešenje dobijeno linearnom teorijom, jednačina (1), a zatim ga množe odgovarajućim redukcionim faktorom (*knockdown factor*) kako bi dobili vrednost opterećenja koju cilindar može da prenese, a koji se određuje na osnovu pune zakrivljene linije kojom je obeležena donja granica rezultata ispitivanja na slici 3b.

U praksi se koriste različite analitičke formulacije redukcionog faktora za izotropne cilindrične ljuske, aksijalno opterećene. Neke od prvih preporuka potiču sa početka 20. veka, kao što su NASA SP-8007 [9]. Uprkos novijim saznanjima, one su i dalje u osnovi većine standarda. Ove empirijske preporuke predstavljaju statističkom obradom dobijenu donju granicu odnosa kritičnog napona izbočavanja određenog eksperimentalnim putem i teorijske vrednosti kritičnog napona izbočavanja, za različite odnose poluprečnika i debljine cilindra. Traba napomenuti da su rezultati grubo uzeti u obzir, ne vodeći računa o načinu ispitivanja ili proizvodnje elemenata. Primena je ograničena samo za slobodno oslonjene cilindre na oba kraja. Uzimajući uticaj imperfekcija u obzir, dobijeni kritični napon je i dalje na strani sigurnosti. Slična formulacija se može pronaći i u evropskim standardima [10], koji se ograničavaju u primeni na umereno vitke cilindre, kako bi se isključila mogućnost sveukupnog Euler-ovog izvijanja stuba.

Oba rešenja, i preporuke u EN 1993-1-6 [10] i preporuke koje je dala NASA-a u SP8007 [9] u osnovi su potekle iz rada Weingarten-a [11]. Osnovna razlika između njih jeste što je u Evrokodu uzet u obzir kvalitet proizvodnje kroz proizvodne klase.

3. NUMERIČKA ANALIZA

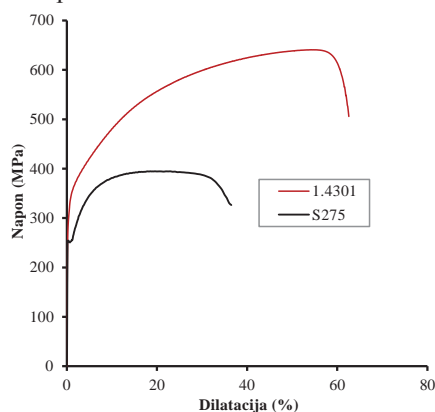
Numerička analiza kružnih cilindričnih tankih ljuski, metodom konačnih elemenata, urađena je korišćenjem programa Abaqus, verzija 6.12-3 [12]. U numeričkoj analizi problema stabilnosti korišćene su dve metode:

- analiza sopstvenih oblika izbočavanja (Linear Buckling Analysis);
- analiza odgovora nakon gubitka stabilnosti ili analiza loma (Postbuckling analysis).

Analiza sopstvenih oblika izbočavanja ili analiza bifurkacione stabilnosti zasniva se na linearno elastičnoj teoriji stabilnosti. Kriva koja definiše vezu između sile i pomeranja je bilinearna: priraštaj sile praćen je malim priraštajem deformacija, a dostizanjem kritične sile,

deformacije se naglo povećavaju i teže beskonačnosti. U slučajevima kada do gubitka stabilnosti dolazi usled geometrijske i materijalne nelinearnosti, linearna analiza daje značajno konzervativnu procenu kapaciteta nosivosti, pa se preporučuje primena nelinearne analize. Ipak linearna analiza je inicijalna faza proračuna koja daje predviđanje sopstvenih oblika izbočavanja. Analiza stabilnosti elementa se zasniva na rešavanju nelinearne jednačine ravnoteže primenom odgovarajuće numeričke metode. U radu je primenjena metoda konstantnog sfernog luka, poznata i kao Riks-ova metoda [13].

