
Zlatko Marković¹

Jelena Dobrić²

Milan Spremić³

Nenad Fric⁴

NOVI KONCEPT PRORAČUNA ALUMINIJUMSKIH KONSTRUKCIJA PREMA EVROKODU

Rezime: U ovom radu je prikazana osnovna filozofija proračuna nosećih konstrukcija od aluminijumskih legura prema novom evropskom standardu EN1999: Projektovanje aluminijumskih konstrukcija, Deo 1-1: Opšta konstrukcijska pravila. Dat je prikaz karakteristika aluminijuma kao materijala za konstruktivne elemente u odnosu na ugljenični čelik. Poseban akcent je dat na efektima izbočavanja pritisnutih delova preseka, kao i na termičkim uticajima koji su posledica zavarivanja i usled kojih dolazi do redukcije mehaničkih svojstava materijala u zonama uticaja toplote. Ovi efekti ilustrovani su kroz kratak numerički primer.

Ključne reči: aluminijum, evrokod, efektivan presek, nosivost, stabilnost, zona uticaja toplote.

NEW CONCEPT OF DESIGN ALUMINUM CONSTRUCTION ACCORDING TO EUROCODE

Abstract: This paper describes the basic philosophy of the design aluminium structures according to the new European standard EN1999: Design of aluminium structures, Part 1-1: General structural rules. Comparison of the properties of aluminium as a material for structural elements is given in relation to the carbon steel. Special attention is given to the buckling effect in compressed parts of the cross section as well as the thermal effects of welding process, resulting in reduction of the mechanical properties in the heat-affected zones. These effects are illustrated through a brief numerical example.

Key words: aluminium, eurocode, effective cross section, resistance, stability, heat affected zone.

¹ Dr, r.profesor, dipl.grad.inž, Građevinski fakultet u Beogradu, Bulevar kralja Aleksandra 73, zlatko@imk.grf.bg.ac.rs

² Mr, asistent, dipl.grad.inž, Građevinski fakultet u Beogradu, Bulevar kralja Aleksandra 73, jelena@imk.grf.bg.ac.rs

³ Mr, asistent ,dipl.grad.inž, Građevinski fakultet u Beogradu, Bulevar kralja Aleksandra 73, spremic@imk.grf.bg.ac.rs

⁴ Asistent, dipl.grad.inž, Građevinski fakultet u Beogradu, Bulevar kralja Aleksandra 73, fric@imk.grf.bg.ac.rs

1. UVOD

Aluminijumska legura, kao materijal male zapreminske težine, visoke čvrstoće, dobre otpornosti na dejstvo korozije kao i izuzetnih metalurških i tehnoloških mogućnosti, predstavlja važan industrijski metal, bez koga se savremena tehnika ne može zamisliti. Brzom razvoju proizvodnje i primene aluminijuma u drugoj polovini prošlog veka, pored navedenih odlika, svakako je doprinela činjenica da je ovaj element zastupljen u zemljinoj kori čak sa 8% (treći po rasprostranjenosti). Sa druge strane, za njegovu proizvodnju je potrebna velika količina energije, što postupak dobijanja Al-legure čini skupim, pa je jedinična cena ovog metala znatno veća u odnosu na čelik (6 do 7 puta). Čist aluminijum je mek i male čvrstoće, ali u kombinaciji sa legirajućim elementima (Cu, Mn, Si, Mg, Zn...), dobija karakteristike koje aluminijumske legure čine pogodnim za primenu u mnogim granama industrije. Pored legiranja, karakteristike aluminijuma mogu se znatno poboljšati i termičkom obradom (žarenjem, kaljenjem, dozrevanjem i obradom u hladnom stanju). Zbog toga aluminijumske legure predstavljaju vrlo široku familiju prilično raznovrsnih materijala, pa je teško govoriti o generalnim sličnostima aluminijuma i drugih metala. Prema evropskim normama, numeričko označavanje legura od aluminijuma definisano je standardom EN 573-1:1994[1]. Ovim standardom, u zavisnosti od legirajućih elemenata i stanja proizvoda, Al-legure su podeljene u serije:

- Seriya 1XXX** Legure sa najmanje 99% čistog aluminijuma,
- Seriya 2XXX** Legure sa Cu, Mg i Si (Al-Cu, Al-Cu-Mg, Al-Cu-Si),
- Seriya 3XXX** Legure sa manganom (Al-Mn),
- Seriya 4XXX** Legure sa silicijumom (Al-Si),
- Seriya 5XXX** Legure sa magnezijumom (Al-Mg),
- Seriya 6XXX** Legure sa silicijumom i magnezijumom (Al-Si-Mg),
- Seriya 7XXX** Legure sa cinkom i magnezijumom (Al-Zn-Mg),
- Seriya 8XXX** Legure sa ostalim legirajućim elementima.

