

Primljen / Received: 25.6.2015.
Ispravljen / Corrected: 26.10.2015.
Prihvaćen / Accepted: 20.11.2015.

Dostupno online / Available online: 10.12.2015.

Aluminij kao materijal za suvremene konstrukcije

Autori:



Doc.dr.sc. **Davor Skejić**, dipl.ing.građ.
Sveučilište u Zagrebu
Građevinski fakultet
davors@grad.hr



Prof.dr.sc. **Ivica Boko**, dipl.ing.građ.
Sveučilište u Splitu
Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije
ivica.boko@gradst.hr



Doc.dr.sc. **Neno Torić**, dipl.ing.građ.
Sveučilište u Splitu
Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije
neno.toric@gradst.hr

Pregledni rad

Davor Skejić, Ivica Boko, Neno Torić

Aluminij kao materijal za suvremene konstrukcije

U radu se daje sustavan prikaz aluminijских legura, te se na primjerima primjene aluminija u suvremenim građevinskim konstrukcijama naglašavaju njegove prednosti. Ubrzani razvoj normi za ovaj "novi" materijal omogućuje njegovu primjenu, no za stvarno povećanje te primjene nužno je o tome dodatno educirati sve sudionike gradnje, a posebno inženjere konstruktore.

Ključne riječi:

aluminijске legure, konstrukcije, norme, projektiranje, primjena

Subject review

Davor Skejić, Ivica Boko, Neno Torić

Aluminium as a material for modern structures

The paper offers a systematic account of aluminium alloys and places emphasis on their advantages by providing examples of aluminium use in modern structures. Rapid development of standards for this "new" material enables its wider utilization although all participants in the construction process, structural engineers in particular, should be additionally educated in this segment to enable a real increase in its use.

Key words:

aluminium alloys, structures, standards, design, application

Übersichtsarbeit

Davor Skejić, Ivica Boko, Neno Torić

Aluminium als Material für moderne Tragkonstruktionen

Diese Arbeit gibt eine systematische Darstellung von Aluminiumlegierungen und weist an Beispielen der Anwendung von Aluminium in modernen Bauwerkskonstruktionen auf seine Vorteile hin. Die zügige Entwicklung von Normen für dieses "neue" Material ermöglicht seine Anwendung; dennoch erweist sich für eine weitere Ausdehnung die Edukation aller Teilnehmer des Bauprozesses und insbesondere der Tragwerksplaner als notwendig.

Schlüsselwörter:

Aluminiumlegierungen, Tragkonstruktionen, Normen, Entwurf, Anwendung

1. Uvod

Aluminij (Al) je metal koji je poslije kisika i silicija najrasprostranjeniji element u Zemljinoj kori, gdje ga ima 8 %. On je ujedno i jedini laki metal koji je našao svoje mjesto u nosivim konstrukcijama u građevinarstvu. U današnje vrijeme se od metala u građevinarstvu jedino čelik upotrebljava više od aluminija.

Aluminij se u prirodi ne nalazi kao metal, već kao oksid pomiješan s oksidima željeza, silicija, vanadija, titana itd. Ideje o mogućnosti izoliranja elementa aluminija počele su se javljati početkom 19. stoljeća. Danski znanstvenik Hans Oersted 1825. godine uspio je izolirati česticu metalnog aluminija, ali je prvi konkretan rezultat dobio njemački kemičar Friedrich Wöhler nakon 20 godina istraživanja (1827). Godine 1854. francuski kemičar Henri Sainte - Claire Deville, profesor na Sorbonni u Parizu, razvio je redukcijski proces upotrebom natrija, koji je, uz daljnju rafinaciju, omogućio proizvodnju skupog aluminija u ograničenim količinama. Siemensov pronalazak dinamo stroja 1866. godine bio je pretpostavka za rješenje principa tehničke elektrolize koju su istovremeno i neovisno jedan o drugom te godine patentirali Paul Héroult u Francuskoj i Charles Martin Hall u SAD. Nakon dugog početnog razdoblja tehnološkog razvoja, aluminijske legure su korištene u mnogim konstrukcijskim primjenama. Međutim, tek u ranim pedesetim godinama prošlog stoljeća u Europi su izgrađene prve građevinske konstrukcije od aluminijske legure i to u formi montažnih (predgotovljenih) sustava. Tada je razvoj ovih vrsta primjene bio otežan zbog neprimjerenosti ili potpunog nedostatka normizacije i preporuka, što je konstrukcijsko projektiranje činilo teškim za projektante, konzultante i kontrolna tijela.

Zadnjih nekoliko desetljeća bilo je usmjereno na analizu konstrukcijskog ponašanja ekstrudiranih i zavarenih elemenata preko teorijskih i eksperimentalnih istraživanja, [1, 2]. Dobiveno znanje danas predstavlja solidan temelj suvremene normizacije, te je ograničenje nedostatka normizacije i preporuka potpuno prevladano na europskoj razini. Sve je započelo prvim izdanjem Preporuka ECCS-a koje je 1978. objavio ECCS odbor T2, a onda je 2007. konačnu verziju Eurokoda EC 9 "Projektiranje aluminijskih konstrukcija" objavio Tehnički odbor CEN-TC 250/SC9. Rad tog odbora i dalje kontinuirano traje i konstantno pristižu novi amandmani i ispravci koji se redovito razmatraju i u hrvatskom normizacijskom tijelu - Hrvatskom zavodu za norme (HZN), odnosno Tehničkom pododboru HZN-TO 548/PO 9. Unatoč svemu tome, očit je nedostatak informacija o potencijalu aluminijskih legura kod primjene u konstrukcijama, tako da njima svojstvene prednosti vrlo rijetko razmatraju inženjeri konstruktori.

Zbog toga je i temeljni cilj ovog rada informirati građevinske inženjere o mogućnostima aluminijskih legura i njihovoj primjeni u modernim građevinskim konstrukcijama. Elaboriranjem temeljnih svojstava aluminijskih legura i upoznavanjem s područjem koje pokriva niz normi (HRN) EN 1999, pa preko presjeka njihove primjene, dan je uvod u mnoštvo zanimljivih

tehničkih područja vezanih uz aluminij. Mala težina, otpornost na koroziju i široka paleta konstrukcijskih oblika zasigurno aluminiju otvaraju vrata k opravdano većoj primjeni u građevinarstvu. Nadamo se da će ovaj rad okuražiti inženjere konstruktore da se prihvate niza normi (HRN) EN 1999, prepoznaju dobra svojstva aluminijskih legura i počnu ih češće upotrebljavati u praksi.

