

Primljen / Received: 9.2.2016.
 Ispravljen / Corrected: 28.4.2016.
 Prihvaćen / Accepted: 27.6.2016.

Dostupno online / Available online: 10.11.2016.

Nosači od aluminijskih legura ojačani elementima od čelika

Autori:



Mr.sc. **Boris Gligić**, dipl.ing.građ.
 "3dSECo", Srbija
gliga@orion.rs



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



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



Izv.prof.dr.sc. **Zoran Mišković**, dipl.ing.građ.
 Sveučilište u Beogradu
 Građevinski fakultet
mzoran@imk.grf.bg.ac.rs

Prethodno priopćenje

Boris Gligić, Dragan Buđevac, Zlatko Marković, Zoran Mišković

Nosači od aluminijskih legura ojačani elementima od čelika

Aluminij odnosno aluminijske legure kao materijal u građevinarstvu dominiraju u području fasadnih konstrukcija. U ovim primjenama se u praksi pojavljuje potreba da se fasadni nosači od aluminijskih legura ojačaju pri čemu se to izvodi i elementima od čelika. U radu je napravljena rekapitulacija mogućnosti s teorijskog i praktičnog aspekta. Kao jedno od optimalnih tehničkih rešenja predloženo je originalno s lijepljenjem čeličnih elemenata. Rješenje je potvrđeno pokusnim ispitivanjem na jednom uzorku u laboratorijskim uvjetima i osnova je detaljnijih istraživanja koja su u tijeku.

Ključne riječi:

aluminijske legure, spregnuti nosači, lijepljenje, nosivost presjeka, deformacija nosača

Preliminary report

Boris Gligić, Dragan Buđevac, Zlatko Marković, Zoran Mišković

Aluminium alloy girders strengthened by steel elements

When used as construction materials, the aluminium and its alloys are dominant in the field of façade structures. In these applications, a need has been felt in practice to strengthen façade structures made of aluminium alloys, and the steel is also used for such strengthening. A review of current possibilities is presented in the paper from theoretical and practical standpoints. An original solution involving gluing of steel elements is presented as an optimum technical solution. The solution has been proven by testing a sample in laboratory conditions, and it constitutes a basis for detailed research, which is currently under way.

Ključne riječi:

aluminium alloys, composite girders, gluing, cross-sectional bearing capacity, girder deformation

Vorherige Mitteilung

Boris Gligić, Dragan Buđevac, Zlatko Marković, Zoran Mišković

Mit Stahlelementen verstärkte Träger aus Aluminiumlegierungen

Aluminium beziehungsweise Aluminiumlegierungen dominieren im Bauwesen auf dem Gebiet von Fassadenkonstruktionen. Bei solchen praktischen Anwendungen besteht der Bedarf, die Fassadenträger aus Aluminiumlegierungen zu verstärken. Dazu werden unter anderem Stahlelemente verwendet. In dieser Arbeit werden dazu verschiedene Möglichkeiten in theoretischer und praktischer Hinsicht rekapituliert. Als ein optimales technisches Konzept wird das Aufkleben von Stahlelementen vorgeschlagen. Diese Lösungsmöglichkeit wurde mit Testversuchen an einer Probe unter Laborbedingungen bestätigt und dient als Grundlage für laufende detailliertere Untersuchungen.

Ključne riječi:

Aluminiumlegierungen, Verbundträger, Klebewirkung, Querschnittswiderstand, Trägerverformung

1. Uvod

Brojne knjige i predavanja iz područja armiranobetonskih konstrukcija i spregnutih konstrukcija od čelika i betona počinju konstatacijom kako je za razvoj tih područja zaslužna sretna okolnost da su koeficijenti termičkog širenja betona i čelika gotovo identični. Sve to, u kombinaciji s bitno različitim koeficijentima termičkog širenja kod aluminija i čelika i dobro poznatim problemom kontaktne korozije između tih dvaju materijala, kao i sama inženjerska intuicija, dugo su blokirali svaku pomisao ili pokušaj da se u građevinskom inženjerstvu spregnu aluminij i čelik, kao i materijali s različitim koeficijentima termičkog širenja uopće.

Međutim, već duže vrijeme svjedoci smo uspješnih primjera kombiniranja termički raznorodnih materijala kao što su čelik i aluminij u drugim područjima inženjerskog stvaralaštva, posebno u avioindustriji i brodogradnji, ali i u industriji raznih kompozitnih materijala ili proizvoda, na primjer panela, za različite primjene, pa i u građevinarstvu.

Automobilska industrija već više od desetljeća razvija karoserije koje su kombinacija odljevaka, profila i limova od aluminija i čelika. Strateška opredijeljenost u tome dovela je, u međuvremenu, i do stvaranja pretežno aluminijskih karoserija. Na slici 1., iz [1], prikazana je karoserija desetak godina starog modela AUDI-ja koja je kombinacija aluminijskih i čeličnih materijala. Sa slike se naslućuje da je spajanje moralo biti izvedeno na način koji sigurno

spreže aluminij i čelik, iako su komponentni materijali odvojeni i čine zasebne cjeline karoserije. Jasno je da su problemi koji nastaju pri sprežanju aluminija i čelika, bitno različiti koeficijent termičkog širenja, kontaktna korozija i problematika spajanja dvaju materijala, nekako svladani ili su kompenzirani, u krajnjem učinku, na ekonomski prihvatljiv način. O kompromisima na račun kvalitete, s obzirom na reputaciju tvrtke, zasigurno ovdje ne može biti riječi.

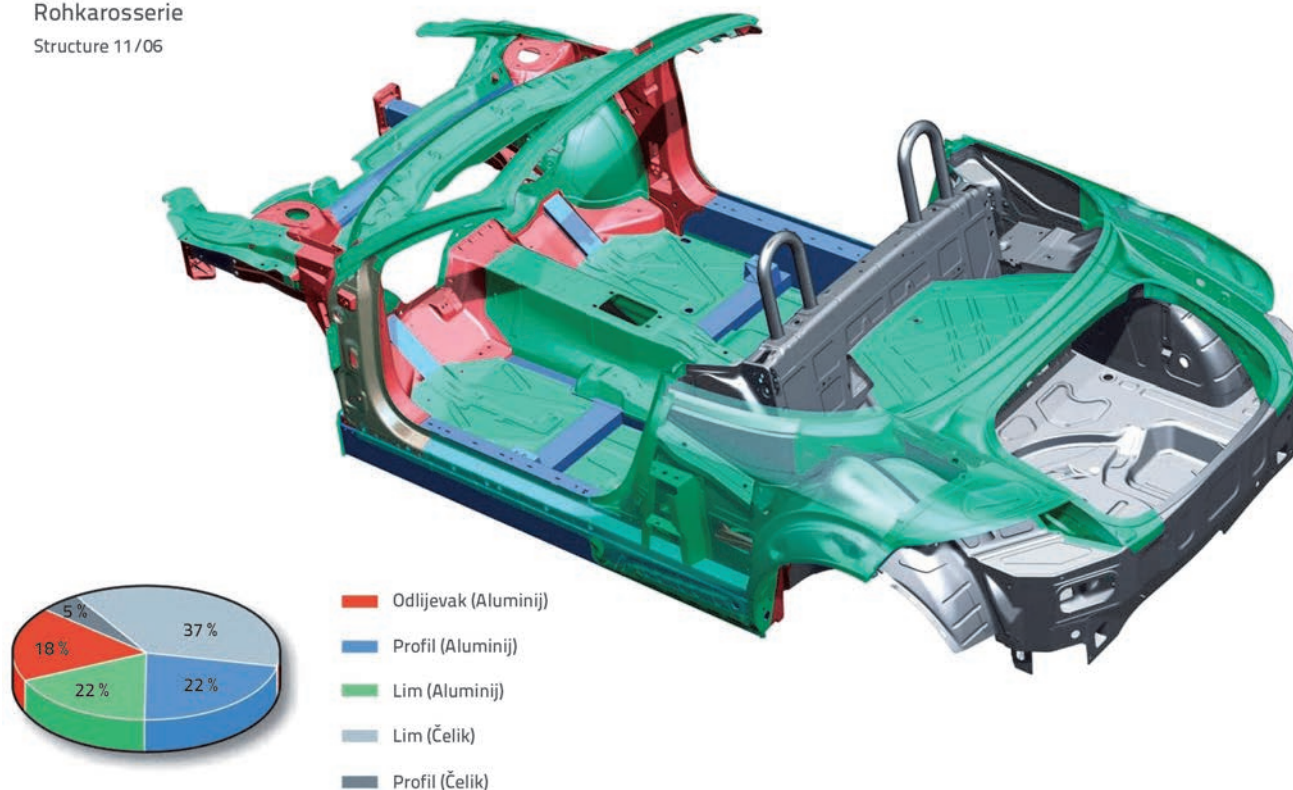
U pokušajima kombiniranja dobrih svojstva aluminija i čelika istraživači uspijevaju stvoriti upotrebljive kompozitne panele [2] u obliku lameliranih limova tako što s jedne ili obje strane čeličnog lima, u procesu valjanja, lijepe aluminijske limove. Na taj način dobivaju se lamelirani paneli s povoljnijim karakteristikama u odnosu na posve aluminijske ili posve čelične panele s istim ciljanim svojstvima. Istraživači, međutim, u objavljenim radovima diskretno napominju da su ispitivanja rađena na sobnoj temperaturi odnosno da utjecaji temperaturnih promjena nisu analizirani.

Prethodno spomenute tendencije nametnule su potrebu za istraživanjima na temu spajanja aluminija i čelika. Pojavila su se istraživanja i objavljeni radovi, među kojima i [3], koji se bave na prvi pogled teško zamislivim, zavarivanjem čelika i aluminija. Jasno je da je još uvijek u tijeku iznalaženje optimalnog postupka zavarivanja, ali se općenito može reći kako je dokazano da se zavarivanje aluminija za čelik na tehnokonomski prihvatljiv način može izvesti.