Numerička analiza prikazana u ovom radu obuhvatila je kružnu cilindričnu ljusku dužine 10 m i poluprečnika 2,5 m, debljine zida ljuske od 6,0 mm do 30,0 mm, koja pripada opsegu cilindričnih ljuski srednje dužine, kako je definisano u EN 1993-1-6, Aneks D [10]. Modeli cilindričnih obostrano zglobno oslonjenih ljuski definisani su u Abaqus-u [12] pomoću površinskih S4R konačnih elemenata. S4R površinski konačni elementi su elementi sa četiri čvora i redukovanom integracijom u sedam tačaka po debljini zida. Zglobno oslanjanje ostvareno je definisanjem graničnih uslova po obimu ljuske, i to na jednom kraju sprečavanjem pomeranja u pravcu sve tri glavne ose $U_1=U_2=U_3=0$, a na suprotnom kraju elementa na kojem se nanosi opterećenje dozvoljeno je pomeranje u pravcu globalne Z-ose, što odgovara podužnoj x-osi ljuske ($U_1=U_2=0$). Rotacija je dozvoljena oko sve tri glavne koordinatne ose na oba kraja ljuske. Opterećenje u obliku aksijalnog pritiska se nanosi na jednom kraju ljuske kao raspodeljeno opterećenje svuda po obimu.



Slika 4 – Dijagram napon-dilatacija za ugljenični čelik S275 i nerđajući čelik 1.4301

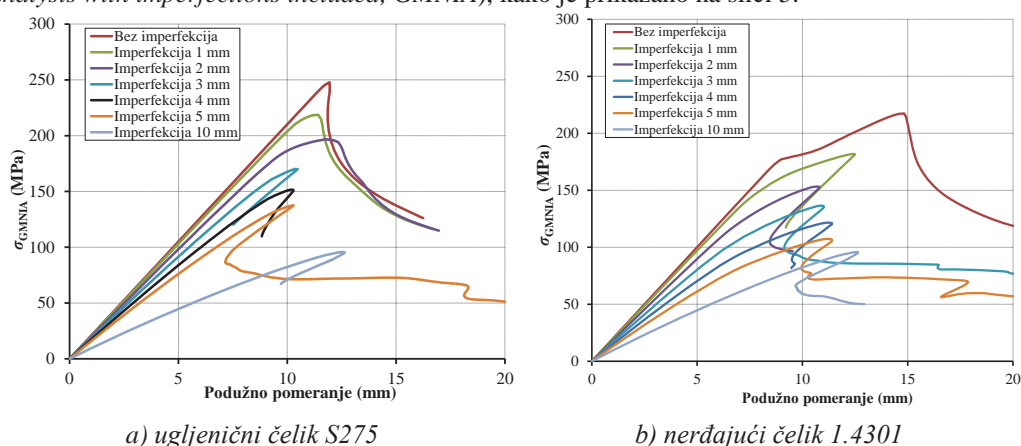
Mehanička svojstva materijala definisana su nelinearnom vezom napona i dilatacija dobijenih ispitivanjem pri zatezanju epruveta izrađenih od vruće valjanog profila od ugljeničnog čelika kvaliteta S275 i epruveta od hladno valjanog nerđajućeg čelika austenitne mikrostrukture sa oznakom 1.4301, kako je prikazano na slici 4.

4. REZULTATI NUMERIČKE ANALIZE I POREĐENJE SA PREPORUKAMA DEFINISANIM U EN1993-1-6

Vrednosti elastičnog kritičnog napona izbočavanja za različite debljine kružne cilindrične ljuske definisane su prema LBA metodi u Abaqusu [12] i izrazu definisanom u EN 1993-1-6

[10] koje je ujedno i klasično rešenje prikazano u jednačini (1). Materijalna nelinearnost uvedena je u numeričke primere kroz stvarnu vezu napona i dilatacije za dva analizirana materijala, a geometrijska imperfekcija zadata je kao pomeranje određene amplitude koje odgovara prvom tonu izbočavanja (LBA analizi u Abaqus-u [12]).