2. Aluminijske legure za konstrukcijsku primjenu

2.1. Općenito

Uspjeh aluminijskih legura kao konstrukcijskog materijala i mogućnost natjecanja s čelikom temelje se na pretpostavkama koje su povezane s fizikalnim svojstvima, proizvodnim procesom i tehnološkim značajkama. Konkretno, uobičajeno se smatra da aluminijske legure mogu biti ekonomične, a time i konkurentnije u primjenama gdje su bitni sljedeći preduvjeti, [1, 2]:

A. Mala težina

Mala specifična težina aluminijskih legura, koja je jednaka trećini od težine čelika, omogućuje:

- pojednostavljenje faza izgradnje;
- prijevoz potpuno predgotovljenih komponenata;
- smanjenje opterećenja koje se prenosi do temelja;
- uštedu energije za vrijeme izgradnje i/ili tijekom korištenja;
- smanjenje fizičkog rada.

B. Otpornost na koroziju

Formiranje zaštitnog oksidnog filma na površini omogućuje:

- smanjenje troškova održavanja;
- pruža dobre performanse u korozivnim okruženjima.

C. Funkcionalnost konstrukcijskih oblika profila

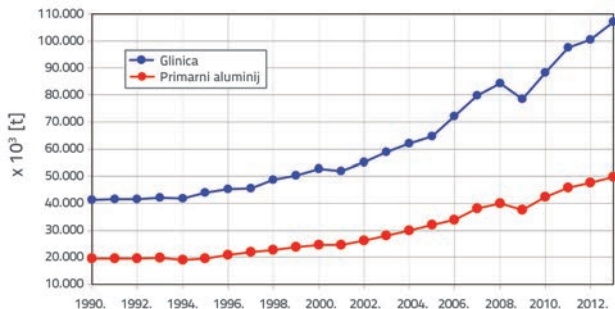
Postupak ekstruzije omogućava:

- poboljšanje geometrijskih svojstava presjeka projektiranjem oblik koji istovremeno pruža minimalnu težinu i najveću konstrukcijsku učinkovitost;
- dobivanje ukručenih oblika bez upotrebe složenih profila, čime se izbjegava zavarivanje ili spajanje vijcima;
- jednostavne sustave spajanja između različitih komponenti, čime se poboljšavaju detalji spojeva;
- kombiniranje različitih funkcija konstrukcijske komponente, čime se postiže još ekonomičniji i racionalniji profil.

2.2. Aluminij

Bez obzira na to što je na površini Zemljine kore aluminij prisutan u neiscrpnim količinama u obliku raznih oksidnih i silikatnih minerala, boksit je zbog svojih svojstava rastvorljivosti u alkalnom mediju i visokom udjelu aluminija (20 % do 30 % mase) ostao isključiva sirovina ekonomske i tehničke važnosti za proizvodnju glinice (Al_2O_3). Boksit je heterogena ruda koja se uglavnom sastoji od jednog ili više aluminijevih hidroksida, a također se u smjesi mogu naći i silicijski dioksid, željezni oksid te

alumosilikati (argentit). Aluminijev oksid se u boksitu javlja u tri hidratizirane mineralne vrste poznate pod nazivima: hidrargilit, bemit i dijaspor. Prema podacima Međunarodnog instituta za aluminij [3], godišnja svjetska proizvodnja glinice i primarnog aluminija u 10^3 tona prikazana je na slici 1.



Slika 1. Godišnja svjetska proizvodnja glinice i primarnog aluminija u 10^3 tona, [3]

Osnovna fizikalna svojstva aluminija i aluminijskih legura prikazana su u tablici 1. Ostala pozitivna svojstva aluminija i aluminijskih legura su ova:

- 2,9 puta lakši od čelika,
- dobra mehanička svojstva (uključujući žilavost) pri niskim temperaturama,
- dobro reflektira svjetlost i toplinu,
- neotrovan i bez negativnih utjecaja na okoliš,
- dobra otpornost na koroziju uz pomoć prirodne zaštite slojem oksida,
- nije magnetičan,
- nema iskrenja u obradi.

Tablica 1. Usporedba osnovnih fizikalnih svojstava čistog aluminija i aluminijskih legura u odnosu na čelik

Fizička svojstva / Metal	Aluminij / Al legure	Čelik
Talište	660 °C	1425 - 1540 °C
Gustoća pri 20 °C	2700 kg/m ³	7850 kg/m ³
Toplinsko izduljenje	23·10 ⁻⁶ °C ⁻¹	12·10 ⁻⁶ °C ⁻¹
Specifična toplina	~ 920 J/kg °C	~ 440 J/kg °C
Toplinska provodljivost	~ 240 W/m °C	~ 54 W/m °C
Modul elastičnosti	70 000 N/mm ²	210 000 N/mm ²
Modul posmika	27 000 N/mm ²	81 000 N/mm ²
Poissonov koeficijent	0,3	0,3

Međutim, uz visoku cijenu proizvodnje postoji još niz svojstava koja negativno utječu na odabir aluminija za primjenu u konstrukcijama. Prije svega radi se o velikoj deformabilnosti (modul elastičnosti 3 puta manji od čelika), osjetljivosti na probleme stabilnosti, velikom smanjenju nosivosti u zoni utjecaja topline prilikom zavarivanja i relativno velikoj osjetljivosti na djelovanje požara.

2.3. Očvršćivanje aluminija

Čisti aluminij je metal s relativno niskom čvrstoćom. Aluminij u svom najčišćem obliku ima vlačnu čvrstoću oko 40 MPa i dogovornu granicu popuštanja oko 10 MPa. Za većinu tehničkih primjena ovo je prenisko, pa su razvijene legure aluminija s mehaničkim svojstvima koja značajno nadmašuju one osnovnog materijala. Očvršćivanje aluminija se može postići legiranjem, deformacijom ili precipitacijskim očvršćivanjem. Jedno od najznačajnijih svojstava aluminija, i većine njegovih legura, jest lakoća oblikovanja plastičnom deformacijom i mogućnost postizanja raznovrsnih toplinskih (metalurških) stanja, a time i široke palete mehaničkih svojstava aluminijskih legura za primjenu u konstrukcijama.

2.3.1. Očvršćivanje legiranjem

Vrlo učinkovit način za stvaranje imperfekcija rešetkaste strukture je uvođenje odgovarajućih stranih elemenata u matricu aluminija. Do određene mjere njihova djelotvornost ovisi o razlici između polumjera atoma stranog elementa i aluminija.

Jedan od elemenata koji najbolje odgovara zahtjevima za poboljšanje čvrstoće jest magnezij. Stoga su prije sto godina legure aluminij-magnezij bile glavni izbor za primjenu aluminija u konstrukcijama. Vrijednosti visoke čvrstoće ostvarene su u legurama s udjelom magnezija do 10 %.

Međutim, problemi kada se te legure toplo i hladno dorađuju i manje od optimalnog korozijskog ponašanja legura s vrlo visokom razinom magnezija, dovode do postupnog usvajanja legura s nižim udjelom magnezija, ali s dodacima mangana.