Audi TT Roadster

Rohkaroserie

Structure 11/06



Slika 1. Karoserija AUDI-ja TT kao hibrid aluminijskih i čeličnih dijelova

Usprkos jasnim aktivnostima na istraživanjima problematike spajanja i spreznja aluminija i čelika u drugim inženjerskim područjima, istraživanje literature u području građevinarstva pokazuje da je ova tematika zapostavljena. Osim nekih pokušaja istraživanja nosača formiranih spreznjem aluminijskih legura i čelika provedenih na Sveučilištu u Glasgowu, Škotska, koji su rezultirali serijom objavljenih, međusobno povezanih, radova [4-6], i jedne relativno novije stručne knjige [7], pri istraživanju literature na engleskom jeziku nije se naišlo na druga iskustva. Istraživači sa Sveučilišta u Glasgowu proveli su ispitivanje dvoosno savijenog konzolnog nosača formiranog spreznjem kutijastog profila od aluminijske legure s umetnutim hladnooblikovanim čeličnim U-profilima. Spreznje je izvedeno nesimetrično, vijcima po hrptu, a tijekom ispitivanja je variran način prijanjanja čeličnog profila unutar kutije od aluminijske legure. Rezultati istraživanja ne upućuju na značajno izraženu prednost spregnutog u odnosu na jednostavan kombinirani presjek. Temperaturne promjene nisu razmatrane prilikom istraživanja. U stručnoj knjizi [7] autori Kissell i Ferry navode dosta primjera spreznja aluminija s drugim materijalima, uključujući spreznje aluminija s drvom i betonom. Pri tome se uglavnom zadržavaju na analizi primjera ponašanja i proračuna spreznja aluminijskih legura i čelika. Čitavo jedno poglavlje knjige je posvećeno problematici simetričnog i nesimetričnog spreznja aluminijskih legura i čelika, uključujući utjecaje temperaturnih promjena. Ne ulazeći u ekonomsku analizu primjena, autori konstatiraju da se može naći primjena gdje to može imati i ekonomski smisao, odnosno gdje očigledne prednosti u pogledu nosivosti i deformabilnosti neće biti presudno kompromitirane utjecajem temperaturnih promjena.

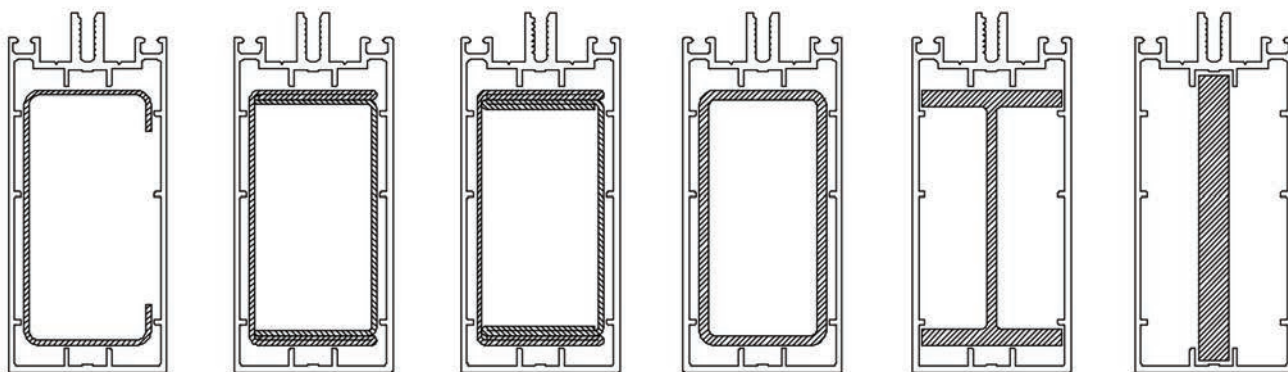
2. Primjeri iz prakse

Aluminijske legure kao materijal za građevinske konstrukcije nalaze primjenu u raznim područjima, [8-10], a jedno od područja gdje su se nametnule zapravo kao isključivo rešenje jesu konstrukcije staklenih fasada. Prilikom projektiranja i realizacije različitih fasada s konstrukcijom od aluminijskih

legura u inženjerskoj se praksi i katalogima raznih proizvođača, relativno često nailazi na dosta ujednačenu metodu rješavanja situacija koje na neki način odstupaju od tipične za koju je fasada projektirana i za koju su projektirani nosači od aluminijskih legura. Uobičajen način ojačanja je umetanje dodatnih čeličnih profila u osnovni nosač od aluminijske legure koji je, najčešće, kutijastog poprečnog presjeka. Takva ojačanja ne uključuju spreznje dvaju materijala.

Ako se fokusira samo na rješenja gdje je dodatni profil od čelika, s obzirom na to da postoje rješenja i s ubacivanjem aluminijskih profila, onda se uobičajena ojačanja fasadnih nosača od aluminijskih legura elementima od čelika mogu rekapitulirati rješenjima prikazanim na slici 2. Zajedničko svim rešenjima ovoga tipa jest ta da se, bar deklarativno, ojačanje ne spreže s osnovnim profilom nosača, odnosno da kombinirani nosač radi kao jednostavan zbroj komponentnih nosača. Ipak, autori ovoga rada uvjerili su se tijekom dugogodišnje prakse da prilikom izvođenja dolazi do raznih oblika neplanskog spreznja, a najčešće je to posljedica ugradnje samourezujućih vijaka na vezama za horizontale fasadnog sustava, odnosno za montažu vjetrobranskih letvi i drugih komponenti sustava fasade. Ima primjera da se to i planski radi, navode izvođači, kako pri montaži ne bi dolazilo do ispadanja profila ojačanja iz osnovnog profila. Mora se reći da su autori pratili uporabu nekih od tako izvedenih fasada gdje se znalo za neplansko i nekontrolirano spreznje, i da nisu uočene funkcionalne smetnje.

Proračun za rješenja onako kako su deklarativno osmišljena, bez spreznja, jednostavan je. Budući da su prijanjanjem nosači od aluminijske legure i čelika primorani imati zajedničku deformaciju izjednačavanjem izraza za progibe, na primjer za jednostavno oslonjenu gredu opterećenu jednolikim opterećenjem q , lako se iz jednadžbe (1) mogu odrediti odgovarajući dijelovi ukupnog opterećenja koje nose nosači od aluminijske legure (q_a), odnosno čelika (q_s). U izrazima je iskorištena činjenica da je odnos modula elastičnosti čelika i aluminijske legure, $E_s = 210000$ MPa i $E_a = 70000$ MPa, konstanta, $E_s/E_a = 3$, a oznake I_a i I_s odnose se na pojedinačne momente tromosti aluminijskog odnosno čeličnog dijela kombiniranog presjeka. Daljnji proračuni, praktično, mogu se izvoditi neovisno prema propisima za odgovarajući materijal.



Slika 2. Primjeri planskih ojačanja iz kataloga proizvođača fasadnih sustava

$$q_s = q \frac{3 \frac{l_s}{l_a}}{1 + 3 \frac{l_s}{l_a}} \quad \text{odnosno} \quad q_a = q \left(1 - \frac{3 \frac{l_s}{l_a}}{1 + 3 \frac{l_s}{l_a}} \right) \quad (1)$$

Osim izrazito inženjerske radoznalosti kao motiva da se istraže mogućnosti sprezanja čeličnih i aluminijskih elemenata pri formiranju nosača u građevinskim konstrukcijama, mora se reći da bi tehnički učinkovito rješenje vjerojatno imalo i značajne ekonomske prednosti iz više razloga. Zbog metalurških (ekstruzija), fizikalno-mehaničkih (otpornost na koroziju i mala specifična težina) i estetskih (eloksiranje) značajki, aluminijske legure su se i nametnule kao dominantan materijal kod specifičnih konstrukcija kao što su, između ostalog, fasadni sustavi. U slučaju nosača, odnosno elemenata pretežno izloženih savijanju, međutim, značajan nedostatak aluminijskih legura predstavlja mali modul elastičnosti i , u kombinaciji s tim, tehnološka ograničenja u pogledu dimenzija ekstrudiranih profila koje su ograničene kapacitetima preša za ekstruziju. Posljedica je toga da je pri projektiranju poprečnih presjeka, odnosno pri dimenzioniranju nosača najčešće mjerodavna deformacija, odnosno da često nije moguće projektirati optimizirane profile. Iako se u ovom radu ne razmatraju ekonomski aspekti, izgledno je da bi nosači u spregnutoj kombinaciji aluminijske legure i čelika mogli biti ekonomski opravdani s obzirom na to što je cijena po jedinici mase profila od aluminijskih legura oko pet do sedam puta veća od čeličnih.

Interesantno je da situacije s kombiniranjem nosača od aluminijskih legura i čelika, koje su očigledno česte u praksi, zapravo nisu regulirane suvremenim propisima. Štoviše, iz konačne verzije aktualnih propisa za aluminijske konstrukcije, tj. iz norme EN 1999-1-1:2007+A1 [11], izbačeni su dijelovi koji su se ticali ove problematike, a koji su postojali u prethodnim verzijama iste norme [12, 13] i bili osnova za relativno česte nepotpuno dokumentirane primjene u praksi.