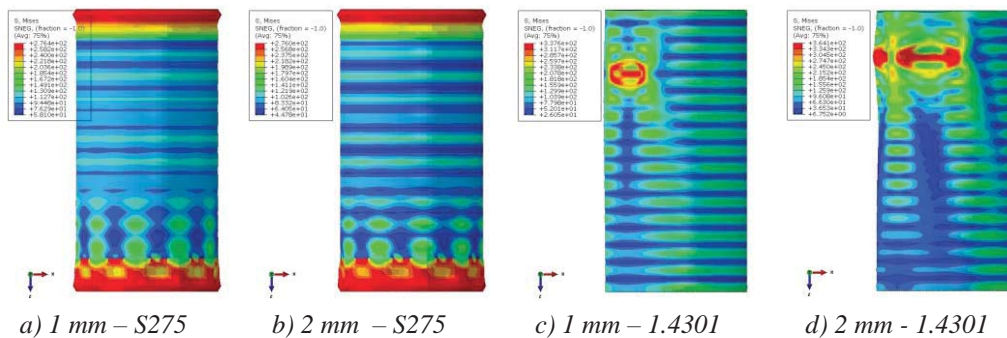
Uticao različitih vrednosti imperfekcija na kritičan napon izbočavanja analiziran je na primeru kružne cilindrične ljuske debljine 10,0 mm za primenom metode materijalne i geometrijske nelinearne analize sa imperfekcijama (*Geometrically and materially nonlinear analysis with imperfections included, GMNIA*), kako je prikazano na slici 5.



Slika 5–Nosivost na izbočavanje kružne cilindrične ljuske $t=10,0$ mm – metoda Riksa

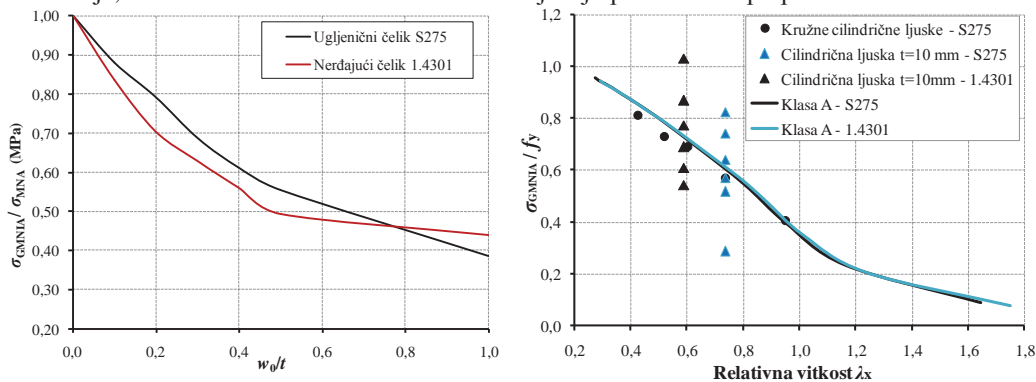
Kod kružnih cilindričnih ljuski od ugljeničnog čelika imperfekcije od 1,0 i 2,0 mm izazivaju aksijalno simetrično izbočavanje ljuske u zoni neposredno uz oslonce, odnosno neposredno ispod zone unošenja opterećenja, kako je prikazano na slici 6a i 6b. Cilindrična ljuska od nerđajućeg čelika ima 12,5% manji kritičan napon izbočavanja u poređenju sa istim cilindrom od ugljeničnog čelika, za model bez početnih imperfekcija. Odgovor cilindra od nerđajućeg čelika pri manjim vrednostima imperfekcijama je u obliku nesimetričnog izbočavanja (*dimple buckling*) u zoni unošenja opterećenja, koje je prikazano na slici 6c i 6d, koje se kao karakterističan odgovor konstrukcije zadržava i pri povećanju imperfekcija do 10,0 mm. Takođe, kod nerđajućeg čelika, u oblasti napona između napona proporcionalnosti f_p i konvencionalne granice razvlačenja f_{02} javlja se progresivni pad tangentnog modula elastičnosti E_t , što utiče i na značajno smanjenje krutosti koja je uočljiva na slici 5b, kod cilindričnih ljuski od nerđajućeg čelika.

Redukcija nosivosti cilindrične ljuske od dva analizirana materijala debljine 10 mm usled povećanja geometrijskih imperfekcija, prikazana je na slici 7a. Imperfekcija od 1,0 mm izaziva redukciju nosivosti od 12% odnosno 17%, za ugljenični čelik i nerđajući čelik, respektivno. Povećanjem početnih geometrijskih imperfekcija do 5,0 mm, redukcija nosivosti dostiže i do 45% kod ugljeničnih čelika, odnosno 50% kod nerđajućeg čelika. Cilindrične ljuske od ugljeničnog čelika pokazuju ujednačen pad nosivosti pri povećanju imperfekcija. Sa druge strane, cilindrična ljuska od nerđajućeg čelika pri povećanju imperfekcija od 5,0 mm do 10,0 mm pokazuju manji pad nosivosti, od 51% do 57%, kako je prikazano na slici 7a.