2.3.2. Očvršćivanje deformacijom

Plastična deformacija proizvodi imperfekcije u rešetki značajnim povećanjem broja takozvanih dislokacija posebno duž ravnina klizanja. S povećanjem opterećenja i deformacije, kontinuirano se stvaraju dodatne klizne površine tako da, s dobivenim povećanjem gustoće dislokacija, materijal razvija povišenu mehaničku čvrstoću. Paralelno s tim porastom čvrstoće, duktilnost se smanjuje dok se, u konačnici, deformacijski proces ne zaustavi. Tijekom hladnog valjanja, ova "hladna obrada" ili "očvršćavanje deformacijom" se nastavlja sve dok se u materijalu ne počnu razvijati pukotine, obično na rubovima traka. Međutim, ovaj postupak očvršćivanja može se ponoviti uporabom topline. Ovisno o temperaturi i vremenu izloženosti temperaturi, dobitak u čvrstoći materijala može biti obrnut i vraćen na njegovu početnu razinu prije hladnog oblikovanja. Materijal se također vraća u svoju izvornu duktilnost. Ovaj toplinski proces dolaska do takozvanog "nultog temperiranog" materijala opisan je kao žarenje. Od tog mekanog "nultog" stanja procesi hladnog oblikovanja se mogu ponovno pokrenuti. Kod industrijske proizvodnje ovaj postupak može se ponavljati više puta za proizvodnju vrlo tankih materijala od onoga što je izvorno bila debela ploča metala.

2.3.3. Precipitacijsko očvršćivanje

Precipitacijsko očvršćivanje, dozrijevanje ili starenje metala, vrsta je toplinske obrade metala gdje se ostvaruje izdvajanje fino disperzirane faze u osnovnoj strukturi metala. Učinak precipitacijskog očvršćivanja prvi je otkrio i upotrijebio praktično Wilm 1906. godine. Učinak je uzrokovan činjenicom, da jedan ili više pogodnih elemenata mogu oblikovati čestice, takozvane intermetalne spojeve, međusobno ili zajedno s matricom materijala aluminija. Oni također čine imperfekcije rešetke i, ovisno o veličini tih čestica i njihove ravnomjerne raspodjele, uzrokuju znatan porast čvrstoće. Cijeli proces počinje toplinskim tretmanom otopine, tj. svi legirni elementi su u otopini (čvrstoj otopini), nakon čega je potrebno kaljenje kako bi se dobila ravnomjerna raspodjela svih elemenata na sobnoj temperaturi. Nakon toga se uključeni elementi počinju kretati u matricu aluminija, povezuju se međusobno do intermetalnih spojeva i rastu. To se događa na sobnoj temperaturi, ali je učinkovitije na povišenim temperaturama (prirodno i umjetno starenje). Važno je znati da se učinci precipitacijskog očvršćivanja mogu smanjiti ako na materijal djeluju previsoke temperature kratko vrijeme ili umjerenije temperature duži vremenski period. Ovdje se mora naglasiti da danas precipitacijski očvršćene legure dominiraju u mnogim područjima (npr. ekstrudirani profili). Tijekom (toplih) procesa obrade one imaju nisku otpornost na deformiranje, a često iznimna čvrstoća se ostvaruje naknadno - procesom precipitacijskog očvršćivanja.

2.4. Legure aluminija

Legiranjem primarnog aluminija s legirnim elementima stvaraju se osnovne skupine legura aluminija, gdje se dobivaju legure različitog kemijskog sastava i različitih mehaničkih svojstava. Alumijske legure se obično klasificiraju s obzirom na postupak proizvodnje (lijevane i kovke legure) i na toplinski tretman (toplinski tretirane ili toplinski netretirane), ili s obzirom na kemijski sastav.

U praksi je samo za nekoliko elemenata dokazano da su uistinu pogodni kao legirni elementi kod aluminija za konstrukcijsku primjenu. To su: magnezij (Mg), silicij (Si), mangan (Mn), bakar (Cu) i cink (Zn). Mogu se koristiti pojedinačno ili u kombinacijama. Alumijske legure dijele se u skupine ovisno o vodećem legirnom elementu, odnosno legirnom elementu prisutnom u najvećoj količini u leguri. Označavanje kovkih alumijskih legura prema [4, 5] prikazano je u tablici 2.

Skupina 1xxx označava aluminij s minimalnom čistoćom od 99,00 % i više. Drugi broj označava promjene u granicama dopuštenih nečistoća. Ako je drugi broj 0, riječ je o nelegiranom aluminiju s udjelom nečistoća u granicama prirodnih koncentracija. Ako je drugi broj različit od 0, tada taj broj označava potrebu posebne kontrole koncentracije jednog ili više onečišćenja ili legirnog elementa. Zadnja dva broja označavaju minimalni propisani postotak aluminija iznad 99,00 % (npr. 50 znači da je min. 99,50 % aluminija). Legure aluminija prepoznaju se po tome što su na

prvom mjestu brojevi između 2 i 8, kako je navedeno u tablici 2. U nizu oznaka legura aluminija drugi broj označava modifikaciju legure. Ako je taj broj 0, onda se radi o izvornoj leguri, a ako je različit od 0 riječ je o njenoj modifikaciji. Zadnja dva broja nemaju posebno značenje, nego služe za identifikaciju različite alumijske legure u grupi.

Tablica 2. Označavanje glavnih skupina kovkih alumijskih legura

Glavni legirni element	Brojčana oznaka	Kemijski simbol
Aluminij (Al)	EN AW 1xxx	EN AW Al
Bakar (Cu)	EN AW 2xxx	EN AW AlCu
Mangan (Mn)	EN AW 3xxx	EN AW AlMn
Silicij (Si)	EN AW 4xxx	EN AW AlSi
Magnezij (Mg)	EN AW 5xxx	EN AW AlMg
Magnezij i silicij (Mg i Si)	EN AW 6xxx	EN AW AlMgSi
Cink (Zn)	EN AW 7xxx	EN AW AlZn
Ostali elementi (Željezo Fe)	EN AW 8xxx	EN AW AlFe

Označavanje glavnih ljevanih alumijskih legura definirano je normama [6-8]. Prikaz oznaka glavnih skupina alumijskih legura za lijevanje dan je u tablici 3. Ljevane alumijske legure ispred brojčane oznake imaju prefiks EN (oznaka europske norme), iza kojeg odvojeno praznim mjestom stoji oznaka A (aluminij). Iza slova A slova (X) označava oblik proizvoda koji može biti:

- B: legirni alumijski ingot namijenjen pretaljanju,
- C: odljevci,
- M: glavne legure.