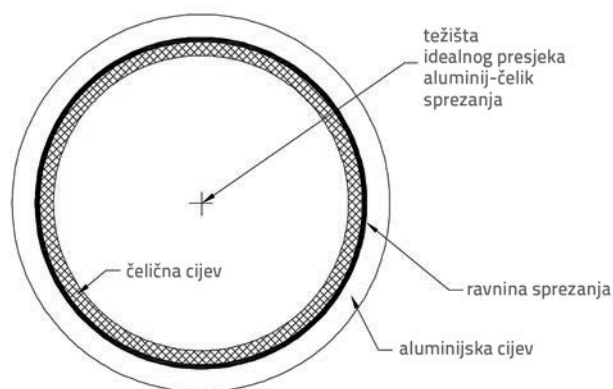
3. Utjecaj temperaturne promjene

U klasičnoj teoriji spregnutih nosača, razvijenoj za potrebe sprezanja betona i čelika, utjecaj temperaturne promjene se zanemaruje budući da materijali zbog kojih je ta teorija inicijalno razvijana, beton i čelik, imaju gotovo isti koeficijent termičkog širenja. U slučaju kombinacije aluminij-čelik imamo jednu od najvećih razlika u vrijednostima koeficijenata termičkog širenja među materijalima pogodnim za inženjerske konstrukcije uopće. Koeficijent termičkog širenja u slučaju aluminija i aluminijskih legura, koji prema [11] iznosi $\alpha_a = 2,3 \cdot 10^{-5} \text{ } 1/^{\circ}\text{C}$, gotovo je dvostruko veći nego, prema [14], kod čelika, $\alpha_s = 1,2 \cdot 10^{-5} \text{ } 1/^{\circ}\text{C}$. Ta činjenica se ne može zanemariti prilikom bilo kakvih istraživanja na temu spregnutih ili kompozitnih konstrukcija dobivenih kombinacijom tih dvaju materijala, iako se u gotovo svim radovima koji su citirani u uvodu baš to čini.

U radu je provedena kratka analiza ponašanja spregnutog

elementa formiranog od aluminijskih i čeličnih dijelova iz aspekta temperaturne promjene, djelomično preuzeta iz literature [7] i dopunjena nekim originalnim analizama autora koje omogućavaju izvođenje određenih zaključaka koji će se koristiti pri definiranju problema tijekom daljnjih istraživanja.

Analizira se spregnuti štap od aluminijskog i čeličnog profila čija se pojedinačna težišta i ukupno težište presjeka poklapaju međusobno kao i s težištem ravnine sprezanja. Idealiziran primjer takvog slučaja prikazan je na slici 3. Za taj slučaj, teorijski, sprezanje po dužini nije važno već su samo važni granični uvjeti na krajevima štapa koji moraju biti takvi da krajnji presjeci moraju dilatirati istovjetno. Štap nije opterećen vanjskim utjecajima već samo temperaturnoj promjeni.



Slika 3. Idealiziran štap simetrično kruto spregnutog presjeka od aluminija i čelika

Jasno je da će se tijekom primjerice zagrijavanja kruto spregnuti štap izdužiti. Pri tome je jasno da se, s obzirom na ostvareno kruto sprezanje, aluminijski i čelični dio moraju izdužiti za istu veličinu. Aluminijski dio štapa ima tendenciju da se izduži više od čeličnog, ali je na neki način ograničen odnosno pritisnut čeličnim dijelom presjeka, i obrnuto, čelični dio presjeka ima tendenciju da se izduži manje od aluminijskog ali, s obzirom na to da izduženja moraju biti ista, aluminijski profil ga izlaže dodatnom vlaklu. Pri tome, uslijed zagrijavanja dolazi do određenih tlačnih naprezanja u aluminijskom dijelu spregnutog presjeka, odnosno do odgovarajućih vlačnih naprezanja u čeličnom dijelu spregnutog presjeka. Prilikom hlađenja situacija je, naravno, obrnuta. Kako na štap ne djeluju vanjske sile, jasno je da tlačna sila u aluminijskom dijelu presjeka i vlačna sila u čeličnom dijelu presjeka moraju biti u ravnoteži, odnosno istog intenziteta i suprotnog predznaka. Izjednačavanjem izraza za neovisna izduženja aluminijskog odnosno čeličnog dijela spregnutog presjeka i iz ravnoteže sila koje djeluju na spregnuti štap može se analitičkim putem odrediti konačna relativna deformacija (ϵ_r) idealnog spregnutog štapa uslijed temperaturne promjene (ΔT) kao i naponi koji se pri tome javljaju u aluminijskom (σ_a), odnosno čeličnom (σ_s) dijelu spregnutog presjeka. Odgovarajući izrazi, preuzeti iz [7], i prilagođeni matematičkim transformacijama, dani su jednadžbama (2):

$$\varepsilon_i = \Delta T_u \frac{\alpha_a A_a E_a + \alpha_s A_s E_s}{A_a E_a + A_s E_s}$$

$$\sigma_a = \Delta T_u (\alpha_a - \alpha_s) \frac{E_a A_s E_s}{A_a E_a + A_s E_s} \quad (2)$$

$$\sigma_s = \Delta T_u (\alpha_s - \alpha_a) \frac{E_s A_a E_a}{A_a E_a + A_s E_s}$$

Kad se moduli elastičnosti i koeficijenti termičkog širenja aluminijevske legure i čelika razmatraju kao konstante, matematičkim se transformacijama može doći do jednadžbi (3). Na osnovi tih jednadžbi može se odrediti imaginarni koeficijent termičkog širenja idealnog presjeka (α) kao i temperaturnim utjecajima stvorena naprezanja u komponentnim dijelovima presjeka u oblicima pogodnim za parametarsku analizu u funkciji odnosa površina presjeka čelika (A_s) i aluminijevske legure (A_a), odnosno jedine varijable koja je stvar izbora pri projektiranju, A_s/A_a . U izrazima prikazanim jednadžbom (3) naprezanja i temperaturna promjena razmatrane su s apsolutnim vrijednostima.

$$\alpha_i = \frac{\alpha_a A_a E_a + \alpha_s A_s E_s}{A_a E_a + A_s E_s} = \alpha_a \left(\frac{1 + 1,565 \frac{A_s}{A_a}}{1 + 3 \frac{A_s}{A_a}} \right)$$

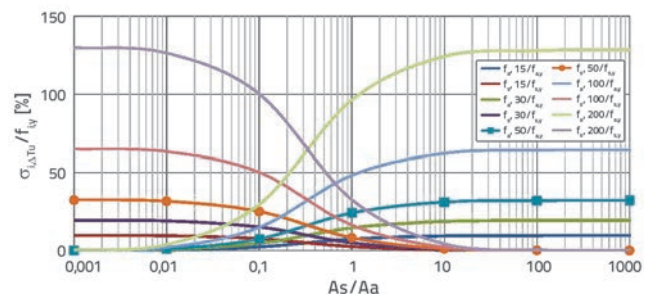
$$|\sigma_a| = 2,31 \cdot |\Delta T_u| \frac{\frac{A_s}{A_a}}{1 + 3 \frac{A_s}{A_a}} \quad [\text{MPa}] \quad (3)$$

$$|\sigma_s| = 2,31 \cdot |\Delta T_u| \frac{1}{1 + 3 \frac{A_s}{A_a}} \quad [\text{MPa}]$$

Navedeni izrazi omogućavaju pogodnu parametarsku analizu i predstavljaju i izvorni doprinos teoriji spregnutih nosača uopće. Taj je zaključak izveden poslije sveobuhvatnog istraživanja raspoložive literature, ne samo u području spreznja odnosno kombiniranja aluminija i čelika nego i spreznja dvaju različitih materijala uopće.

Analizira se najčešća aluminijevska legura za fasadne konstrukcije, **6060-T5** za $t \leq 5$ mm s konvencionalnom granicom popuštanja $f_{oy} = f_o = 120$ MPa i čelik **S355** s granicom popuštanja $f_{sy} = f_y = 355$ MPa. Parametar ΔT_u se mijenja s vrijednostima uobičajenim kod građevinskih konstrukcija. Te vrijednosti su približno ± 15 °C za konstrukcije unutar termoizoliranog prostora, ± 30 °C za konstrukcije na otvorenom i ± 50 °C kao najčešći, prema mišljenju autora pretjerano oštar, zahtjev za fasadne konstrukcije. Međutim, iz teorijskih razloga i za vrijednosti ± 100 °C i ± 200 °C, s obzirom na to da se za njih već ulazi u problematiku ponašanja pri visokim temperaturama, što izlazi iz okvira ovih istraživanja. Varijabla, A_s/A_a , realno

može biti u opsegu $A_s/A_a = 0,1$ do $0,8$. Može se pokazati da za manje vrijednosti vjerojatno nastaje problem izvodljivosti, a za veće vrijednosti to, nekako, prestaje biti ojačani aluminijevski profil i postaje ojačani čelični profil. Iz posve teorijskih razloga usvojen je opseg $A_s/A_a = 0,001$ do **1000**. S tako izabranim parametrima i opsegom varijable, koristeći jednadžbe (3), na slici 4. su u logaritamskom mjerilu prikazani dijagrami relativnih naprezanja $\sigma_{i,\Delta T_u} / f_{iy}$ u funkciji varijable A_s/A_a s idejom da se na konkretnom primjeru razmotri koliki dio nosivosti približno okupira jednolika temperaturna promjena, ΔT_u , kod spregnutih elemenata sastavljenih od termički raznorodnih komponentnih materijala.

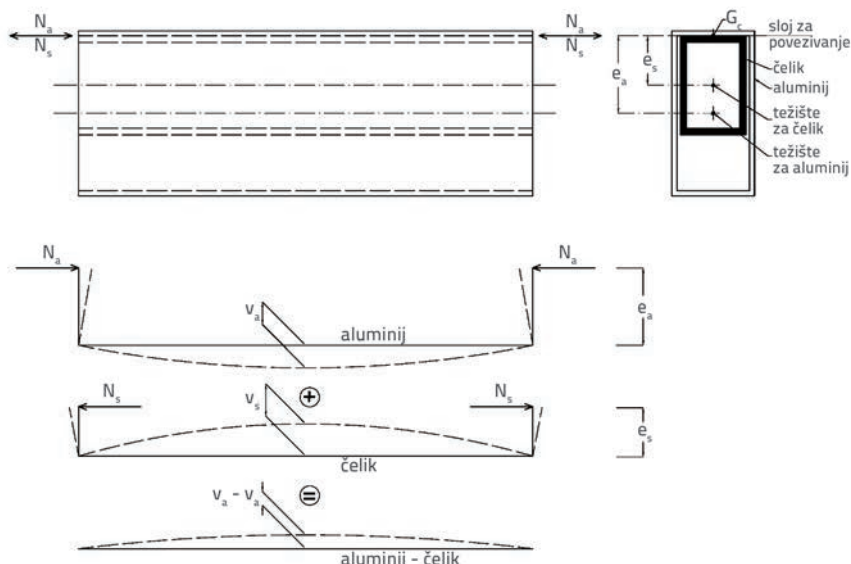


Slika 4. Relativna naprezanja u komponentnim dijelovima spregnutog presjeka za razne jednolike temperaturne promjene u funkciji odnosa površina za kombinaciju materijala 6060-T5-t ≤ 5/ S355

Ako se usporede analogni dijagrami u kombinaciji s čelikom S235, može se pokazati da je čelik S355 bolji izbor onda kad je mjerodavna nosivost, jer je tada odnos f_{sy}/f_{oy} blizak odnosu E_s/E_o pa su uravnoteženiji stupnjevi kompromitiranja nosivosti materijala uslijed temperaturne promjene. To međutim, ne mora vrijediti onda kad je mjerodavna deformacija, što je u primjenama koje su inicirale ovo istraživanje najčešći slučaj jer su tada nosivosti neiskorištene.