U tabeli 1 je dat uporedni prikaz osnovnih svojstava aluminijumske legure serije 6061-T6, konstrukcionih čelika i jednog nerđajućeg čelika.

Tabela 1 – Uporedni prikaz svojstava aluminijuma, čelika i nerđajućeg čelika

	Aluminijum 6061-T6	Čelik S235 - S355	Nerđajući čelik 1.4301
Obradljivost	vrlo dobra	nedovoljna	ograničena
Zavarljivost	slaba, redukcija čvrstoće	dobra, nema redukcije	dobra
Otpornost na koroziju	dobra	slaba	vrlo dobra
Granica razvlačenja f_y	240 MPa	235-355 MPa	210 MPa
Specifična težina	26,5 kN/m ³	78,5 kN/m ³	77 kN/m ³
Modul elastičnosti E	70 GPa	210 GPa	200 GPa
Izduženje pri lomu	8%-10%	20%	45%
Odnos čvrstoća/težina	9,0	3,0-4,5	2,7
Jedinična cena [2]	2,65 \$/kg	0,66 \$/kg	3,08 \$/kg

U građevinarstvu se aluminijumske legure primenjuju za: fasadne konstrukcije, sisteme krovova srednjeg i velikog raspona, konstrukcije u koroziono agresivnim sredinama (konstrukcije u primorskim krajevima, krovovi bazena, "offshore" konstrukcije...), konstrukcije sa pokretnim delovima kojima aluminijum kao lak materijal omogućava znatno veću ekonomičnost, objekti za skladištenje i transport materijala koji agresivno deluju na čelik (rezervoari, cevovodi...), konstrukcije visokog stepena radioničke obrade, koje objedinjuju noseću funkciju i funkciju obloge, konstrukcije koje je jako teško održavati (svetionike, dalekovode...), montažno demontažne konstrukcije različite namene, konstrukcije koje se grade u teško pristupačnim predelima (pontonski mostovi, pomoćni mostovi, skele) [3], [4].

2. SPECIFIČNOSTI ALUMINIJUMSKIH LEGURA

Aluminijumske legure imaju težinu približno tri puta manju od čelika, što omogućava izradu lakših konstrukcija, kao i lakši i jeftiniji transport i montažu. Međutim, aluminijum ima i tri puta manji modul elastičnosti od čelika, pa su problemi izbočavanja i deformacija znatno izraženiji.

Prirodni sloj aluminijum-oksida obezbeđuje visoko efikasnu prepreku razvoju korozije. Za razliku od čelika koji godišnje gubi oko 80 g/m², aluminijum gubi samo 2-4 g/m² usled dejstva korozije. Iako se, zbog dobre otpornosti na koroziju aluminijum može primeniti bez zaštitnog premaza, postoji opasnost od kontaktne korozije.

Osobine aluminijuma i njegovih legura omogućavaju lako industrijsko oblikovanje – valjanje, kovanje, istiskivanje i livenje. Fleksibilnost aluminijuma indirektno utiče na manji utrošak materijala jer omogućava proizvodnju poprečnih preseka optimalnih oblika.

Aluminijum je otporniji na kruti lom pri niskim temperaturama od čelika.

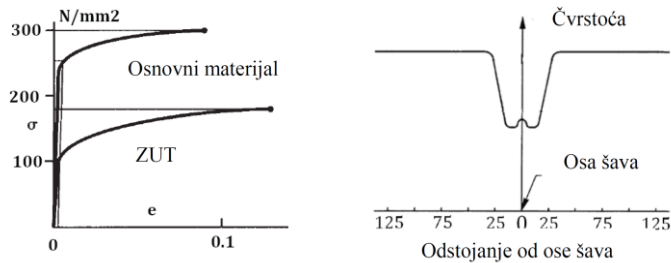
Pri porastu temperature mehanička svojstva aluminijuma brže opadaju nego kod čelika. Izduženja usled temperature su dva puta veća nego kod čelika ($\alpha_t = 2,3 \times 10^{-5}$ 1/C°), ali zbog manjeg modula elastičnosti naponi koji se javljaju u materijalu usled temperature su samo dve trećine onih u čeliku.