Tablica 3. Označavanje najučestalijih glavnih skupina ljevanih alumijskih legura

Glavni legirni element	Brojčana oznaka
Bakar (Cu)	EN AX 2xxxx
Silicij (Si)	EN AX 4xxxx
Magnezij (Mg)	EN AX 5xxxx
Cink (Zn)	EN AX 7xxxx

Prvi broj u oznaci ljevane legure označava glavni legirni element. Drugi broj u brojčanoj oznaci pokazuje grupu legure, treći broj može biti bilo koji, dok je četvrti broj uvijek 0. Peti broj također je 0, osim ako legura nije namijenjena za primjenu u zrakoplovstvu.

2.5. Izbor legura

Kod izbora prikladne legure za nosive konstrukcije potrebno je voditi računa o nizu čimbenika. Prilikom projektiranja nosivih konstrukcija od alumijskih legura potrebno je osim odabira pojedine legure za nosive konstrukcije poznavati i fizička svojstva pojedine alumijske legure koja su navedena u HR EN 1999-1-1, [9]. Izbor najpogodnijih legura između onih koje su

navedene u [9] čini se prilično teško. Osim vrijednosti čvrstoće, koja je za inženjera konstruktora najvažnije svojstvo, legure se razlikuju s obzirom na mnogo drugih aspekata:

- dostupnost u obliku lima ili/i profila,
- dostupnost za nabavu,
- sposobnost dekorativne anodizacije,
- mogućnost izrade višestrukih poprečnih presjeka,
- iznimno dobru ili bolju čvrstoću pri zavarivanju,
- iznimno dobru otpornost na koroziju (za specijalne primjene),
- cijenu,
- savitljivost/sposobnost oblikovanja (profili),
- sposobnost presavijanja (limovi),
- visoku duktilnost,
- čvrstoću zbog utjecaja i pod utjecajem povišenih temperatura.

Uobičajeno se za svaku primjenu nekoliko gore navedenih zahtjeva treba zadovoljiti, ali uvijek je važna dostupnost i niska cijena. Stoga je, u većini slučajeva, izbor legure i temperiranosti praktično određen.

Aluminijske legure su prema [9] svrstane u tri skupine trajnosti: A, B i C, uz opadajući redoslijed s obzirom na trajnost. Te se razredbe upotrebljavaju kako bi se odredila potreba i stupanj zahtijevane zaštite. U konstrukcijama u kojima je upotrijebljeno više legura, uključujući elektrode u varovima, razredba trajnosti treba biti u skladu s najnižom razredbom.

Kovke toplinski obradive legure, pogodne kao osnovni materijal za konstrukcije, pripadaju nizu 6xxx (EN AW-6082, EN AW-6061, EN AW-6005A, EN AW-6106, EN AW-6063 i EN AW-6060) i svrstane su u razred trajnosti B. Od nizova legura 7xxx, legura EN AW-7020 prikladna je za opće konstrukcijske primjene i ima razred trajnosti C.

Kovke toplinski neobradive legure iz nizova 3xxx, 5xxx, 8xxx (EN AW-3004, EN AW-3005, EN AW-3103, EN AW-5005, EN AW-5049, EN AW-5052, EN AW-5454, EN AW-5754, EN AW-5083 i EN AW-8011A) preporučuju se za konstrukcijske elemente. Sve legure iz nizova 3xxx i 5xxx imaju razredbu trajnosti skupine A, dok legura EN AW-8011A ima razredbu trajnosti B.

Za konstrukcijske primjene preporučuje se šest lijevanih legura, četiri toplinski obradive EN AC-42100, EN AC-42200, EN AC-43000, EN AC-43300 i dvije toplinski neobradive EN AC-44200 i EN AC-51300. Sve lijevane legure iz niza 4xxxx imaju razredbu trajnosti B, dok lijevana legura iz niza 5xxxx ima razredbu trajnosti A.

Na kraju da rezimiramo, za konstrukcijske primjene najčešće korištene legure su:

- EN AW-6082 i EN AW-6061 za konstrukcije od limova i istisnutih profila,
- EN AW-5083 i EN AW-5754 za konstrukcije od limova,
- EN AW-6060 i EN AW-6063 za konstrukcije od istisnutih profila.

Za izbor valjanih aluminijskih legura nužno je poznavati sustav oznaka koji služi za karakteriziranje stanja, odnosno temperiranja. Stanje aluminija može biti:

- F - sirovo stanje proizvodnje,
- O - žareno stanje,
- H - očvršćeno deformacijom, npr. hladna obrada,
- W - rastvorno (nestabilno) temperirano,
- T - toplinski tretirano, odnosno jednostavno temperirano.

Osim tog, navodi se značenje ostalih najčešćih oznaka za temperiranje (T):

- T1 - hlađeno nakon toplog deformiranja i prirodno dozrijevano,
- T2 - hlađeno nakon toplog deformiranja, hladno deformirano i prirodno dozrijevano,
- T3 - rastvorno temperirano, hladno deformirano i prirodno dozrijevano,
- T4 - rastvorno temperirano i prirodno dozrijevano,
- T5 - hlađeno nakon toplog deformiranja i umjetno dozrijevano,
- T6 - rastvorno temperirano i umjetno dozrijevano,
- T7 - rastvorno temperirano i umjetno prezirio,
- T8 - rastvorno temperirano, hladno deformirano i umjetno dozrijevano,
- T9 - rastvorno temperirano, umjetno dozrijevano i hladno deformirano.

Nadalje, vrlo bitno je kod projektiranja aluminijskih konstrukcija poznavati oznake poluproizvoda koji su vezani za pojedinu leguru aluminija. U HR EN 1999-1-1 [9], uz upućivanje na odgovarajuću normu, dane su sljedeće oznake:

SH- lim (HRN EN 485)	EP/H - istisnuti šuplji profili (HRN EN 755)
ST - trake (HRN EN 485)	EP/O - istisnuti otvoreni profili (HRN EN 755)
PL - ploča (HRN EN 485)	ER/B - istisnuta šipka (HRN EN 755)
DT - vučena cijev (HRN EN 754)	ET - istisnuta cijev (HRN EN 755)
EP - istisnuti profili (HRN EN 755)	FO - otkivci (HRN EN 586)

3. Primjena aluminijskih legura u građevinarstvu

3.1. Konkurentnost

Najbolja primjena se može ostvariti u nekim tipičnim slučajevima, koje se odlikuju u ostvarivanju najmanje jedno glavno osnovno svojstvo: mala težina, otpornost na koroziju i funkcionalnost, [10]. Konstrukcijske primjene koje najbolje odgovaraju tim svojstvima u području graditeljstva su sljedeće:

- krovni sustavi velikih raspona kod kojih su promjenjiva opterećenja mala u odnosu na stalna opterećenja, kao u slučaju mrežastih prostornih konstrukcija i geodetskih kupola za natkrivanja površina velikih raspona,
- konstrukcije smještene na nedostupnim mjestima daleko od radionice, za koje su trošak prijevoza i lakoća montaže od iznimne važnosti, kao što su na primjer dalekovodni stupovi koji se mogu prenositi pomoću helikoptera,
- konstrukcije koje se nalaze u korozivnim ili vlažnim okolišima, kao što su krovovi bazena, riječni mostovi, hidrotehničke građevine i *offshore* nadkonstrukcija,

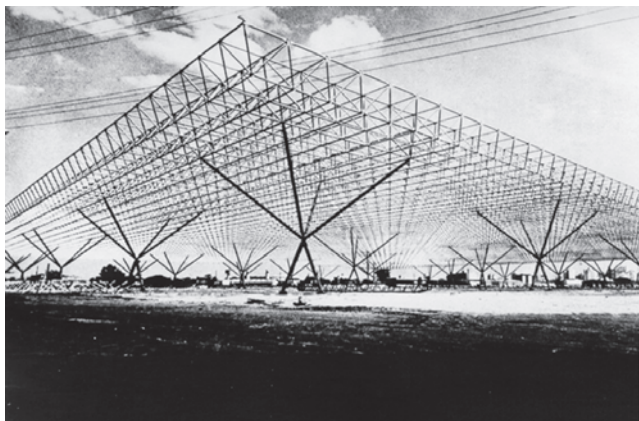
- konstrukcije koje imaju pokretne dijelove, kao što su mosne dizalice za otpadne vode, i pokretni mostovi, gdje mala težina znači ekonomičnost utrošene snage pri radu (korištenju),
- konstrukcije posebne namjene, za koje su radovi održavanja posebno teški i moraju se ograničiti, kao što je u slučaju jarbola, rasvjetnih stupova, antenskih tornjeva, znakovnih portala na autocestama, i tako dalje.

Navedene primjene uglavnom pripadaju području građevinarstva, ali šire područje potencijalnih primjena je općenitije od "konstrukcijskog inženjerstva".

3.2. Mala težina konstrukcije

Kad je težina konstrukcije temeljno pitanje, upotreba aluminija može predstavljati valjanu alternativu čeliku. Osim toga, potpuna odsutnost održavanja povećava prednosti posebno za one konstrukcije koje se nalaze u vlažnom okolišu.

Nekoliko primjena mrežastih prostornih konstrukcija može se naći u Južnoj Americi (Brazil, Kolumbija, Ekvador). Povijesni prvijenac u ovom području predstavlja vrlo spektakularna prostorna konstrukcija koja je izgrađena za Interamerički izložbeni centar u Sao Paulu u Brazilu 1969. (slika 2.) na površini od približno 67.600 m² s mrežom 60 x 60 metara. Visina konstrukcije (sloja) je 2,36 m.



Slika 2. Krovna konstrukcija *Inter-American Exhibition Centre*, San Paolo, Brazil - u izgradnji

U potpunosti je spojena vijcima na tlu, i kasnije je podignuta na završnu razinu od 14 m pomoću 25 dizalica smještenih u uglovima mreže, na mjestima stvarnih oslonaca. Težina od konstrukcije je 16 kg/m²; broj elemenata je 56.820 i njihova ukupna duljina je 300 km. Vrijeme montaže je izuzetno kratko (27 sati), a upotrijebljeno je 550.000 vijaka u 13.724 čvora. Materijali su: legure aluminija 6063 i 6351 serije T6 za cilindrične šipke, odnosno Al 99,5 za trapezne limove i, galvanizirani čelični vijci za spojeve. Vrlo sličan je primjer Međunarodnog kongresnog centra u Rio de Janeiru, gdje je korištena ista mreža 60 x 60 m, pokrivajući ukupnu površinu od 33.000 m² (slika 3.).



Slika 3. Međunarodni kongresni centar u Rio de Janeiru, Brazil / simulacija rekonstrukcije

Među mnogim različitim primjenama mrežastoga sustava pokrivenog aluminijskim pokrovom mogu se spomenuti: krov sportske dvorane *Coliseo General Rumiñahui*, Quito, Ekvador, slika 4., i spomen-piramida u La Baie (Quebec, Kanada), slika 5., za sjećanje na štetu zbog poplave u 80-ima.



Slika 4. *Coliseo General Rumiñahui*, Quito, Ekvador



Slika 5. Spomen-piramida u La Baie, Quebec, Kanada

Mrežaste kupole predstavljaju najizazovnije primjene aluminijskih legura u području građevinarstva - konstrukcijskog inženjerstva, omogućujući realizaciju važnih građevina

(sportskih dvorana, izložbenih centara, kongresnih dvorana, predavaonica, itd.). Ove primjene su vrlo zanimljive zbog brzine montaže, sustava spajanja i zavidnih dimenzija. Prve primjene su: *Dome of Discovery* izgrađena u Londonu za izložbu *South Bank* tijekom *Festival of Britain* (1951.), a sastoji se od prostornih mrežastih lukova s promjerom od 110 m i težinom od 24 kg/m² i geodetska kupola izgrađena za natkrivanje "Palasport" u Parizu, koristeći *Kaiser Aluminium* sustav s promjerom od 61 m i visinom od 20 m (1959.). Obje konstrukcije bile su poput prototipova u njihovom području: najveće i prve.

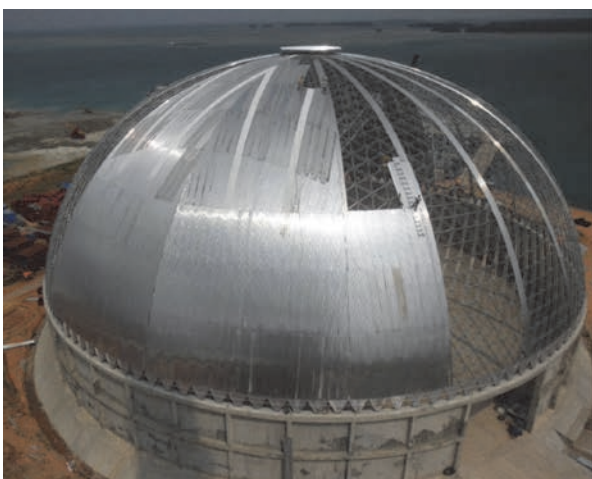


Slika 6. Kupola *Spruce Goose*, Long Beach, Kalifornija, USA

U novije vrijeme zanimljivi konstrukcijski sustavi za geodetske kupole izrađene od aluminija ostvareni su u Sjedinjenim Američkim Državama, gdje su *ad hoc* sustavi korišteni i za natkrivanje industrijskih otpadnih voda iz ekoloških razloga, i za krovove javnih zgrada velikih raspona. Poznata primjena je kupola *Spruce Goose*, koja je najveća na svijetu s promjerom od nešto više od 125 metara (slika 6.). Mnoge geodetske kupole koriste se za primjenu u industriji, kao što su postrojenja za skladištenje ugljena (slika 7.).