Slika 6 - Izbočavanje kružne cilindrične ljuske debljine od 10,0 mm za različite vrednosti imperfekcija

Poređenje rezultata numeričke analize sa proračunskim preporukama definisanim u EN 1993-1-6 [10], za krivu izvijanja definisanu za klasu A proizvodnih tolerancija, prikazano je na slici 7b. Za cilindričnu ljusku debljine 10,0 mm od ugljeničnog čelika S275 i geometrijske imperfekcije do 4,0 mm rezultati numeričke analize zadovoljavaju empirijski definisane preporuke u EN 1993-1-6 [10]. Za imperfekcije veće od 4,0 mm, što su ujedno i vrednosti imperfekcije koju preporučuje Evrokod za analiziranu cilindričnu ljusku i klasu A proizvodnih tolerancija, rezultati numeričke analize ne zadovoljavaju proračunske preporuke.



a) redukcija napona izbočavanja cilindrične ljuske debljine 10 mm

b) poređenje rezultata numeričke analize sa preporukama za proračun

Slika 7 - Uticaj geometrijskih imperfekcija

Iako proračunske preporuke za ljuske od nerđajućeg čelika još uvek nisu definisane, analiza ponašanja ljuski od ovoga materijala bila je posebno značajna zbog specifičnosti mehaničkih svojstava ovog materijala. Kada se mehanička svojstva nerđajućeg čelika primene u proračunskim preporukama za ljuske datim u EN 1993-1-6 [10], uočava se takođe da se najbolja poklapanja rezultata numeričke analize sa ovako definisanim proračunskim preporukama dobija za imperfekcije do 4,0 mm (slika 7b). Svakako, definisanje jasnih

proračunskih preporuka u ovoj oblasti zahteva opsežna numerička i eksperimentalna ispitivanja.

Tabela 1 - Rezultati parametarske analize - kružne cilindrične ljuske – S275

t (mm)	Kritičan napon [MPa]		Nosivost elementa [MPa]			KDF
	EN 1993-1-6 [10] $\sigma_{x,Rcl}=0,605EC_x t/r$	Abaqus [6] σ_{LBA}	EN 1993-1-6 [10] $\sigma_{x,Rk}=\chi_x f_y$	Abaqus [6] σ_{MNA}	Abaqus [6] σ_{GMNIA}	
6	304,9	305,8	109,6	230,7	108,2	0,35
8	406,6	407,4	145,0	243,2	137,7	0,36
10	508,2	509,3	166,7	247,9	151,6	0,30
12	609,8	610,8	182,1	250,6	163,8	0,30
15	762,3	762,7	198,3	253,4	183,4	0,24
20	1016,4	1016,4	215,6	256,9	193,9	0,19
30	1524,6	1522,2	234,9	260,0	215,9	0,14

Analiza kritičnog napona izbočavanja za cilindrične ljuske od ugljeničnog čelika S275 debljine od 6,0 do 30,0 mm, prikazana je u tabeli 1. Prikazano je poređenje rezultata dobijenih iz proračunskih preporuka prema EN 1993-1-6 [10] i numeričke analize u Abaqus-u [12]. Geometrijske imperfekcije zadate su prema preporuci za definisanje karakteristične geometrijske imperfekcije w_k date u EN 1993-1-6, Aneks D [10] za klasu A proizvodnih tolerancija. Takođe je prikazan i odnos nosivosti cilindrične ljuske dobijen primenom GMNIA analize u Abaqus-u [12] i kritičnog napona koji je definisan u EN 1993-1-6 [10], što je definisano kao redukциони faktor (*knockdown factor KDF*). Napon izbočavanja dobijen kao rezultat geometrijske i materijalne nelinearnosti (GMNIA) dobijen numeričkom analizom u Abaqus-u [12] i primenom proračunskih preporuka u EN 1993-1-6 [10] ima približno iste vrednosti. Takođe, ukoliko se uporede rezultati numeričke analize koja uzima u obzir materijalnu nelinearnost (MNA) bez početnih imperfekcija sa rezultatima analize koja uključuje geometrijske i materijalne nelinearnosti (GMNIA) u Abaqus-u [12], može se uočiti da sa porastom debljine zida cilindrične ljuske razlika u nosivosti elementa dobijena na ova dva načina se smanjuje. Može se zaključiti da se za kompaktnije preseke, veće debljine zida ljuske, smanjuje uticaj početnih geometrijskih imperfekcija na nosivost elementa, a raste uticaj materijalne nelinearnosti.