Aluminijumske legure imaju manju duktilnost od čelika. Izduženje pri lomu kod kaljenih i veštački ostarelih aluminijumskih legura iznosi 5-15%, dok je kod legura očvrstelih hladnom obradom čak ispod 10%, što je dva puta manje nego kod čelika, ali ipak dovoljno da konstrukcije od aluminijuma ne budu sklone krtom lomu.

Za razliku od čelika koji ima izražen linearno elastičan deo σ - ϵ dijagrama, zavisnost napona i dilatacije kod aluminijuma ima nelinearno-plastični karakter. Usled velike raznovrsnosti legura i njihovih svojstava oblik σ - ϵ dijagrama je znatno složeniji nego kod čelika. Postoji veći broj različitih numeričkih modela σ - ϵ dijagrama, a najzastupljeniji je Ramberg-Osgudov model

Pri zavarivanju aluminijumskih legura javljaju se velike promene u mikrostrukturi - termički uticaji se brzo šire na zonu u okolini šava - zona uticaja toplote - ZUT (*heat affected zone* - HAZ). Granična nosivost materijala u ZUT-u je manja nego kod

osnovnog materijala, σ - ε kriva je blaža, a materijal u ZUT-u je nešto duktilniji od osnovnog materijala (slika 1a).



1a) Uporadni σ - ε dijagrami

1b) Širina ZUT-a

Slika 1 – Uticaji zavarivanja u zoni uticaja toplote

Veličina, odnosno širina zone uticaja toplote (slika 1b) zavisi od više različitih faktora. Zona uticaja toplote se prostire do približno 75 mm od ose šava, a najveći uticaj na čvrstoću se oseća na rastojanju do 25 mm ($25 \text{ mm} \cong 1 \text{ inch}$). Zbog toga se, do pojave Evrokoda 9, koristilo pravilo jednog inča (*one-inch rule*) [4].

3. OSNOVE PRORAČUNA PREMA EVROKODU 9

U okviru evropskog seta propisa za konstrukcije – Evrokoda, obuhvaćene su i konstrukcije od aluminijumskih legura kojima pripada poseban deo Evrokod 9: Proračun aluminijumskih konstrukcija (EN 1999 Eurocode 9: *Design of aluminium structures*) [1] koji se sastoji iz sledećih delova:

- EN 1999-1-1: Opšta konstrukcijska pravila (*General structural rules*);
- EN 1999-1-2: Proračun konstrukcija na dejstvo požara (*Structural fire design*);
- EN 1999-1-3: Konstrukcije osetljive na zamor (*Structures susceptible to fatigue*);
- EN 1999-1-4: Hladnooblikovani konstrukcioni limovi (*Cold-formed structural sheeting*);
- EN 1999-1-5: Ljuske (*Shell structures*).

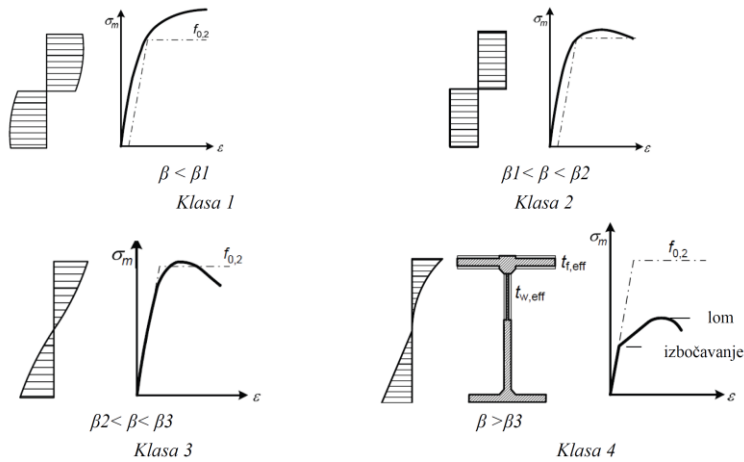
Treba naglasiti da su svi ovi standardi tokom maja ove godine usvojeni kao nacionalni standardi SRPS EN na engleskom jeziku. Do kraja godine se očekuje da će biti usvojeni i Nacionalni prilozi koji su neophodni za njihovu primenu u našoj zemlji.