3.3. Niski zahtjevi održavanja

Postoje posebne konstrukcije koje imaju funkciju nošenja fiksnih elemenata, koji se nalaze na određenoj udaljenosti



Slika 7. Aluminijaska kupola za skladištenje ugljena

od tla, s prevladavajućom (dominantnom) dimenzijom koja je horizontalna (npr. portalni okviri za prometne znakove) ili je, pak, vertikalna (npr. antene, dalekovodni stupovi i rasvjetni tornjevi). Za sve takve konstrukcije, odsutnost održavanja temeljni je preduvjet. U isto vrijeme, proces ekstruzije može poboljšati geometrijska svojstva presjeka na takav način da se dobije minimalna težina i najviša konstrukcijska učinkovitost. Osim toga, niska težina aluminija omogućuje montažne sustave koji su vrlo laki za transport i montažu, dajući tako konkurentna rješenja u usporedbi s drugim materijalima.



Slika 8. Aluminijски tornjevi, Napulj, Italija

Mnogi dalekovodni tornjevi (stupovi) izgrađeni su u Europi, a dva su važna aluminijaska tornja izgrađena u Napulju. Prvi primjer je toranj za parabolične antene Napuljskog odjela elektrotehnike koji je izveden 1986. godine. Razlog za odabir aluminija je u osnovi njegova mala težina (toranj je podignut na vrhu postojećih armiranobetonskih stuba) i svojstvo otpornosti na koroziju (nema problema s održavanjem). Njegova visina je 35 m od vrha stubišta (ukupno oko 50 m). Sastoji se od valjka unutarnjeg promjera 1800 mm i debljine stijenke od 20 mm.



Izrađen je zavarivanjem u radionici, dijeljenjem ukupne visine u tri dijela, koja su spojena vijcima na gradilištu (slika 8., lijevo). Drugi primjer je *Information Tower* u blizini nogometnog stadiona u Napulju, koji je opremljen antenama i ekranima kako bi se pratili igre ispred stadiona (slika 8., desno).

Područje gdje svojstva aluminija imaju ključnu ulogu je – hidraulička primjena (cjevovodi, spremnici). Slučaj rotirajuće mosne dizalice za velike taložne kružne bazene kod postrojenja za pročišćavanje otpadnih voda tipičan je primjer. Konkretno, "otpornost na koroziju" omogućuje uklanjanje bilo kakve zaštite i kod prisutnosti od korozivnog okruženja, dok "lakoća" (mala težina) odgovara štednji energije tijekom faza rada postrojenja (slika 9.).



Slika 9. Bazen postrojenja za pročišćavanje otpadnih voda *Po-Sangone*, Torino, Italija

Čini se važnim naglasiti da se danas primjene kod *off shore* konstrukcija mogu smatrati glavnim budućim trendom za aluminijske legure. Ustvari, one nude ovoj industriji goleme prednosti u obliku uštede, jednostavnosti proizvodnje i dokazane učinkovitosti u teškom i neprijateljskom okruženju.

Stube, podnice međukatova, pristupne platforme, šetnice, hodnici, mostovi, tornjevi i sustavi kablskih ljestvi mogu biti izgrađeni u predgotovljenim segmentima za jednostavnu montažu na moru, ili u tvorničkom dvorištu. Platforme za helikoptere izrađuju se od aluminijskih legura već sedamdesetih godina prošlog stoljeća, pa su sada u potpunosti provjerene za teške uvjete rada, slika 10. Štoviše, one su projektirane da budu u modulima i imaju vijčane spojeve te na taj način omogućavaju brzu montažu i jednostavno rukovanje i transport brodom. Osim toga, omogućuju smanjenje težine do 70 % u odnosu na čelik, zadovoljavajući najstrože standarde sigurnosti, te pružajući do 12 % smanjenja troškova.

Nedavno je razvijen čitav niz modula za zapovjedništvo i komunalije, od modula široke namjene do fleksibilnih modula. Moduli se mogu koristiti pojedinačno ili se mogu sastavljati u grupu kako bi se formirali višekatni kompleksi, povezani središnjim poprečnim hodnicima i stubištem.

3.4. Mostovi

Izgrađene su sve vrste mostova koristeći aluminijske legure. Most Arvida u Quebecu, Kanada, (1950.) izazovni je prototip



Slika 10. Platforme za helikoptere



Slika 11. Most Arvida u Quebecu, Kanada



autocestovnog mosta izrađenog od aluminijske legure. Izgrađen je prema Maillart-ovoj ideji s ukupnim rasponom od 150 m, lukom s rasponom od 87 m i ukupne težine od 200 tona (slika 11.). Također je razvijena tehnologija spregnutih konstrukcija izrađenih od aluminijskih nosača i betonskog kolnika. Spregnuti sustavi beton-aluminij korišteni su u nekim mostovima izgrađenim šezdesetih godina prošlog stoljeća u Sjedinjenim Američkim Državama i kasnije u Francuskoj. Novo značajno područje primjene su vojni mostovi kod kojih mala težina i otpornost na koroziju imaju najvažniju ulogu. Zasad je poznato da se raspon do 40 m može svladati primjenom montažnih elemenata - jednostavno ih je transportirati i sklopiti. Glavna primjena ostvarena je u Velikoj Britaniji, Njemačkoj i Švedskoj, slika 12. U Njemačkoj se vojni most proizvodi sastavljen od montažnih jedinica, lagan za transport i postavljanje/sklapanje (slika 13.).



Slika 12. Novi švedski vojni most



Slika 13. Njemački vojni most tijekom montaže

Pješački most je s obzirom na nisko pokretno opterećenje tip konstrukcije gdje se aluminijske legure uspješno koriste. Dodatne prednosti zahvaljujući "lakoći" očite su na primjeru pokretnih mostova. Primjeri aluminijskih pješačkih mostova mogu se naći u Francuskoj, Njemačkoj, Nizozemskoj, Italiji i u Kanadi.

3.5. Obnova mostova

Lagani sustav za zamjenu oštećenih betonskih kolničkih konstrukcija mosta razvijen je i primijenjen u Švedskoj, a baziran je na ortotropnoj ploči od aluminijskih šupljih ekstruzija. Ovo

rješenje može biti vrlo konkurentno u mnogim slučajevima kao alternativa konvencionalnim rješenjima. Smanjenje težine omogućilo je korištenje postojećih temelja i ležajeva.

