

Laboratorijska ispitivanja pojasnih kutnika pri savijanju

Davor Skejić, Darko Dujmović, Mladenko Rak

Ključne riječi

pojasni kutnik, savijanje, laboratorijska ispitivanja, modificirani pojasni kutnik, postojeći model, predloženi model, valorizacija modela

Key words

angle flange cleat, bending, laboratory testing, modified angle flange cleat, existing model, proposed model, model evaluation

Mots clés

cornière d'aile, flexion, essai en laboratoire, cornière d'aile modifiée, modèle existant, modèle proposé, évaluation de modèle

Ключевые слова

поясной угловой элемент, изгиб, лабораторные испытания, модифицированный элемент, существующая модель, предложенная модель, оценка моделей

Schlüsselworte

Gurtwinkel, Biegung, Laboruntersuchungen, modifizierter Gurtwinkel, bestehendes Modell, vorgeschlagenes Modell, Modellvalorisierung

D. Skejić, D. Dujmović, M. Rak

Izvorni znanstveni rad

Laboratorijska ispitivanja pojasnih kutnika pri savijanju

Opisana su laboratorijska ispitivanja četiri tipa pojasnih kutnika pri savijanju. Pri tome su ispitane i originalne modifikacije pojasnog kutnika s rebrom za ukrućenje. Valorizirani su postojeći i originalno razvijeni modeli za procjenu otpornosti i krutosti ispitanih tipova pojasnih kutnika. Istaknuta je svrsishodnost predloženog ojačanja, kao i valjanost predloženih modela. Za korektni prijedlog optimalnih modela preporučeno je provođenje detaljnih probabilističkih analiza.

D. Skejić, D. Dujmović, M. Rak

Original scientific paper

Laboratory testing of angle flange cleats in bending

The laboratory testing of four types of angle flange cleats in bending is described. At that, original modifications of the angle flange cleat with strengthening rib are also tested. The existing and originally developed models for estimating resistance and stiffness of tested types of angle flange cleats are evaluated. The adequacy of the proposed strengthening, and the acceptability of the proposed models, is emphasized. Detailed probabilistic analyses are recommended for proper proposal of optimum models.

D. Skejić, D. Dujmović, M. Rak

Ouvrage scientifique original

Essais en laboratoire des cornières d'aile dans la flexion

Les essais en laboratoire sur quatre types des cornières d'aile dans la flexion sont décrits. Les modifications originelles de la cornière d'aile, avec la côte de renforcement, sont également analysées. Les modèles existants et originaux servant à déterminer la résistance et la dureté des cornières d'ailes soumises à l'essai sont évalués. La convenance des renforcements proposés, et l'acceptabilité des modèles proposés, est mise en valeur. Les analyses détaillées probabilistes sont recommandées pour le développement approprié des modèles optimaux.

Д. Скейич, Д. Дуймович, М. Рак

Оригинальная научная работа

Лабораторные испытания поясных угловых элементов на изгиб

Описаны лабораторные испытания четырех типов поясных угловых элементов на изгиб. При этом испытаны и оригинальные модификации поясного углового элемента с ребром для усиления. Оценены существующие и оригинальные разработанные модели для оценки прочности и жесткости испытанных типов поясных угловых элементов. Подчеркнута целесообразность предложенного усиления, а также исправность предлагаемых моделей. Для конкретного предложения оптимальных моделей рекомендовано проведение подробного probabilistического анализа.

D. Skejić, D. Dujmović, M. Rak

Wissenschaftlicher Originalbeitrag

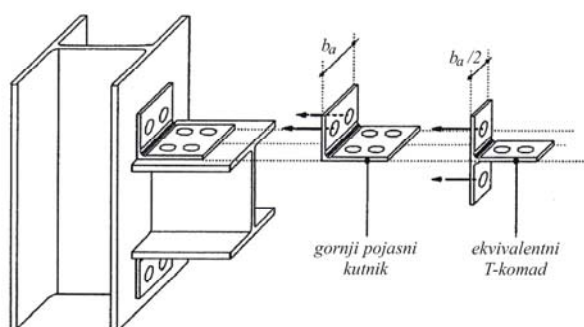
Laboruntersuchungen von Gurtwinkeln bei Biegung