Najznačajniji i najobimniji od ovih standarda je EN 1999-1-1/2007, koji sadrži osam poglavlja i trinaest aneksa. Zbog ograničenog obima, u ovom radu su samo informativno prezentovani neki od najznačajnijih problema graničnih stanja konstrukcija od aluminijumskih legura koji su obuhvaćeni ovim standardom.

3.1. Kasifikacija poprečnih preseka

Kao i kod čeličnih konstrukcija, provera graničnih stanja nosivosti i izbor globalne i lokalne analize konstrukcije zavise od klase poprečnog preseka. Neophodno je odrediti klase poprečnih preseka svih pritisnutih ili delimično pritisnutih elemenata

konstrukcije. Kao i Evrokod 3 i Evrokod 9 razlikuje četiri klase poprečnih preseka (slika 2).



Slika 2 – Definicije klasa poprečnih preseka

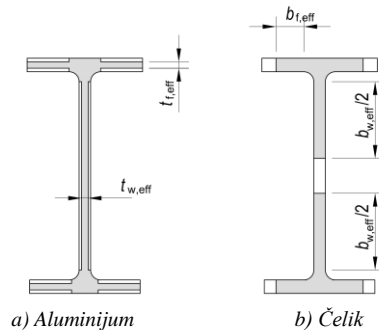
Definicija klasa preseka je gotovo ista kao i kod čeličnih konstrukcija, ali je određivanje klase sasvim drugačije. Klasifikacija poprečnih preseka aluminijumskih konstrukcija se vrši pomoću koeficijenta vitkosti β kojim se definiše osetljivost delova poprečnog preseka na izbočavanje, a koji se posebno određuje za neukrućene i ukrućene delove poprečnog preseka. Promena napona u razmatranom elementu uvodi se preko koeficijenta η . Kod delova preseka sa ukrućenjima, analiziraju se tri modela izbočavanja: distorziono izvijanje, nezavisno izbočavanje elemenata i ukrućenja, kao i kombinacija navedena dva oblika. U slučaju standardnih ukrućenja kod kojih je debljina zida jednaka debljini osnovnog elementa, a napon pritiska konstantan, vrednost koeficijenta η kojim se množi vitkost razmatranog dela preseka, određuje se u zavisnosti od tipa i položaja ukrućenja (pomoću izraza ili sa dijagrama). U slučaju nestandardnih ili kompleksnih ukrućenja, proračun je složeniji. Granične vitkosti β_1 , β_2 , β_3 definisane su tabelarno, u zavisnosti od klase materijala i graničnih uslova oslanjanja delova preseka. Postoje dve klase materijala (A ili B) koje zavise od oblika σ - ϵ dijagrama, odnosno od vrste Al-legure.

3.2. Koncept efektivnog preseka

Kod aluminijuma se izbočavanje pritisnutog dela preseka, kao i uticaj zavarivanja u ZUT-u uvode u proračun preko efektivne debljine preseka t_{eff} , dok se kod čelika efektivni presek određuje na osnovu efektivne širine b_{eff} (slika 3). Zbog niže vrednosti modula elastičnosti, efekti izbočavanja su kod konstrukcija od Al-legura izraženiji nego kod čeličnih. Pogodnim oblikovanjem preseka sa podužnim ukrućenjima, postupkom istiskivanja (ekstrudacije), moguće je u znatnoj meri povećati njihovu nosivost na izbočavanje.

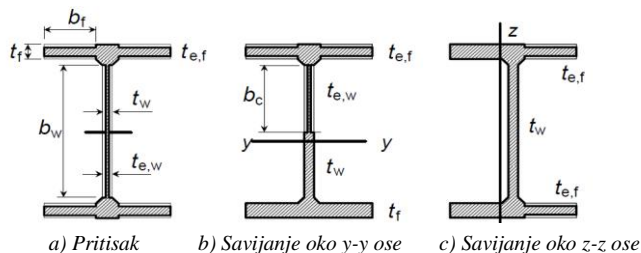
Redukcija nosivosti usled izbočavanja, kod efektivnih preseka klase 4 se vrši pomoću koeficijenta redukcije ρ_c kojim se umanjuje debljina svih pritisnutih delova

preseka. Za sve preseke konstantne debljine, koeficijent ρ_e određuje su u funkciji vitkosti β i koeficijenata C_1 i C_2 koji zavise od klase materijala i načina oslanjanja dela preseka. Karakteristični oblici efektivnih preseka za različite slučajeve naprezanja su prikazani na slici 4.