4. Eurokodovi i aluminij

Neizbježna složenost normi za aluminijske konstrukcije uglavnom je uzrokovana prirodom samog materijala (puno više "kritičan" i manje poznat od čelika), koja uključuje rješenje o složenim problemima i zahtijeva pomne analize. Zbog toga se nameće posebna potreba, odnosno zahtjev, da norma bude edukativna i informativna, a ne samo normativna.

ENV izdanje Eurokoda 9 "Projektiranje aluminijskih konstrukcija" iz 1998. godine bilo je sastavljeno od tri dokumenta (dio 1.1 "Opća pravila", dio 1.2 "Projektiranje konstrukcija na djelovanje požara" i 2. dio "Konstrukcije osjetljive na zamor"). Na izričit zahtjev Europskog udruženja za aluminij (eng. *European Aluminium Association* - EAA), i osobite zainteresiranosti aluminijske industrije za nova područja primjene, dodane su dvije nove stavke u fazi pretvorbe: hladno oblikovani konstrukcijski limovi i ljuskaste konstrukcije. Na temelju prikupljenih primjedbi u međuvremenu, na fazi pretvorbe iz ENV u EN počelo se raditi 2001. godine. Ta faza završila je 2005. godine i konačna verzija Eurokoda 9 je sastavljena od pet dokumenata:

- *Opća pravila* - dio 1.1
- *Projektiranje konstrukcija na djelovanje požara* - dio 1.2
- *Konstrukcije osjetljive na zamor* - dio 1.3
- *Hladno oblikovani konstrukcijski limovi* - dio 1.4
- *Ljuskaste konstrukcije* - dio 1.5.

Za razliku od drugih eurokodova, Eurokod 9 se sastoji od samo jednog dijela, koji je podijeljen u jedan temeljni dokument "Opća pravila" i četiri posebna dokumenta, koja su vezana uz taj temeljni. Ne spominju se određene vrste građevina, kao u čelika (npr. mostovi, tornjevi, spremnici...), nego samo opće teme koje se mogu primijeniti ne samo na raspon građevinskog inženjerstva, već i šire na bilo kakve konstrukcijske primjene, uključujući i transportnu industriju.

Priprema Eurokoda 9 temeljena je na najvažnijim rezultatima koji su postignuti u području konstrukcija od aluminijskih legura, bez zanemarivanja prijašnjih aktivnosti provedenih unutar ECCS-a i u reviziji izvanrednih normi, kao na primjer BS 8118.

ECCS metoda za izvijanje stupova je, uz neke male uredničke izmjene, primijenjena i u EC 9. Utemeljena je na korištenju dviju linija izvijanja (a i b), koje pokrivaju ekstrudirane profile izrađene od termički obrađenih, odnosno hladno očvrslulih legura, [11]. Općenito, provjere nosača, stupova i nosača-stupova provode se uzimajući u obzir specifičnosti aluminijskih legura. Za zavarene profile, redukcijski učinci zone utjecaja topline uzeti su u obzir preko odgovarajućih redukcijskih faktora. Ova metoda se temelji na eksperimentalnim opažanjima, što je omogućilo karakteriziranje elemenata aluminijskih legura kao "industrijskih" štapova.

Inovativnost Eurokoda 9, dijela 1.1 "Opća pravila", jest činjenica da po prvi put u normama za aluminijske konstrukcije počinje analiza neelastičnog ponašanja od poprečnog presjeka do konstrukcije kao cjeline. Klasifikacija presjeka je provedena na temelju eksperimentalnih rezultata, koji su proizašli iz *ad hoc* istraživačkog projekta podržanog od glavnih predstavnika europske aluminijske industrije koji su osigurali materijal za uzorke. Rezultat je utvrđivanje razreda ponašanja na temelju omjera vitkosti b/t , prema pristupu kvalitativno sličnom onome koji se primjenjuje za čelik, ali s različitim proširenjem opsega ponašanja, koje je utemeljeno na eksperimentalnim zapažanjima i potvrđeno numeričkim simulacijama, [12].

Vrednovanje otpornosti poprečnih presjeka uvedeno je na jedinstven način s posebnim upućivanjem na granična stanja koja se tiču ponašanja četiri razreda. Za elemente razreda 4 (vitki poprečni presjeci), provjera učinka lokalnog izvijanja provodi se pomoću nove metode izračuna koja se temelji na konceptu efektivne debljine. Tri nove linije izvijanja za vitke poprečne presjeke procijenjene su uzimajući u obzir i termički obrađene i hladno očvršnule legure zajedno sa zavarenima i nezavarenima, [2]. Ova metoda predstavlja temeljno polazište za detaljno razmatranje hladno oblikovanih konstrukcijskih limova, kako je navedeno u dijelu 1.4 "Hladno oblikovani konstrukcijski limovi".

Problem procjene unutarnjih sila i momenta razmotren je uzimajući u obzir nekoliko modela konstitutivne zakonitosti materijala, od najjednostavnijih do najsofisticiranijih, koji vode do različitih stupnjeva aproksimacije. Globalna analiza konstrukcijskih sustava u neelastičnom području (plastičnost, očvršćivanje) bila je utemeljena na jednostavnoj metodi koja je slična dobro poznatoj metodi plastičnog zgloba, ali uzima u obzir tipične parametre aluminijskih legura poput nepostojanja platoa popuštanja, kontinuiranog očvršćivanja, ograničene duktilnosti nekih legura, [2].

Istaknuta je važnost duktilnosti za lokalno i globalno ponašanje aluminijskih konstrukcija zbog ponekad loših vrijednosti krajnjeg produljenja i ustanovljena je nova *ad hoc* metoda za procjenu rotacijskog kapaciteta za elemente u savijanju, [13].

S obzirom na ponašanje spojeva, predložen je novi klasifikacijski sustav za otpornost, krutost i duktilnost. Na temelju eksperimentalnih zapažanja iz monotonog i cikličnog ispitivanja, nova je metoda za procjenu otpornosti spojeva T-komada uspostavljena i uvedena u dio 1.1.

Novi dio 1.5 koji se bavi ljuskastim konstrukcijama napravljen je slijedeći isti format sličnog dokumenta u EC 3, ali se metoda izračuna temelji na odgovarajućim linijama izvijanja koje su dobivene iz eksperimentalnih zapažanja o aluminijskim ljuskama, [14].

Projektiranje na djelovanje požara zajednička je tema za sve eurokodove koji se bave konstrukcijskim materijalima i nalazi se u dijelu 1.2. Za aluminijske konstrukcije to je kodificirano prvi put u skladu s općim pravilima koja procjenjuju vatrootpornost na temelju tri kriterija: otpornost (R), izolacija (I) i integritet (E). Kao što je dobro poznato, aluminijske legure su općenito manje otporne na visoke temperature u odnosu na čelik i armirani

beton. Ipak, uvođenje racionalnih metoda procjene rizika, analiza požarnog scenarija može u nekim slučajevima dovesti do povoljnijeg odnosa temperature i vremena. Na taj način aluminij može biti konkurentniji i toplinska svojstva aluminijskih legura mogu imati povoljan učinak na razvoj temperature u konstrukcijskoj komponenti, [1].