Iz dijagrama na slici 4., odnosno iz izraza u jednadžbi (3), može se između ostaloga izvesti zanimljiv zaključak. Naime, za svaki par spregnutih materijala s različitim koeficijentima termičkog širenja i za konkretnu temperaturnu promjenu postoji granična vrijednost kojoj teže temperaturnom promjenom izazvana naprezanja u funkciji odnosa površina presjeka komponentnih materijala. Na osnovi dijagrama se, između ostalog, može izvesti i zaključak da za konkretan par materijala, aluminijevsku leguru 6060-T6 i čelik S355 te za u građevinarstvu uobičajene temperaturne promjene $\Delta T = \pm 15$ do 50 °C ni teorijski ne može doći do iscrpljenja ni jednog od komponentnih materijala ni u jednom slučaju.

U analiziranom slučaju utjecaji izazvani temperaturnim promjenama za u građevinarstvu uobičajene vrijednosti, $\Delta T_u = \pm 15$ do 50 °C, su prihvatljivi. Utjecaji uslijed temperaturnih promjena, izraženi relativno u odnosu na granice popuštanja komponentnih materijala, u rasponu su od 10 % do 30 %. U realno ostvarivom opsegu odnosa površina presjeka komponentnih materijala u presjeku, $A_s/A_a = 0,1$ do $0,8$, taj je



Slika 5. Deformacija nesimetrično spregnutog štapa uslijed temperaturne promjene

raspon i manji, oko 3 % do 25 %. Ovaj zaključak nagovještava da je uspješna primjena sprezanja između aluminija i čelika moguća. Dovoljno je da doprinos na ciljanim svojstvima koja se žele postići sprezanjem bude znatno veći od 25 % u usporedbi s ekvivalentnim karakteristikama osnovnog nosača koji se ojačava. U analiziranim primjenama ciljano svojstvo za ojačavanje je, kao što je već napomenuto, krutost odnosno deformacija nosača, pa je, zahvaljujući trostruko većem modulu elastičnosti kod čelika u odnosu na aluminijevu leguru, realno očekivati doprinose značajno veće od nedostataka uslijed različitih koeficijenata termičkog širenja. Može se uočiti da je intenzitet para uzdužnih sila suprotnog predznaka generiranih temperaturnom promjenom u komponentnim materijalima spregnutog presjeka zapravo poznata veličina za usvojene površine komponentnih materijala i može se izraziti u obliku prikazanom jednadžbom (4) koja je izvedena iz jednadžbe (3) za naprezanje u aluminijevom dijelu presjeka, [1].

$$|N_s| = |N_a| = |\sigma_a| A_a = 0,231 \cdot A_a \Delta T \alpha \frac{A_s}{1 + 3 \frac{A_s}{A_a}} \text{ [kN]}, \quad A_a \text{ u cm}^2 \quad (4)$$

Treba imati na umu da se točka unosa uzdužne sile u spregnutim materijalima, koje su suprotnog predznaka odnosno međusobno u ravnoteži, nalazi u težištu ravnine sprezanja presjeka na krajevima štapa. Ako se težište sprezanja ne poklapa s pojedinačnim težištima spregnutih materijala, odnosno s težištem idealnog presjeka, onda temperaturna promjena izaziva i savijanje koje, u općem slučaju, utječe i na nosivost i na deformaciju. Teorijski ovi utjecaji mogu biti eliminirani samo ako su pojedinačna težišta komponentnih materijala s iste strane težišta sprezanja i ako je ispunjen uvjet da su pojedinačni ekscentriciteti težišta komponentnih dijelova spregnutog

presjeka u odnosu na težište sprezanja proporcionalni krutostima, odnosno kada je $e_a / (E_a I_a) = e_s / (E_s I_s)$, što je u praksi teško izvodljivo. U svim ostalim slučajevima temperaturna promjena na vanjskim silama neopterećenom štapa izaziva, osim aksijalnog naprezanja, i savijanje, odnosno uzrokuje deformaciju štapa.

Na slici 5. su objašnjeni prethodni navodi kroz grafički prikaz imaginarnih komponentnih i stvarno ostvarenih deformacija na primjeru nesimetrično spregnutog nosača od aluminija i čelika. Slika sadrži i tumačenja uvedenih oznaka za pojedinačne ekscentricitete komponentnih dijelova spregnutog presjeka. Slična analogija se može primijeniti i za prikaz momenta savijanja odnosno stanja naprezanja. S iste slike se može uočiti i to da bi nesimetrično

sprezanje, kad su pojedinačna težišta komponentnih materijala sa suprotnih strana težišta sprezanja, uvijek dovelo do situacije da se tendencije deformacija komponentnih materijala uslijed temperaturnom promjenom stvorenih utjecaja zbrajaju, odnosno da takva rješenja ojačanja ne mogu tehnički biti prihvatljiva.

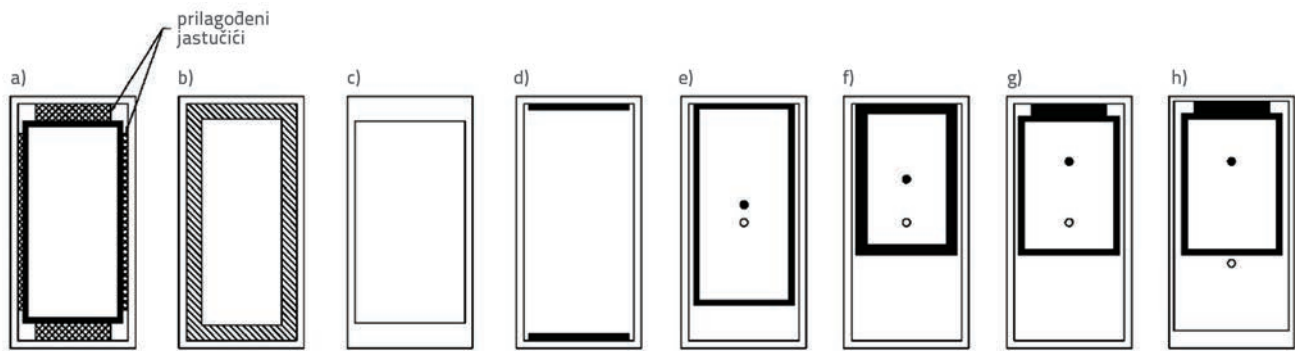
4. Mogućnosti ojačanja nosača od aluminijevih legura elementima od čelika

Teorijski je pokazano da su nedostaci uslijed različitih koeficijenata termičkog širenja analiziranog para materijala takvog reda veličine da bi sprezanje tih dvaju materijala imalo najviše smisla ako je simetrično, ako se realizira s malim odnosom A_s/A_a i ako se sprezanjem na ciljanim svojstvima ostvaruje poboljšanje znatno veće od 25 %.

Kao mogućnosti za ojačanje nosača od aluminijevih legura elementima od čelika analitički su istražena rješenja prikazana na slici 6. U rješenja koja su istraživana uključena su, radi usporedbe, i rješenje s umetanjem čelične kutije bez sprezanja, rješenje s umetanjem aluminijevske kutije bez sprezanja te rješenje s posebno projektiranim profilom od aluminijevske legure iste visine.

Slučaj (a) sa slike 6. je simulacija rješenja sa slike 2., bez sprezanja, gdje se u praksi po dužini mjestimično lijepe podmetači koji, uz to što služe za prijanjanje, odnosno osiguranje istovjetnosti deformacija, imaju i funkciju odvajanja čelika i aluminija radi sprječavanja kontaktne korozije. Slučaj (b) je slično rješenje s umetanjem dodatnog profila od aluminijevske legure bez sprezanja. I to se rješenje susreće u praksi, samo što su to uvijek namjenski profili koji nisu iz standardnog asortimana. Slučaj (c) je namjenski projektiran jači profil od aluminijevske legure, što je također izvodljivo ali zahtijeva izradu alata za ekstruziju.

Slučaj (d) je u ovom radu predloženo rješenje sa simetrično spregnutim čeličnim elementima u idealiziranom obliku.



Slika 6. Analizirani načini ojačanja

Slučajevi (e)-(h) su dani kao ilustracija drugih rješenja koja su analitički analizirana i odbačena.

Slučaj (e) je rješenje sa sprezanjem umetnutog čeličnog profila iz standardnog asortimana, pri čemu se pretpostavlja da je kontrolirano sprezanje zapravo izvodljivo samo s jedne strane. Kod ovog slučaja je uočljiv zanemariv doprinos u odnosu na slučaj (a), koji je standardno rješenje iz prakse, bez sprezanja. To je očekivano zato što uslijed malih razmaka težišta komponentnih dijelova presjeka položajni momenti tromosti vrlo malo pridonose momentu tromosti idealnog presjeka.