Slika 3 – Poređenje oblika efektivnih preseka u slučaju aluminijuma i čelika

Određivanje efektivnog poprečnog preseka pomoću efektivne debljine omogućava jednostavniji proračun, jer otpada potreba za određivanjem početka i kraja efektivne širine i lakše kombinovanje uticaja izbočavanja i uticaja u ZUT-u.



Slika 4 – Efektivni poprečni preseki za različite slučajeve naprezanja

Prilikom procesa zavarivanja, usled toplote koja se razvija, u okolini šava (ZUT) dolazi do redukcije svojstava osnovnog materijala. Radi jednostavnijeg proračuna usvojeno je da redukovana svojstva aluminijuma u zoni uticaja toplote imaju konstantnu vrednost. Umanjene vrednosti granice razvlačenja $f_{o,haz}$ i čvrstoće na zatezanje $f_{u,haz}$ za različite legure aluminijuma su date u standardu EN 1999-1-1. Redukcija svojstava materijala u zoni uticaja toplote se uzima u obzir pomoću faktora redukcije $\rho_{o,haz}$ i $\rho_{u,haz}$ koji su dati za svaku Al-leguru. Zona u kojoj je potrebno redukovati svojstva materijala se prostire u svim pravcima od šava na dužini od b_{haz} . Širina zone uticaja toplote zavisi od primenjenog postupka zavarivanja i debljine elemenata koji se zavaruju. Vrednosti b_{haz} se za MIG postupak kreću od 20 mm za tanke limove do 40 mm za limove debljine iznad 25 mm.

Za potrebe proračuna nosivosti preseka konstrukcija od Al-legura, u zavisnosti od vrste naprezanja, koriste se različite površine poprečnog preseka.

Bruto površina poprečnog preseka A_g je ukupna površina preseka bez uticaja izbočavanja i toplote zavarivanja, kao i bez odbitka usled rupa za spojna sredstva.

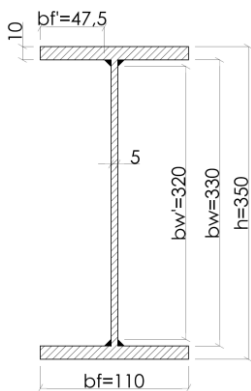
Neto površina poprečnog preseka A_{net} je površina koja se dobija kada se od bruto preseka oduzmu površine rupa za spojna sredstva i eventualni otvori.

Površina efektivnog poprečnog preseka A_{eff} je površina koja se dobija redukcijom usled izbočavanja i/ili usled termičkih uticaja u materijalu ZUT-a.

Kod preseka klasa 1, 2 i 3 koji su izloženi termičkim uticajima usled zavarivanja u zonama uticaja toplote na širini b_{haz} , smanjuje se debljina limova na vrednost: $\rho_{0,haz} t$; Kod pritisnutih delova preseka klase 4 koji nisu izloženi uticaju toplote, redukovana vrednost debljine je: $t_{eff} = \rho_s t$; Kod pritisnutih delova preseka klase 4 koji su izloženi uticaju toplote efektivna debljina je jednaka minimalnoj vrednosti od $\rho_s t$ i $\rho_{0,haz} t$ u delu ZUT-a, odnosno $\rho_s t$ na ostalom pritisnutom delu preseka.

4. NUMERIČKI PRIMER

U ovom primeru prikazan je proračun nosivosti zavarenog I-preseka na zatezanje, pritisak, savijanje i smicanje.



Al – legura 6082 - T6/T651

$$f_0 = 260 \text{ N/mm}^2$$

$$f_u = 310 \text{ N/mm}^2$$

$$\rho_{0,haz} = 0,48$$

$$\rho_{u,haz} = 0,6$$

$$\varepsilon = 0,98$$

$$A = 3850 \text{ mm}^2$$

$$W_{el} = 448983 \text{ mm}^3$$

$$A_v = 1544,9 \text{ mm}^2$$

Slika 5 – Karakteristike poprečnog preseka i svojstva materijala

Pritisak: Nožica: $\beta_f = \frac{47,5}{10} = 4,75 < \beta_f^3$ Rebro: $\beta_w = \frac{320}{5} = 64 > \beta_w^3 \rightarrow$ Klasa 4