Beschrieben sind Laboruntersuchungen von vier Gurtwinkeltypen bei Biegung. Dabei untersuchte man auch originelle Modifikationen von Gurtwinkeln mit Versteifungsrippen. Valorisiert sind bestehende und originell entwickelte Modelle für die Abschätzung der Widerstandsfähigkeit und Steifigkeit der untersuchten Gurtwinkeltypen. Hervorgehoben ist die Zweckmäßigkeit der vorgeschlagenen Verstärkung, sowie die Trefflichkeit der vorgeschlagenen Modelle. Für einen korrekten Vorschlag optimaler Modelle empfiehlt man eine Durchführung detaillierter probabilistischer Analysen.

Autori: Dr. sc. **Davor Skejić**, dipl. ing. građ.; prof. dr. sc. **Darko Dujmović**, dipl. ing. građ.; prof. dr. sc. **Mladenko Rak**, dipl. ing. građ., Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Kačićeva 26, Zagreb

1 Uvod

Kao što je već detaljno opisano u radovima [1, 2 i 3] ponašanje pojasnog kutnika pri savijanju prema suvremenim normama utemeljeno je na modelu T-komada [4 i 5] (slika 1.). Model T-komada je opće prihvaćen kao pojednostavljeni model za karakterizaciju ponašanja vlačnog područja vijčanih priključaka, što je najčešće najznačajniji izvor deformacija čitavog priključka. Prema metodi komponentata, ovo je ponašanje spoja modelirano preko ovisnosti $F-\Delta$ koja je uistinu nelinearna zbog mehaničkih i geometrijskih nelinearnosti i fenomena kontakta [6].



Slika 1. Identifikacija T-komada za priključke s pojasnim kutnicima

Valjane norme za projektiranje priključaka utemeljene na modelu T-komada oslonjene su na puni plastični mehanizam linija popuštanja i ne dopuštaju potpunu karakterizaciju deformacijskog kapaciteta u krajnjim stanjima. Međutim, ispitivanja koja su proveli Bursi i Jaspert [7] pokazala su da ako se T-komad ciljano projektira da otkazuje uz plastični mehanizam tipa 1, koji odgovara dvostrukoj zakrivljenosti pojasnice zbog formiranja plastičnih zglobova u osi vijka i kod sjecišta pojasnice i hrpta, ovaj spoj posjeduje značajni deformacijski kapacitet [8]. Dakle, potrebno je ciljano projektirati pojasni kutnik na otkazivanje uz mehanizam tipa 1 jer time ostvarujemo željeni rotacijski kapacitet priključka, ali i duktilnost cijele konstrukcije. To je i bio osnovni razlog što je upravo otkazivanje kutnika uz mehanizam tipa 1 istraživano u ovom radu.

U ovom je radu opisan dio istraživačkog rada koji je posvećen karakterizaciji nelinearnoga (statičkog) ponašanja izdvojenog para kutnika radi shvaćanja stvarnog ponašanja komponente gornjega pojasnog kutnika u vlatku (savijanju), načina otkazivanja i deformacijskog kapaciteta. Za ispunjenje navedenih ciljeva laboratorijska su ispitivanja provedena u Laboratoriju za ispitivanje konstrukcija na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu. Dodatno, ovaj program ispitivanja razjašnjava neke aspekte vezane uz razlike između tipova uzoraka, odnosno parova kutnika. Napominje se da je ideja za

ovaj znanstveno istraživački rad proizašla iz preliminarne parametarske analize otpornosti komponente kutnika pri savijanju koja je potanko opisana u radu [1].

Teorijski modeli za procjenu otpornosti komponente „standardni pojasni kutnik pri savijanju“ potanko su objašnjeni u [1 i 2]. U ovom su radu razmatrani sljedeći modeli procjene otpornosti gornjeg standardnog pojasnoga kutnika pri savijanju:

1. Eurocode model - metoda 1
2. Eurocode model - metoda 2
3. Faellin model
4. Girão Coelho model
5. AISC model
6. Chenov model
7. Swansonov (modificirani Kulakov) model.