Da bi se ublažio spomenuti nedostatak, pokušno su ispitani sljedeći slučajevi: slučaj (f) gdje je udio položajnih momenata tromosti u momentu tromosti idealnog presjeka namjenski povećan pomicanjem težišta čeličnog dijela presjeka usvajajući standardni čelični profil manje visine i debljih stijenki, slučaj (g) gdje je dodatno pomicanje težišta čeličnog dijela presjeka

izvedeno zavarivanjem plosnatog čelika po gornjoj strani standardnog čeličnog profila, i slučaj (h) gdje je to izvedeno pomicanjem, u suprotnim smjerovima, težišta obaju profila. U slučaju (h), kao i u slučaju (c), potrebno je izraditi poseban alat za ekstruziju.

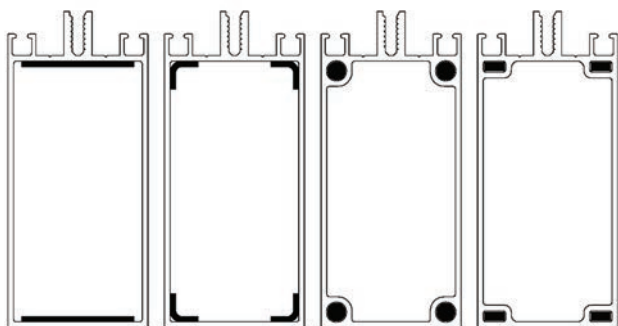
Kod svih slučajeva, a u skladu s očekivanjima da je mjerodavna deformacija, odnosno progib nosača, ciljana karakteristika idealnog presjeka bila je postizanje najmanje dvostrukog momenta tromosti u odnosu na profil koji se ojačava. Iz karakteristika presjeka sa slike 6., prikazanih u tablici 1., može se uočiti da se sprezanjem čeličnih ojačanja u obliku umetnutih profila s osnovnim profilom od aluminijske legure ne mogu značajno povećati ciljana svojstva u odnosu na odgovarajuća rješenja bez sprezanja. U razmatranim slučajevima to je oko 15 %, i to za slučaj (h) sa slike 6. koji je i s gledišta izvodljivosti najnepovoljniji. Puno više od toga se ni teorijski ne može postići

Tablica 1. Karakteristike poprečnih presjeka sa slike 6.

		(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)	(g)	(h)	
Idealni poprečni presjek s obzirom na aluminijski profil	A_i [cm ²]	22,6	19,0	14,8	14,6	22,6	30,7	24,5	22,9	
	I_i [cm ⁴]	229,0	225,8	228,9	237,7	231,6	233,6	228,9	230,3	
	$W_{i,el,min}$ [cm ³]	45,8	45,2	45,8	47,6	42,6	37,5	36,0	38,1	
	$W_{i,pl}$ [cm ³]	63,8	58,4	54,6	55,2	63,9	72,3	65,2	63,0	
	z_{max} [cm]	5,00	5,00	5,00	5,00	4,57	3,78	3,64	4,00	
	z_{min} [cm]	5,00	5,00	5,00	5,00	5,43	6,22	6,36	6,00	
	A_s/A_a				0,233	0,535	0,860	0,616	0,616	
Komponente poprečnog presjeka	Aluminij	A_a [cm ²]	8,6	8,6		8,6	8,6	8,6	8,6	8,6
		I_a [cm ⁴]	112,1	112,1		112,1	112,1	112,1	112,1	106,7
		$W_{a,el,min}$ [cm ³]	22,4	22,4		22,4	22,4	22,4	22,4	18,7
		$W_{a,pl}$ [cm ³]	27,8	27,8		27,8	27,8	27,8	27,8	24,6
	Čelik (Aluminij)	A_s [cm ²]	4,6	(10,4)		2,0	4,6	7,4	5,3	5,3
		I_s [cm ⁴]	39,0	(113,7)		41,9	39,0	34,5	30,7	30,7
		$W_{s,el,min}$ [cm ³]	9,7	(24,2)		8,9	9,7	11,5	8,1	8,1
		$W_{s,pl}$ [cm ³]	10,8	(29,8)		9,1	10,8	14,7	11,3	11,3

Novouvedene oznake su elastični i plastični momenti otpora idealnog, aluminijskog odnosno čeličnog dijela presjeka: $W_{i,el}/W_{a,el}/W_{s,el}$ i $W_{i,pl}/W_{a,pl}/W_{s,pl}$

zbog raspoloživog prostora u unutrašnjosti osnovnog profila od aluminijske legure. Pri tome se, zbog značajnih vrijednosti odnosa A_s/A_o i ekscentričnog sprezanja, znatan dio ovog doprinosa poništava uslijed djelovanja temperaturne promjene. Može se izvesti zaključak da poboljšanje standardnih rješenja iz prakse, koja su osmišljena bez sprezanja, na način da se takva rješenja kontrolirano sprežu nije put kojim treba tražiti unaprjeđenje.



Slika 7. Neki prijedlozi profila s dispozicijama lijepljenih ojačanja od čelika

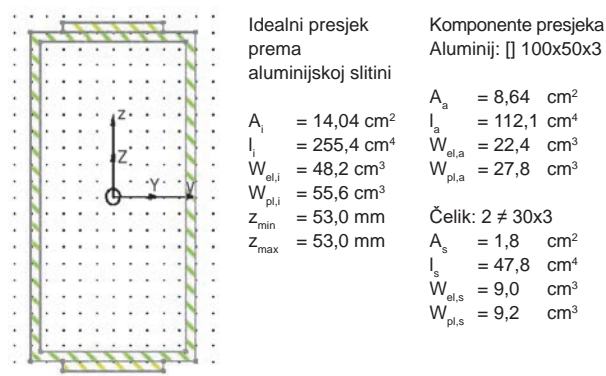
S druge strane može se pokazati da je optimalno rješenje, po većini kriterija, predloženo rješenje (d) sa slike 6. Po kriteriju količine i cijene dodatnog materijala to je očigledno i na slici 6., odnosno u tablici 1. Po kriteriju utjecaja temperature također je najpovoljnije jer je odnos A_s/A_o najmanji a sprezanje je ostvareno centralno pa se učinci temperature svode samo na generiranu uzdužnu silu odnosno temperatura ne utječe na progibe za koje se očekuje da su mjerodavni kriterij u analiziranim primjenama. Nedostatak predloženog rješenja je svakako rad potreban za ostvarenje sprezanja. Kao pogodan sustav za sprezanje očito je lijepljenje strukturnim ljepilima. Spajanje samonarezujućim vijcima također je tehnički prihvatljivo i prema aktualnim normama, odnosno istraživanjima prikazanim u [15]. Dovoljno je vezu ostvariti na ~10 do 15 cm po dužini nosača. U analiziranim primjenama kod aluminijskih fasada je, međutim, najvjerojatnije neprihvatljivo da glava vijka bude vidljiva s unutrašnje strane. Lijepljenje je očito pogodno i zbog fizičkog odvajanja čelika i aluminijske legure, što je povoljno s gledišta eliminiranja kontaktne korozije. Također je i aktualna norma za konstrukcije od aluminijskih legura [11] među rijetkima koja sadrži i smjernice za primjenu strukturnih ljepila. Naravno, treba osmisliti način da se lijepljenje izvede s unutrašnje strane kutijastog osnovnog profila. Iz konzultacija s proizvođačima se može zaključiti da ovo nije nesavladiv problem ali više pripada domeni patenata i, svakako, predstavlja zanatski izazov. Neke inicijalne ideje su prikazane na slici 7.

5. Primjer za analizu i pokusno ispitivanje

Kao primjer za analizu i pokusno ispitivanje na jednom uzorku za verifikaciju analize ponašanja odabran je prilagođen slučaj (d) sa slike 6. Ojačanja od čelika su predviđena za lijepljenje s vanjske

strane profila od aluminijske legure. Tako se postupilo radi pristupačnosti za lijepljenje i postavljanje mjernih traka prilikom pokusnog ispitivanja, ali i zbog neracionalnosti da se u ovoj fazi istraživanja bavi tehničkim aspektima lijepljenja s unutrašnje strane osnovnog profila. Poprečni presjek odabranog slučaja s osnovnim geometrijskim veličinama, uz zanemarenje debljine ljepila, prikazan je na slici 8.

Da bi se simulirala najčešća situacija u praksi, kada je za dimenzioniranje mjerodavna deformacija nosača, i radi učinkovitog iskorištenja profila koji su nabavljeni u dužinama od 6,0 m, raspon je usvojen s 2,8 m. Statička shema je prikazana na slici 9., zajedno s izometrijskim prikazom dispozicije pokusnog uzorka i fotografijom dostignutog loma po kriteriju pomaka (progiba).



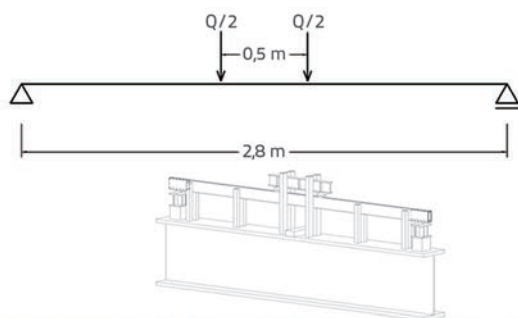
Slika 8. Geometrijske karakteristike poprečnog presjeka za primjer i pokusno ispitivanje

Za ogledni primjer je korišten materijal koji je bio raspoloživ na tržištu, aluminijska legura **6060-T66** koja prema [11], za debljine $t \leq 5 \text{ mm}$, ima tehničku granicu popuštanja $f_{ay} = f_o = 160 \text{ MPa}$, vlačnu čvrstoću $f_{au} = 215 \text{ MPa}$ i izduženje pri lomu od $\epsilon_o = 8 \%$ i čelik **S235**, prema [14], s granicom popuštanja $f_{sy} = 235 \text{ MPa}$, vlačnom čvrstoćom $f_{su} = 360 \text{ MPa}$ i izduženjem pri lomu od $\epsilon_o = 15 \%$. Primjer je osmišljen tako da lokalna i opća stabilnost, smicanje po rebru kutije od aluminijske legure i smicanje u sloju ljepila nisu značajni, odnosno da su procijenjena iskorištenja po ovim kriterijima dovoljno mala da se u daljnjim razmatranjima mogu zanemariti. Na taj je način naglasak stavljen na analizu krutosti nosača i nosivosti presjeka.