Koeficijent redukcije preseka rebra $\rho_c^w = 0,42$

Savijanje: Nožica: $\beta_f = \frac{47,5}{10} = 4,75 < \beta_f^3$ Rebro: $\beta_w = 0,4 \frac{320}{5} = 25,6 > \beta_w^3 \rightarrow$ Klasa 4

Koeficijent redukcije preseka rebra $\rho_c^w = 0,82$

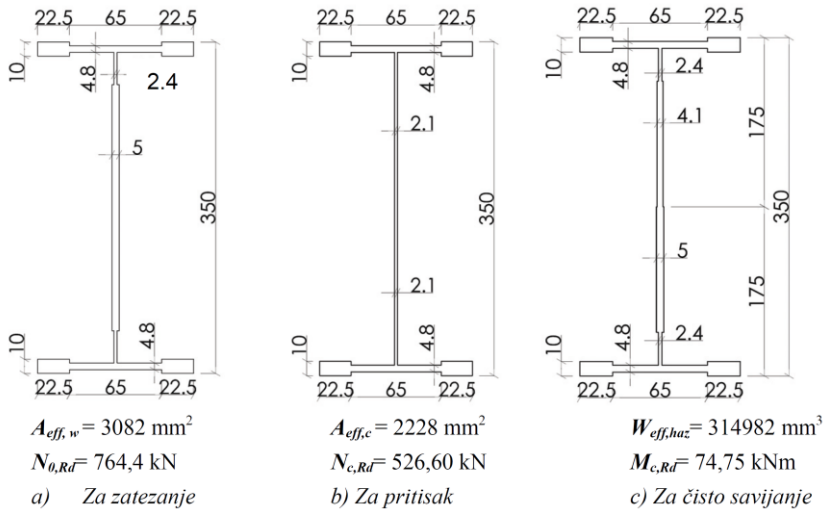
Redukovane debljine rebra i nožice preseka se određuju kao manje vrednosti od koeficijenta redukcije usled izbočavanja i redukcije u ZUT-u.

Efektivna debljina rebra - čist pritisak: $t_{w,eff,c} = 0,42 \cdot 5,0 = 2,1 \text{ mm}$

Efektivna debljina rebra - čisto savijanje: $t_{w,eff,b} = 0,82 \cdot 5,0 = 4,1 \text{ mm}$

Efektivna debljina rebra u ZUT-u: $t_{w,haz} = 0,48 \cdot 5,0 = 2,4 \text{ mm}$ $b_{w,haz} = 20 \text{ mm}$

Efektivna debljina nožice u ZUT-u: $t_{f,haz} = 0,48 \cdot 10,0 = 4,8 \text{ mm}$ $b_{f,haz} = 30 \text{ mm}$



Slika 6 – Efektivni poprečni presecci

5. ZAKLJUČAK

Projektovanje konstrukcija od aluminijumskih legura prema Evrokodu 9, pored dobrog poznavanja čeličnih konstrukcija, zahteva i poznavanje specifičnosti aluminijuma kao materijala, posebno najznačajnije razlike u odnosu na čelik koje su pomenute u ovom radu. Usvajanjem novih standarda iz ove oblasti (SRPS EN 1999) i odgovarajućih Nacionalnih priloga, čije publikovanje se očekuje do kraja ove godine, upotpunjuje se dugogodišnja praznina u našoj tehničkoj regulativi iz ove oblasti i pruža mogućnost veće primene aluminijumskih konstrukcija u našem građevinarstvu.

6. LITERATURA

- [1] EUROCODE 9: EN 1999-1-1: *Design of aluminium structures, Part 1-1: General structural rules*, European Committee for Standardization, 2007.
- [2] J.R.Kissell, R.L.Ferry: *Aluminium structures, A Guide to their specifications and design*, 2002.
- [3] Dragan Buđevac, Zlatko Marković, Dragana Čukić, Dragoslav Tošić: *Metalne konstrukcije - Osnove proračuna i konstruisanja*, Beograd, 2007.
- [4] Z. Marković, J. Dragaš: *Savremeni koncept projektovanja konstrukcija od aluminijumskih legura prema Evrokodu 9*, Izgradnja 2011. Izgradnja god. LXV br.11-12, Beograd, 2011. str. 639-650.