5. ZAKLJUČAK

U radu je pokazano da vrednost početnih imperfekcija ima veliki uticaj na nosivost tankih kružnih cilindričnih ljuski. Pri malim vrednostima početnih imperfekcija dolazi do značajnog smanjenja napona pri kojem dolazi do izbočavanja. Razlika između teorijske vrednosti kritičnog napona izbočavanja i vrednosti koje se dobijaju eksperimentalnim ispitivanjima kružnih cilindričnih ljuski, kao i numeričkom analizom primenom geometrijske i materijalne nelinearnosti sa imperfekcijama definisna je u literaturi kao redukциони faktor. Vrednost ovog

faktora može značajno da varira u zavisnosti od vrednosti početnih imperfekcija. Buduće unapređenje proračunskih preporuka bazirano je na njegovoj optimizaciji. Jedan od načina jeste formiranje i primena baze podataka o imperfekcijama kružnih cilindričnih ljuski na osnovu sprovedenih eksperimentalnih ispitivanja (*Imperfection Data Bank*). Ovo podrazumeva objedinjavanje svih dostupnih rezultata eksperimenata, statističku obradu podataka i njihovu adaptaciju u usvojenom formatu radi lakšeg korišćenja i klasifikacije. Time se omogućava optimizacija proračuna i projektovanja za određeni tip cilindra, analizirajući samo rezultate dobijene na sličnim tipovima cilindara.

Ovo istraživanje je deo naučnog projekta TR-36048 i III 42012 podržanog od strane Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije.

LITERATURA

- [1] A. Chajes, Principles of Structural Stability Theory, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1974;
- [2] R. Jones, Buckling of Bars, Plates and Shells, Bull Ridge Publishing, Blacksburg, 2006;
- [3] L. H. Donnell, Stability of Thin-Walled Tubes Under Torsion, NACA, Technical Report, No. 479, Washington, D.C., 1933;
- [4] S. B. Batdorf, A Simplified Method of Elastic-Stability Analysis for Thin Cylindrical Shells, NACA, Technical Report, No. 874, Washington, D.C., 1947;
- [5] H.G. Allen and P.S. Bullson, Background to buckling, McGRAW-HILL Book Company (UK), 1980;
- [6] L. H. Donnell and C. C. Wan, Effect of Imperfections on Buckling of Thin Cylinders and Columns Under Axial Compression, Journal of Applied Mechanics, ASME, Vol. 17, No. 1, 1950;
- [7] W. T. Koiter, The effects of axisymmetric imperfections on the buckling of cylindrical shells under axial compression, Proc. Royal Netherlands Academy of Sciences, Amsterdam, Series B, 66, 1963;
- [8] J. de Vries, The Imperfection Data Bank and its Applications, Giethoorn ten Brink, Netherlands, 2009;
- [9] P. Seide, V.I. Weingarten, J.P. Peterson, Buckling of thin-walled circular cylinders, Technical Report SP 8007, NASA Langley Research Center, Virginia, 1968;
- [10] Eurocode 3 – Design of steel structures – Part 1 – 6: Strength and stability of shell structures, EN 1993-1-6, CEN, 2007;
- [11] V.I. Weingarten, E.J. Morgan, and P. Seide. Elastic stability of thin-walled cylindrical and conical shells under axial compression. AIAA Journal, 3(3):500–505, 1965;
- [12] ABAQUS User Manual. Version 6.12. Providence, RI, USA: DS SIMULIA Corp, 2012;
- [13] E. Riks, An Incremental Approach to the solution of Snapping and Buckling Problems, Int. J. Solid Structures, Vol.15, 1979.