Lijepljenje je izvedeno dvokomponentnim strukturnim ljepilom "Adesilex PG1" proizvođača "MAPEI", u svemu prema uputama proizvođača. Tehnički list ljepila deklarira čvrstoću na smicanje, što je najznačajnije svojstvo u ovdje osmišljenim primjenama, u iznosu $> 35 \text{ MPa}$ za temperature do $50 \text{ }^\circ\text{C}$, odnosno $> 25 \text{ MPa}$ na temperaturi od $70 \text{ }^\circ\text{C}$. Teorijsko naprezanje smicanja u sloju ljepila pri očekivanim opterećenjima pri lomu uzorka iznosi oko $1,0 \text{ MPa}$, ili $< 3 \%$ od deklarirane čvrstoće na smicanje ljepila. Ako se u obzir uzme preporučeni koeficijent sigurnosti za lijepljene spojeve iz norme u [11] ($\gamma_{Ma} = 3,0$), onda teorijsko naprezanje smicanja pri očekivanim opterećenjima uzorka iznosi $< 9 \%$

od propisima preporučene reducirane granične nosivosti lijepljenog spoja. Međutim, lijepljeni spoj svakako zaslužuje posebnu istraživačku pozornost. Uzorak za potvrdu teorijskog modela ponašanja spregnutog nosača osmišljen je tako da su iskorištenja lijepljenog spoja dovoljno mala da se mogu zanemariti, a ljepilo se čini pogodno kao sredstvo sprežanja jer osigurava stanje blisko idealnom (kontinuiran spregnuti spoj) koje je analizirano u teorijskom smislu. Alternativa je bila sprežanje samourežujućim vijcima, ali bi to bilo diskretno sprežanje koje odstupa od teorijskih pretpostavki od kojih se polazi u ovom istraživanju odnosno radu.

Potvrda pretpostavke da ponašanje lijepljenog spoja nema utjecaj na rezultate ispitivanja dobivena je rezultatima mjerenja relativnog pomaka zalijepljenih dijelova na krajevima nosača. Ova očitavanja su se tijekom samog ispitivanja zadržala ispod 1/100 dijela milimetra, a razlika između nultog očitavanja i očitavanja nakon rasterećenja je ispod 1/1000 dijela milimetra. To su vrijednosti na samoj granici rezolucije korištenih induktivnih mjerača pomaka (0,01 mm) a ispod njihove deklarativne točnosti (0,03 mm) i jasan su pokazatelj da čvrstoća smicanja sloja ljepila nije bila kritična pri dostizanju loma.

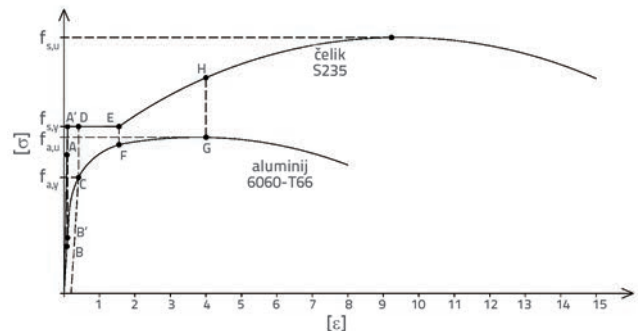


Slika 9. Statička shema uzorka, izometrija dispozicije ispitivanja i fotografija dostignutog loma po kriteriju pomaka (progiba)

5.1. Analitička procjena nosivosti spregnutog presjeka

Za praktične primjene svakako je nužno proračunski odrediti granično stanje uporabljivosti (SLS) spregnutog nosača, odnosno granično stanje nosivosti spregnutog presjeka (ULS). U tu svrhu primijenjeni su idealizirani usporedni dijagrami naprezanje-deformacija komponentnih materijala prikazani na slici 10. Usporedno su prikazane karakteristične vrijednosti i pojednostavljeni oblici $\sigma - \varepsilon$ dijagrama za primijenjenu

aluminijevsku leguru osnovnog profila i čelični materijal ojačanja spregnutog nosača dani su prema aktualnim propisima za odnosne materijale, [11, 14].



Slika 10. Usporedni $\sigma - \varepsilon$ dijagrami zajedničkog vlakna spregnutih materijala

Prilikom proračuna graničnog stanja uporabljivosti (SLS) mogu se primijeniti geometrijske karakteristike idealiziranog poprečnog presjeka spregnutog nosača. Na taj se način za uobičajene dopuštene progibe od $l/200 = 1,4$ cm dostizanje SLS-a u analiziranom primjeru može odrediti iz elementarnih izraza statike konstrukcija, pri čemu stanja naprezanja ostaju ispod granice proporcionalnosti obaju materijala. Uz navedene pretpostavke granično stanje uporabljivosti, za razmatrani slučaj, dostiže se pri sili od $Q = 2 \times 2,87 = 5,74$ kN. Usporedbe radi, proračunski dobiveno opterećenje pri dostizanju graničnog stanja uporabljivosti, za istu razinu dopuštenog progiba, u slučaju samostalnog profila od aluminijevske legure iznosi 2,52 kN. To potvrđuje da se predloženim ojačanjem za ciljani odgovor konstrukcije, krutost, odnosno dostizanje graničnog stanja uporabljivosti (SLS), dobije poboljšanje za približno 128 %. To poboljšanje je proporcionalno odnosu momenta tromosti idealiziranog spregnutog presjeka svedenog na karakteristike aluminijevske legure i momenta tromosti samostalno promatranog profila od aluminijevske legure sa slike 8. Pri tome su naprezanja kod čelika na ~90 % granice popuštanja čelika, a kod aluminijevske legure na ~40 % od tehničke granice popuštanja legure.

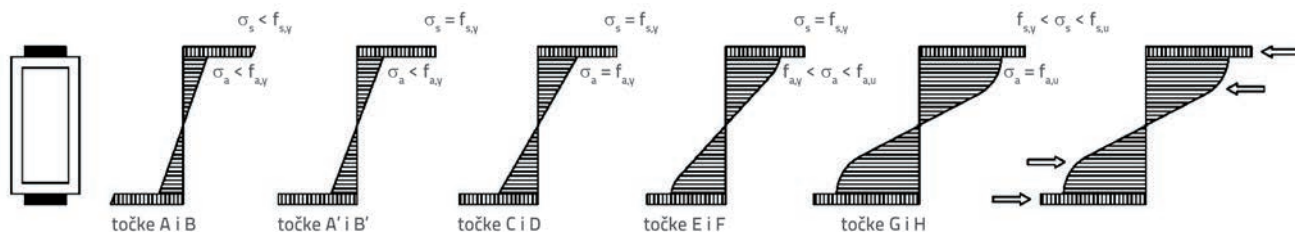
Pri procjeni graničnog stanja nosivosti (ULS) problem postaje složeniji i ne vidi se način da se, u općem slučaju, na dovoljno točan način primijene karakteristike idealiziranog presjeka. Promatrajući sam spoj čelika i aluminija, uz njegovu potpunu idealizaciju, jasno je da vlakna u oba materijala u spoju, gdje su maksimalna naprezanja u aluminijevskoj leguri i približno maksimalna naprezanja u čeličnom ojačanju, moraju imati ista izduženja za sve razine apliciranog opterećenja. Isto tako, izrazito različita izduženja pri lomu kod dva spregnuta materijala, što se može uočiti sa slike 10., u kombinaciji s kvalitativno bitno različitim oblicima $\sigma - \varepsilon$ dijagrama kod ta dva materijala, jasno upućuju na nemogućnost loma po čeliku, odnosno do loma spregnutog presjeka mora doći pri lomu osnovnog profila od aluminijevske legure. Dalje, čelik ima izraženu granicu popuštanja,

a aluminijska legura nema, što je također vidljivo na slici 10., pa ova činjenica pokazuje da će, bar u ovako usvojenoj dispoziciji ojačanja, u čeliku doći najmanje do pune plastifikacije presjeka prije nego što dođe do loma po aluminijskoj leguri, odnosno do loma spregnutog presjeka u cjelini.

Sa slike 10. se vidi da se, bar za analizirani slučaj i za zajedničko vlakno spregnutih materijala, dostizanje graničnog stanja uporabljivosti (SLS) može očekivati pri naprezanjima koja ostaju u elastičnom području čelika (točka A) i aluminijske legure (točka B). Daljnjim povećanjem opterećenja do dostizanja granice popuštanja najprije će doći u čeliku (točka A'), pri čemu će naprezanja u aluminijskoj leguri dostići neko naprezanje (točka B') ispod tehničke granice popuštanja. S daljnjim povećanjem opterećenja u aluminijskoj leguri se dostiže tehnička granica popuštanja (točka C) dok kod čelika dolazi do plastifikacije presjeka - napon u čeliku se ne povećava s izduženjem - točka D. Naposljetku, samo teorijski, budući da se pri tim izduženjima može očekivati neprihvatljivo velika deformacija nosača u analiziranoj dispoziciji, daljnjim povećanjem opterećenja iscrpljuje se "područje plastičnosti" čelika (točka E), pri čemu napon u aluminiju prelazi tehničku granicu popuštanja ali je još ispod vlačne čvrstoće (točka F). I na kraju, opet samo teorijski iz već spomenutog razloga, daljnjim povećanjem opterećenja naprezanja dostižu vlačnu čvrstoću u aluminijskoj leguri (točka G), pri čemu naprezanje u čeliku ulazi u zonu postplatičnog "ojačanja" ali ne dostiže vlačnu čvrstoću čelika (točka H), niti je teorijski može dostići prije loma po aluminijskoj leguri jer je izduženje pri lomu čelika približno dvostruko veće od izduženja pri lomu aluminijske legure. Aktualne norme za čelične [14] i aluminijske [11] konstrukcije, međutim, ne uzimaju u obzir postplastično ponašanje materijala pri proračunu nosivosti presjeka odnosno štapova, osim u slučajevima s neto presjekom, čega u analiziranom slučaju nema, pa se i prijedlog za proračunsko određivanje (ULS) spregnutog presjeka zadržava na plastičnom momentu nosivosti čeličnog dijela presjeka, što je svakako na strani sigurnosti. Pokušaj da se analitički predvidi prirast normalnog naprezanja u poprečnom presjeku, za karakteristične međufaze sa slike 10., prikazan je na slici 11. Treba, međutim, imati na umu da su aluminijske legure široka lepeza materijala i da bi kod najjačih legura u kombinaciji sa čelikom S235 dijagrami analogni slici 10. imali križanja, što može komplicirati primijenjen način analize. Ovaj problem se, po potrebi, jednostavno eliminira primjenom jačeg čelika, na primjer S355, pri čemu dijagrami sa slike 10 kvalitativno ostaju