Postojeći modeli za procjenu početne krutosti komponente „standardni pojasni kutnik u savijanju“ potanko su objašnjeni u [2], a ovdje su razmatrani sljedeći modeli procjene krutosti gornjega pojasnog kutnika pri savijanju:

1. Eurocode model (EC3 - metoda 1, EC3 - metoda 2 i Coelho)
2. Faellin model.

Neke suvremene norme (teorijski modeli) za projektiranje čeličnih priključaka razlikuju dva osnovna slučaja ponašanja kutnika pri savijanju, ovisno o odnosu između udaljenosti nosača do pojasnice stupa i debljine kračka kutnika, g/t_a . Taj parametar ima velik utjecaj na ponašanja ove komponente, pa su stoga razmotrene dvije skupine uzoraka $g0$ ($g/t_a < 0,4$) i $g1$ ($g/t_a > 0,4$).

Kao novina razmotren je utjecaj ukrućenja kutnika koji je prema numeričkim analizama [2] pokazao pozitivan utjecaj na ukupno ponašanje kutnika pri savijanju. Tako se kombinacijom navedenih grupa uzoraka $g0$ i $g1$ došlo do ukupno četiri grupe uzoraka ($g0s0$, $g1s0$, $g0s1$, $g1s1$), ovisno o tome imaju li ukrućenje $s1$ (modificirani) ili nemaju $s0$ (standardni). Analogni postojećim modelima za standardni kutnik, razvijeni su novi modeli za procjenu ponašanja ojačanih (modificiranih) kutnika ekstrapolacijom postojećih pravila za druge tipove priključaka.

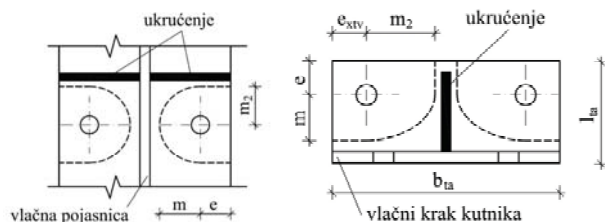
Činjenica jest da mnoštvo priznatih modela za procjenu ponašanja gornjega pojasnog kutnika stvara zbrku kod inženjera projekatnata. Ta je zbrka još veća ako se rabe jednostavne i učinkovite modifikacije za poboljšanje ponašanja pojasnog kutnika pri savijanju. Stoga je krajnji cilj ovog rada prijedlog optimalnih teorijskih modela za četiri analizirane konfiguracije. Taj je prijedlog zasnovan na usporedbi proračunanih teorijskih s dobivenim eksperimentalnim vrijednostima otpornosti i krutosti.

2 Prijedlog modela ponašanja modificiranoga pojasnog kutnika pri savijanju

Novi modeli za procjenu ponašanja modificiranoga (ojačanog) pojasnoga kutnika pri savijanju nastali su kombinacijom postojećih modela za standardni kutnik pri savijanju, [1], i teorijskih postavki za vijčane priključke s čelnom pločom i za vijčane priključke s ukrućenim pojasnicama stupa. U nastavku se navodi prijedlog određivanja oblika i duljine linija popuštanja za 1. način (tip) otkazivanja kraćeg kraka ojačanog kutnika pri savijanju.

Efektivna duljina linije popuštanja čelne ploče za pojedinačni vijak neposredno ispod vlačne pojasnice nosača na primjeru vijčanog priključka s čelnom pločom dana je prema [4] (slika 2.a):

$$l_{eff,1} = l_{eff,nc} = \alpha m, \quad \text{ali} \quad l_{eff,1} \leq l_{eff,cp} = 2\pi m. \quad (1)$$



a) ukrućene pojasnice stupa ili čelne ploče b) ukrućeni kutnik

Slika 2. Određivanje linije popuštanja za ploče s ukrućenjem

Ako se primijeni ista logika, ali i uzme u obzir stvarni geometrijski oblik razmatranih gornjih pojasnih kutnika s ukrućenjima, efektivna duljina linije popuštanja kraćega ojačanog kraka kutnika pri savijanju kod razmatranja otpornosti, slika 2.b), može se izraziti kako slijedi:

$$l_{eff,1} = l_{eff,nc} = \frac{\alpha}{2} m + e_{xtv}, \quad \text{ali} \quad l_{eff,1} \leq l_{eff,cp} = 2\pi m. \quad (2)$$

Napominje se da se kod Faellina modela otpornosti umjesto udaljenosti m rabi korigirana udaljenost između osi vijka i plastičnog zgloba $m^* = m - \psi_1 (d_{bh}/2 + t_a/2 + 0,2r_a)$.