Znanje o ponašanju aluminijskih priključaka na zamor konsolidirano je tijekom zadnjih 30 godina, [1]. Već davne 1992. objavljene su ECCS preporuke za projektiranje aluminijskih konstrukcija kod zamora, koje su temeljne pretpostavke za razvoj Eurokoda 9. Odlučeno je okarakterizirati dio 1.3 "Konstrukcije osjetljive na zamor" od EC 9 na općenit način, davanjem općih pravila primjenjivih na sve vrste konstrukcija izloženih uvjetima djelovanja zamora s obzirom na granično stanje zamorom izazvanog loma. To je učinjeno bez obzira na čelik, za koji se 2. dio bavi samo mostovima. Uvedene su tri metode projektiranja (proračuna) s obzirom na:

- siguran proračunski vijek (SLD – en. safe life design)
- dopušteno oštećenje (DTD – en. damage tolerant design)
- projektiranje utemeljeno na ispitivanju.

Razmatrane su sljedeće osnovne grupe kategorija detalja:

- nezavarenih detalja kod kovkih i lijevanih legura,
- elementi s poprečno zavarenim dodacima,
- elementi s uzdužno zavarenim dodacima,
- zavareni spojevi između elemenata,
- križni (poprečni) varovi/složeni elementi,
- mehanički pričvršćeni priključci,
- adhezijski slijepjeni priključci.

Upotreba konačnih elemenata i uputa o procjeni mehanizmima loma bila je predložena za analizu naprezanja.

Na kraju treba napomenuti da je važnost kontrole kvalitete zavarivanja posebno istaknuta s odgovarajućom uputom na norme iz skupine (HRN) EN 1090 "Izvedba čeličnih i aluminijskih konstrukcija".

5. Zaključak

Iako je visoka cijena proizvodnje aluminijskih legura osnovna zapreka njihove široke primjene u građevinarstvu, upotreba aluminijskih legura u građevinskim konstrukcijama nedvojbeno ima svoje opravdanje. U radu su prikazane samo neke situacije u kojima konstrukcijska primjena aluminijskih legura daje prikladno i često jedino praktično rješenje. Dani su primjeri u kojima je prioritet bilo ostvarivanje ekonomičnih konstrukcija sa što manjom težinom (veliki rasponi, transport, ugradnja) i sa što duljom trajnosti (otpornost na koroziju). Uobičajeno, razlozi za primjenu aluminija proizlaze iz svojstava koje aluminijske legure posjeduju: mala težina, lagana obrada, žilavost na niskim temperaturama, mali troškovi održavanja, trajnost i sposobnost recikliranja. Pitanja stabilnosti aluminijskih konstrukcijskih elemenata i otpornosti na požar još su uvijek nedovoljno istražena, a različito ponašanje velikog broja aluminijskih legura

u primjeni onemogućuje jednostavnu analogiju s čelikom. Najnovija, prva faza razvoja druge generacije europskih normi ovoj problematici posvećuje veliku pozornost. Bez obzira na trenutačno stanje normative, kroz pregled osnovnih

svojstava aluminijskih legura i razvoja eurokoda za aluminijske konstrukcije u ovom su radu dani temelji koji omogućuju lakše ulaganje u specifičnu problematiku projektiranja ovih, još uvijek zapostavljenih, metalnih konstrukcija.

LITERATURA

- [1] Mazzolani, F. M.: Aluminium Alloy Structures (second edition), E & FN SPON, an imprint of Chapman & Hall, London, 1994.
- [2] Mazzolani, F. M. (editor): Aluminium Structural Design, International Centre for Mechanical Sciences - Courses and Lectures Vol. 443, Springer Vienna, 2003.
- [3] Web stranica International Aluminium Institute (www.world-aluminium.org) - pristupljeno 24.04.2014.
- [4] HRN EN 573-1:2008, Aluminij i aluminijeve legure - Kemijski sastav i oblici gnječanih proizvoda - 1. dio: Sustav brojanog označavanja (EN 573-1:2004).
- [5] HRN EN 573-2: 2008, Aluminij i aluminijeve legure - Kemijski sastav i oblik gnječanih proizvoda - 2. dio: Sustav označavanja na temelju kemijskih simbola (EN 573-2:1994).
- [6] HRN EN 1780-1: 2008 - Aluminij i aluminijeve legure - Označavanje legiranih aluminijevih ingota za pretaljanje, predlegure i odljevke - 1. dio: Sustav brojanog označavanja (EN 1780-1:2002).
- [7] HRN EN 1780-2: 2008 - Aluminij i aluminijeve legure - Označavanje legiranih aluminijevih ingota za pretaljanje, predlegure i odljevke - 2. dio: Sustav označavanja kemijskim simbolima (EN 1780-2:2002).
- [8] HRN EN 1780-3: 2008 - Aluminij i aluminijeve legure - Označavanje legiranih aluminijevih ingota za pretaljanje, predlegure i odljevke - 3. dio: Pravila pisanja kemijskog sastava (EN 1780-3:2002).
- [9] HRN EN 1999-1-1:2008, Eurokod 9: Projektiranje aluminijskih konstrukcija - Dio 1-1: Opća pravila (EN 1999-1-1:2007).
- [10] Mazzolani, F. M.: Structural Applications of Aluminium in Civil Engineering, Structural Engineering International (SEI), Journal of the IABSE, Vol. 16, No. 4, 2006, pp. 280-285.
- [11] Mazzolani, F. M.: Stability problems of aluminium alloy members: the ECCS methodology, in Structural Stability and Design (edited by S. Kitipornchai, G.J. Hancock & M.A. Bradford), Balkema, Rotterdam, 1995
- [12] Landolfo, R., Mazzolani, F.M.: The Background of EC9 design curves for slender sections (invited paper), Volume "FESTSCHRIFT" (in honour of Prof. Joachim Lindner), 1998.
- [13] De Matteis, G., Landolfo, R., Manganiello, M., Mazzolani, F.M.: Inelastic Behaviour of I-Shaped Aluminium Beams, Proceedings of the Sixth International Conference on Computational Structures Technology, B.H.V. Topping and Z. Bittnar (editors), Civil-Comp Press, Stirling, Scotland, 2002., <http://dx.doi.org/10.4203/ccp.75.27>
- [14] Mazzolani, F.M., Mandara, A.: Buckling of aluminium shells: proposal for European curves, Proceedings of the ICTWS 2004, 4th International Conference on Thin-Walled Structures, Loughborough Leicestershire, 2004.