u istim međusobnim odnosima i za najjače aluminijske legure. U propisima i literaturi, gdje se uopće i navodi (na primjer u [7, 12, 13]), kao metoda analize kombiniranih (hibridnih) odnosno spregnutih elemenata od aluminijskih i čeličnih dijelova kao moguća metoda proračuna nosivosti navodi se postupak po kojem bi se svaki od komponentnih materijala odnosno odgovarajući profili analizirali za pripadajuće utjecaje prema propisima koji vrijede za odnosni materijal. Zasižno će se slična logika morati primijeniti i u slučaju proračuna analiziranog primjera spregnutog presjeka od aluminijske legure i čelika pri analizi graničnog stanja nosivosti (ULS) gdje se, za sada, jednostavno ne vidi mogućnost da se do loma promatra idealiziran presjek s realnim uzimanjem u obzir kvalitativno i kvantitativno bitno različitih $\sigma - \varepsilon$ dijagrama dvaju spregnutih materijala. Zato se kao pogodan proračunski model za nosivost spregnutog presjeka nosača, u skladu s prethodnom analitikom, odnosno dijagramima naprezanja sa slike 11., smatra zbroj nosivosti dijelova spregnutog presjeka po materijalima. Naime, pokazano je da će čelični dio presjeka dostići punu plastifikaciju relativno rano, kada su naprezanja u aluminijskom dijelu dosta ispod tehničke granice popuštanja, i da će ta puna plastifikacija pri daljnjem prirastu opterećenja biti konstantna, najmanje do dostizanja granične nosivosti aluminijskog dijela spregnutog presjeka.

Moment nosivosti dijela presjeka od aluminijske legure se može odrediti prema aktualnoj normi [11] i on iznosi $M_{a,Rd} = 4,04$ kNm (legura klase A, poprečni presjek klase 2, $a = W_{pl}/W_{el} = 1,24$, $\gamma_{M1} = 1,10$). Kada se taj moment nosivosti prebaci u opterećenje prema dispoziciji sa slike 9., dostizanje graničnog stanja nosivosti (ULS) aluminijskog profila može se očekivati pri silama od $Q_a = 2 \cdot 3,51 = 7,02$ kN. Moment nosivosti čeličnog ojačanja, kada se promatra kao samostalni presjek, može se odrediti prema aktualnoj normi [14] i iznosi $M_{s,Rd} = 2,16$ kNm (čelik S235, poprečni presjek klase 1, $\gamma_{M0} = 1,0$). Prebačen u silu prema dispoziciji sa slike 9., taj moment nosivosti dostiže se pri sili $Q_s = 2 \cdot 1,88 = 3,76$ kN. Ovom metodologijom ukupni moment nosivosti, odnosno aplicirana sila, pri dostizanju (ULS) spregnutog presjeka se može procijeniti na $M_{Rd} = (4,04 + 2,16) = 6,20$ kNm, odnosno $Q = 2 \cdot (3,51 + 1,88) = 10,78$ kN, što predstavlja povećanje u odnosu na nosivost osnovnog aluminijskog profila koji se ojačava za približno 54 %.
Vezano za utjecaje temperaturne promjene na nosivost presjeka, odnosno na granično stanje nosivosti (ULS), može se provesti sljedeća analiza. Temperaturna promjena od primjerice



Slika 11. Normalna naprezanja u poprečnom presjeku za karakteristične točke $\sigma - \varepsilon$ dijagrama sa slike 10.

$\Delta T_u = \pm 30$ °C pri ekstremnim situacijama, u spregnutom nosaču analiziranog primjera, prema jednadžbi (4), generala bi silu $\pm N_a = \pm N_s = 7,5$ kN odnosno naprezanja u čeliku od $\pm \sigma_{s,\Delta T_u} = 41,7$ MPa, što je ~17,7 % granice popuštanja čelika, i aluminijevskoj leguri od $\pm \sigma_{a,\Delta T_u} = 8,9$ MPa, što je ~5,6 % tehničke granice popuštanja aluminijevske legure. Uz usvojene proračunske pretpostavke o nosivosti spregnutog presjeka, utjecaj temperaturne promjene može se, pri određivanju nosivosti presjeka, pojednostavljeno uzeti u obzir na način da se uvede reducirana granica popuštanja kod čelika ($f_{sy,red}$), odnosno reducirana tehnička granica popuštanja kod aluminijevske legure ($f_{ay,red}$) čime se odgovarajući, unaprijed poznati, opseg naprezanja jednostavno ostavlja rezerviran za utjecaje uslijed temperaturne promjene. Na prethodno opisan način dobije se za čelik $f_{sy,red} = 235 - 41,7 = 193,3$ MPa, odnosno za aluminijevsku leguru $f_{ay,red} = 160 - 8,9 = 151,1$ MPa, pa reducirani moment nosivosti spregnutog presjeka, odnosno odgovarajuća reducirana sila prema dispoziciji sa slike 9. postaju $M_{Rd,red} = (3,81 + 1,78) = 5,59$ kNm, odnosno $Q_{red} = 2 \cdot (3,31 + 1,55) = 9,72$ kN. Prethodna analiza pokazuje da utjecaj usvojene, realno moguće, temperaturne promjene umanjuje nosivost presjeka za približno ~10 %, odnosno da je konačno povećanje nosivosti, koje u analiziranim primjenama najčešće nije mjerodavno, respektabilnih ~38,5 %, pri čemu povećanje krutosti kao ciljano svojstva za poboljšanje osnovnog profila ostaje nepromijenjeno (128 %). U realnim situacijama utjecaj temperaturne promjene na krutost i nosivost spregnutog presjeka je i manji jer se pri kombinacijama djelovanja uzima u obzir vjerojatnost istovremene pojave više promjenjivih djelovanja. Prema aktualnoj normi [16] se za istodobno djelovanje dominantnog promjenjivog djelovanja, u analiziranim situacijama to je vjetar, u kombinaciji s dodatnim promjenjivim djelovanjem, u analiziranim situacijama to je temperaturna promjena, dodatni promjenjivi utjecaj reducira s koeficijentom kombinacije $\psi_0 = 0,6$. Može se pokazati da bi, gdje je nosivost važna, slična analitika primjenom čelika S355, uz nepromijenjene odnose u krutosti u odnosu na varijantu sa čelikom S235, rezultirala doprinosom u nosivosti u odnosu na osnovni profil koji se ojačava, bez utjecaja temperaturne promjene, za ~80,9 %, a s utjecajem temperaturne promjene nosivosti ostaje za ~65,8 % veća u odnosu na osnovni profil koji se ojačava. Za analizirani slučaj, u obje varijante, sa S235 odnosno S355, može se reći da nosivost i dalje nije mjerodavna za dimenzioniranje jer s obzirom na parcijalne

koeficijente sigurnosti prema [16] nosivost postaje mjerodavna tek ako su projektna opterećenja pri dostizanju ULS ispod 140-150 % projektnih opterećenja pri dostizanju SLS.

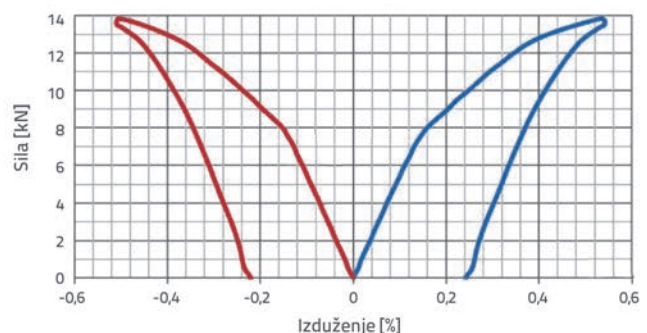
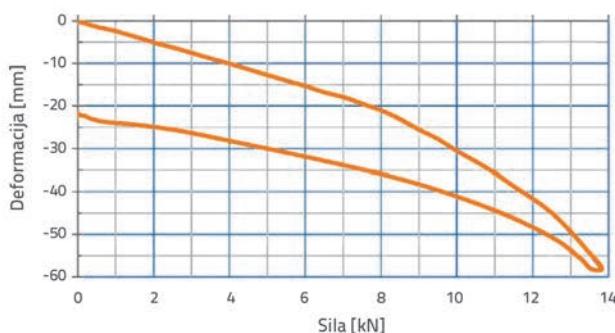
6. Rezultati pokusnog ispitivanja

Dispozicija za pokusno ispitivanje na jednom uzorku kako bi se provjerila analiza ponašanja prikazana je na slici 9. Ispitivanje materijala za taj pokus nije provedeno, već su svi podaci preuzeti iz atesta materijala. U slučaju aluminijevske legure podaci za tehničku granicu popuštanja i izduženje pri lomu (205 MPa i 11,7 % iz atesta u usporedbi sa 160 MPa i 8 % iz [11]) značajno odstupaju, dok su za vlačnu čvrstoću (225 MPa iz atesta u usporedbi s 215 MPa iz [11]) odstupanja manja. U slučaju čeličnog materijala, deklarativno S235, atest je davao sve relevantne vrijednosti bliske, u okviru 5 %, čeliku S275 prema [14].