U izrazima (2) koeficijent α ovisi o $\lambda_1 = m/(m+e)$ i $\lambda_2 = m_2/(m+e)$, a dan je u [4]. Nadalje, ψ_1 je redukcijski koeficijent za udaljenost m prema Faelli, d_{bh} je promjer glave vijka, t_a je debljina gornjeg pojasnog kutnika, a r_a je polumjer prijelaza u području sjecišta dvaju krakova kutnika. Značenje ostalih oznaka može se vidjeti na slici 2.

Kada se razmatra krutost ojačanog kutnika prema Eurocodeovu modelu rabi se ista efektivna duljina kao pri razmatranju otpornosti. Međutim, ovdje se analogno modi-

ficiranom Faellinu modelu krutosti za standardne kutnike predlaže nešto složenija procjena efektivne duljine [2]. Za razmatranje krutosti analiziranoga ojačanog kutnika, efektivna duljina dana je sljedećim izrazom:

$$l_{eff} = 0,5l_{eff1} + 0,5l_{eff2}, \quad (3)$$

gdje je:

$$l_{eff1} = \min \{ l_{eff1,1}; l_{eff1,2} \} \\ = \min \left\{ d_{bh} + 2m; \frac{d_{bh}}{2} + m + e_{xtv} \right\}, \quad (4)$$

$$l_{eff2} = \min \{ l_{eff2,1}; l_{eff2,2} \} \\ = \min \left\{ d_{bh} + 2m_2; \frac{d_{bh}}{2} + m_2 + e \right\} \quad (5)$$

Značenje oznaka u izrazima (4) i (5) već je navedeno.

3 Opis laboratorijskih ispitivanja

3.1 Opseg i cilj laboratorijskih ispitivanja

Ponašanje pojasnog kutnika pri savijanju dobiveno je iz laboratorijskih ispitivanja parova kutnika u vlaklu. Ova su laboratorijska ispitivanja provedena u Laboratoriju za ispitivanje konstrukcija na Građevinskom fakultetu u Zagrebu.

Osnovni cilj ovih ispitivanja bio je dobiti realno ponašanje kutnika pri savijanju, odnosno njegovu ovisnost $F-\Delta$. Karakterizacijom eksperimentalnih krivulja omogućeno je dobivanje realnih svojstava ove komponente što se tiče otpornosti, krutosti i deformacijskog kapaciteta.

Ispitivanja su provedena na četiri tipa parova kutnika kako bi se dobilo realno ponašanje različitih konfiguracija kutnika. Iz provedenih semiprobabilističkih parametarskih analiza, [1 i 2], i uvjeta laboratorija proizašle su konačne konfiguracije kutnika. Budući da neke norme, odnosno neki teorijski modeli, čine razliku ovisno o razmaku između nosača i pojasnice stupa, g , razmotrene su dvije grupe uzoraka, s manjim razmakom (g_0) i s većim razmakom (g_1) od graničnog razmaka $0,4t_a$, gdje je t_a debljina kutnika.

Originalna ideja o ukrućivanju pojasnog kutnika razdvojila je te dvije, gore opisane grupe u četiri podgrupe, odnosno tipa, kutnika. Tako su u konačnici razmotrene četiri grupe uzoraka, dvije bez ukrućenja (g_0s_0 i g_1s_0) i dvije s ukrućenjem (g_0s_1 i g_1s_1). Sve su četiri grupe parova kutnika imale po tri uzorka, tako da je ispitano ukupno 12 uzoraka vlačno opterećenih parova kutnika.