Za pokusno ispitivanje mjerenje izduženja je rađeno samo u sredini presjeka, a samo ispitivanje je, u ovoj fazi istraživanja, rađeno na sobnoj temperaturi, odnosno na temperaturi lijepljenja.

Dijagrami sila-deformacija nosača i sila-izduženje zajedničkih vlakana spregnutih materijala kod provedenog ispitivanja uzorka, zajedno s fazom rasterećenja, prikazani su na slici 12. Iz dijagrama se mogu jasno uočiti tri zone ponašanja spregnutog nosača, pri čemu se prelasci iz jedne u drugu zonu mogu povezati s karakterističnim točkama sa slike 10., dostizanjem granice popuštanja u čeliku odnosno dostizanjem tehničke granice popuštanja kod aluminijevske legure.

Rezultati pokazuju očekivano dobro poklapanje dijagrama sila-pomak u području elastičnog ponašanja s proračunski dobivenim vrijednostima. Naime, za prethodno određeno opterećenje pri dostizanju SLS od 5,74 kN eksperimentom je izmjerena sila od 5,80 kN. Razlika između proračunskih i izmjerenih vrijednosti u iznosu od ~1 % može se, uz primijenjene idealizacije, prije svega zanemarivanje sloja ljepila, smatrati vrlo dobrom. Za tu fazu opterećenja izmjerena naprezanja, odnosno odgovarajuća izduženja, također se dobro slažu. Izmjerene vrijednosti naprezanja, odnosno izduženja, kod čelika su ~5 % veće od proračunskih, a analogne izmjerene vrijednosti kod aluminijevske legure su ~6 % veće od odgovarajućih vrijednosti dobivenih analitičkim putem.



Slika 12. Dijagrami sila-deformacija i sila-izduženje tijekom pokusnog ispitivanja spregnutog nosača

Dispozicija primijenjena prilikom pokusnog ispitivanja nije omogućila dostizanje klasičnog loma odnosno graničnog stanja nosivosti (ULS) jer je prije njega došlo do iskorištenja prostora predviđenog za deformaciju nosača usklađenog s hodom primijenjene preše. Može se, međutim, reći da je lom dostignut po kriteriju pomaka (progiba) u skladu s normom [17] "SRPS U.M1.047:1987 - Ispitivanje konstrukcija visokogradnje probnim opterećenjem i ispitivanje do loma". Ta je norma pod izmijenjenim imenom još uvijek na snazi u većini zemalja nastalih iz republika bivše SFRJ i definira lom sa $L/50$ (5,6 cm u slučaju primijenjene dispozicije uzorka). Ovaj uvjet je dostignut sa silom od 13,36 kN. Predviđen prostor za progib dopustio je povećanje sile do 13,83 kN, pri čemu je zabilježen pad sposobnosti prihvaćanja dodatnog opterećenja pa se procjenjuje da se došlo blizu klasičnog loma nakon iscrpljenja materijala. U prilog toj pretpostavci idu i dijagrami pri rasterećenju, prikazani na slici 12., gdje se uočava značajna zaostala, plastična, deformacija. Moment nosivosti odnosno nivo apliciranog opterećenja pri dostizanju graničnog stanja nosivosti, analitički određeni na već opisan način, ali s karakteristikama materijala iz atestne dokumentacije, iznose $M_{Rd,exp} = (5,17 + 2,53) = 7,70$ kNm, odnosno $Q_{exp} = 2 \cdot (4,50 + 2,20) = 13,40$ kN. Intenzitet opterećenja pri ULS dobiven analitičkim putem nešto je manji, u okviru ~3 %, od intenziteta izmjerjenog prilikom ispitivanja.

Izmjerena izduženja pri maksimalno postignutom opterećenju upućuju na izduženja u zajedničkom vlaknu aluminijske legure i čelika od približno 0,7 %, što jasno pokazuje da je čelik znatno ušao u plato plastičnosti, te su naprezanja u čeliku oko granice popuštanja čelika, odnosno 275 MPa. Aluminijska legura pri dostignutom izduženju, za mehaničke karakteristike iz atesta materijala, i prema ponuđenim modelima $\sigma - \varepsilon$ ponašanja aluminijskih legura u aneksu E aktualne norme [11], inače pretežno izvedenih iz Ramberg-Osgoodova zakona modificiranog na način koji je prikazan u [8, 9] i za koji se u tablicama mehaničkih karakteristika te norme [11] daje potreban eksponent " n_p ", rezultira naprezanjem od ~211 MPa, što je naprezanje na trećini opsega između tehničke granice popuštanja i vlačne čvrstoće aluminijske legure iz atesta materijala.

Ispitivanje probnog uzorka je provedeno na sobnoj temperaturi, odnosno temperaturi lijepljenja pa su rezultati bez učinaka koje pri sprezanju materijala s različitim koeficijentima termičkog širenja izaziva temperaturna promjena. Dobro slaganje rezultata pokusnog ispitivanja s predloženim modelom proračuna iniciralo je program detaljnih istraživanja, čija je realizacija u tijeku, gdje se planira i ispitivanje pri temperaturnim promjenama.

7. Zaključak

Inženjerska radoznalost, ohrabrena činjenicom da se sprezanje aluminijske i čelika uvelike primjenjuje u drugim inženjerskim područjima, inicirala je istraživanje mogućnosti spreznja aluminijskih legura i čelika u građevinarstvu kao unapređenje u praksi uobičajenih načina ojačanja nosača od aluminijskih legura za fasadne sustave. Inicijalni rezultati istraživanja, pri kojima je provedeno i pokusno ispitivanje na jednom uzorku, pokazali su da je sprezanjem aluminijskih legura i čelika moguće ostvariti racionalne nosače čiji proračun krutosti i nosivosti može biti relativno jednostavan. Posebna je pozornost, s teorijskog aspekta, usmjerena na činjenicu da se sprezanje izvodi između dva materijala s različitim koeficijentima termičkog širenja i kvalitativno različitim $\sigma - \varepsilon$ dijagramima. Izvornom parametarskom analizom je pokazano da različiti koeficijenti termičkog širenja spregnutih materijala nisu prepreka racionalnim primjenama u građevinarstvu. Analitički je pokazano da nepovoljni učinci spreznja dvaju materijala s različitim koeficijentima termičkog širenja ne sprječavaju ukupno povoljne rezultate, posebno u situacijama koje su inicirale istraživanje, odnosno kada je za dimenzioniranje mjerodavna deformacija. Istraživanje se, u ovoj fazi, ne bavi samim načinom spreznja, stabilnošću spregnutog nosača ili drugim aspektima koji također zahtijevaju analizu prije praktične primjene, već se zadržava na analitičkom modelu ponašanja. Predložena je metoda proračuna za određivanje krutosti spregnutog nosača i nosivosti spregnutog presjeka koja je, općenito, potvrđena pokusnim ispitivanjem na jednom uzorku. Ohrabrujući rezultati istraživanja, prikazani u ovom radu, inicirali su program detaljnih istraživanja čije je provođenje u tijeku.

LITERATURA

- [1] Official high-res car pictures published with the permission of the owners, www.mad4wheels.com, 19.09.2013.
- [2] Takuda, H., Fujimoto, H., Hatta, N.: Formabilities of steel/aluminium alloy laminated composite sheets, *Journal of Materials Science*, 33 (1998), pp. 91-97
- [3] Sierra, G., Peyre, P., Deschaux-Beaume F., Stuart D., Fras G.: Steel to aluminium key-hole laser welding, *Materials Science and Engineering A* 447, pp. 197-208, Elsevier Science Ltd, 2007.
- [4] Taylor, G.T.: The design by finite elements of riveted aluminium/steel composite structures, *Proceedings of the 7th World Congress on Finite Element Methods*, Monte Carlo, 1993, pp. 330-335
- [5] Macdonald, M.: Bending of a thin-walled combined section beam, *MSc thesis*, University of Strathclyde, Glasgow, 1993.
- [6] Taylor, G.T., Macdonald, M., Rhodes, J.: The Design Analysis of Light Structures with Combined Aluminium/Steel Sections, Elsevier Science Ltd., *Thin-Walled Structures*, 30 (1998) 1-4, pp. 111-133, [http://dx.doi.org/10.1016/S0263-8231\(97\)00015-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0263-8231(97)00015-3)

- [7] Kissell, R., Ferry, R.: Aluminum Structures - A Guide to Their Specifications and Design, Second Edition, John Wiley & Sons, Inc., 2002.
- [8] Mazzolani, F.: Aluminium Alloy Structures (2nd edition), E & FN SPON, London, 1995.
- [9] Gligić, B.: Stability of structural elements made from aluminium alloys, MSc thesis, Faculty of civil engineering, University of Belgrade, 1993.
- [10] Skejić, D., Boko, I., Torić, N.: Aluminium as a material for modern structures, GRAĐEVINAR, 67 (2015) 11, pp. 1075-1085, <http://dx.doi.org/10.14256/JCE.1395.2015>
- [11] EN 1999-1-1:2007+A1 - Eurocode 9: Design of aluminium structures - Part 1-1: General structural rules
- [12] ENV 1999-1-1:1998 - Eurocode 9: Design of aluminium structures - Part 1-1: General rules - General rules and rules for buildings
- [13] DDV 1999-1-1:2000 - Eurocode 9: Design of aluminium structures - Part 1-1: General rules - General rules and rules for buildings
- [14] EN 1993-1-1:2005 - Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings
- [15] Marković, Z., Buđevac, D., Dobrić, J., Fric, N., Knežević, M.: Specific behaviour of thin-walled member joints with fasteners, GRAĐEVINAR, 64 (2012) 3, pp. 217-230
- [16] EN 1990:2002 - Eurocode - Basis of structural design
- [17] SRPS U.M1.047:1987 - Load test and break test for the building constructions