3.2 Plan ispitivanja

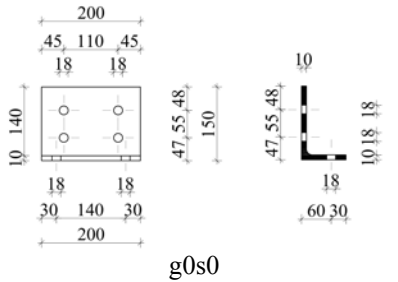
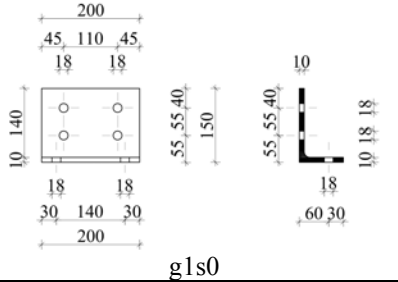
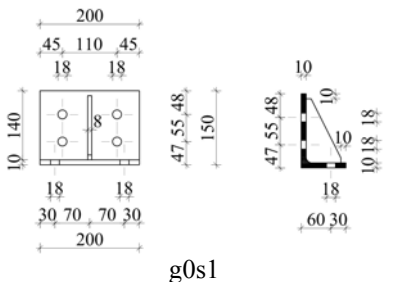
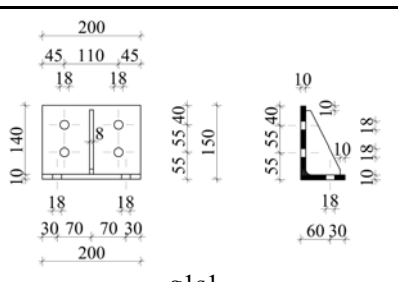
3.2.1 Geometrijska svojstva laboratorijskih uzoraka

Svi uzorci kutnika izrađeni su od istog profila L 150 x 90 x 10, kvalitete čelika S 235 JR. Ispitane su četiri grupe uzoraka kutnika pri savijanju, odnosno vlačno opterećenih parova kutnika, prema tablici 1. Prvo su uzorci razvrstani u grupe ovisno o odnosu razmaka između nosača i pojasnice stupa, g , i debljine kutnika, t_a . Naime, prema EN 1993-1-8 [4] i parametarskim analizama provedenim u [2], odnos g/t_a , s graničnom vrijednosti 0,4,

ima izrazit utjecaj na definiranje položaja plastičnog zgloba uz krak kutnika koji se spaja na nosač, a time direktno i na otpo uzoraka odnose se na razmak $g = 2$ mm koji je manji od $0,4 t_a = 0,4 \cdot 10 = 4$ mm, dok se 2. i 4. grupa odnose na razmak $g = 10$ mm koji je veći od $0,4 t_a = 0,4 \cdot 10 = 4$ mm.

Potom, uzorci su razvrstani ovisno o postojanju ukrućenja. Tako grupe koje u oznaci imaju $s0$ (grupe 1. i 2.) predstavljaju standardni kutnik bez ukrućenja, dok grupe s oznakom $s1$ (grupe 3. i 4.) imaju ukrućenje debljine $t_s = 8$ mm i predstavljaju modificirani (ojačani) kutnik.

Tablica 1. Oznake i nominalna geometrijska i mehanička svojstva uzoraka kutnika prema grupama

| Broj grupe | Oznaka grupe uzorka s nominalnim geometrijskim svojstvima | Oznaka uzorka | Broj uzoraka kutnika | Razmak g [mm] | Debljina ukrućenja t_s [mm] | Kvalitetna grupa čelika |
|------------|---|-------------------------------|----------------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------|
| 1. |  | 01_g0s0 02_g0s0 03_g0s0 | 3 x 2 = 6 | 2 | – | S 235 JR |
| 2. |  | 04_g1s0 05_g1s0 06_g1s0 | 3 x 2 = 6 | 10 | – | S 235 JR |
| 3. |  | 07_g0s1 08_g0s1 09_g0s1 | 3 x 2 = 6 | 2 | 8 | S 235 JR |
| 4. |  | 10_g1s1 11_g1s1 12_g1s1 | 3 x 2 = 6 | 10 | 8 | S 235 JR |

Detaljni prikaz uzoraka s nominalnim geometrijskim i mehaničkim svojstvima dan je u tablici 1. za svaku grupu posebno. Uporabljani su nominalno isti vijci M16 x 90, kv.10.9, koji su izmjenjivani kod svake montaže novog uzorka.

3.2.2 Opis laboratorijskih uzoraka i opreme

Laboratorijski su uzorci para kutnika opterećeni statičkom vlačnom silom, koja je unesena u ploču K2 debljine 30 mm tako da je ostvaren simetričan unos sile u oba kutnika, slika 3. Opterećenje je uneseno preko dinamičkog uređaja za unos opterećenja (preše).

Na slici 3. prikazan je razmještaj uzoraka i dodatne opreme za vlačno ispitivanje para kutnika. Na podu se nalazi stup K1 koji je zapravo oslonac kutnika, a njegova gornja ploča debljine 40 mm simulira pojasnicu stupa u stvarnoj situaciji priključka nosač-stup izvedenog pojasnim kutnicima. Ploča K2 omogućuje simetričan unos opterećenja u kutnike i u stvarnoj situaciji kod priključka predstavlja gornju (vlačnu) pojasnicu nosača.

Adapter za piston K3 služi za unos vlačne sile u ploču K2 i preko nje u kutnike. Na opisani način omogućeno je ispitati komponentu 'kutnik pri savijanju' i time vrlo dobro simulirati uvjete u kojim se ta komponenta nalazi kada funkcionira u samom priključku. Radi postizanja istih laboratorijskih uvjeta svi su vijci bili pritegnuti s momentom od 105 Nm (momentni ključ TÜV GS) što odgovara sili prednapinjanja od 26 kN (približno 20 % vlačne otpornosti vijka).

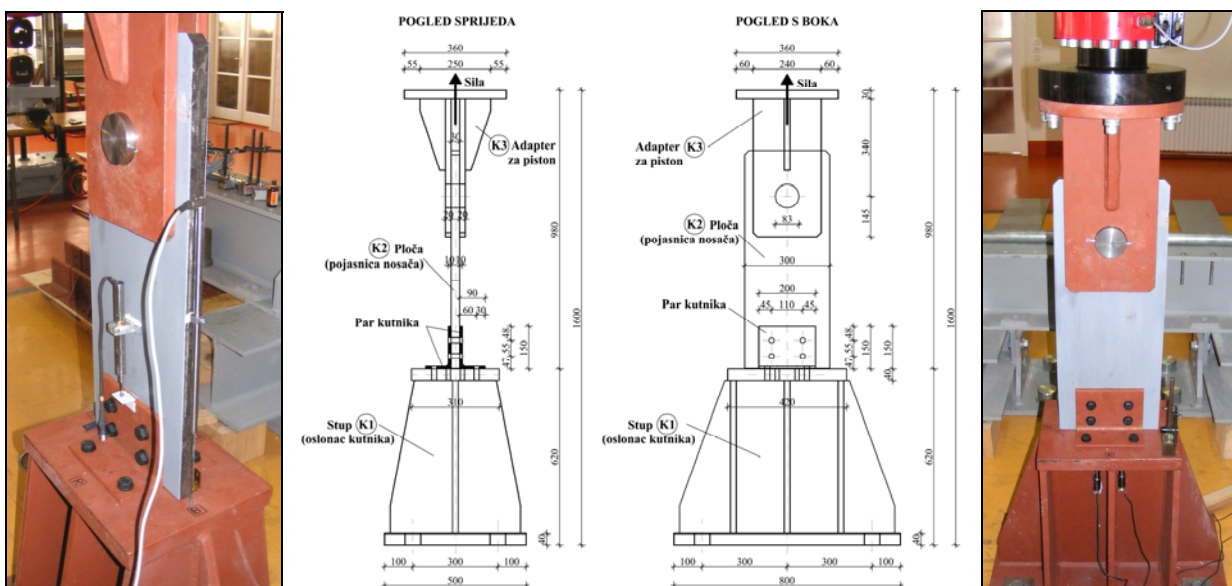
3.2.3 Postupak ispitivanja

Svi su uzorci para kutnika ispitani na Zwick&Roell dinamičkom hidrauličkom uređaju za ispitivanje (preši)

kapaciteta ± 600 kN, brzine unosa opterećenja $0,001$ mm/s - 1 m/s, i maksimalnog pomaka ± 125 mm. Ovu prešu pokreće hidraulička pumpa snage 55 kW s preciznim servoventilom koji propušta ulje i ostvaruje vezu između kontrolera i računala. Unos opterećenja može biti uz kontrolu pomaka ili kontrolu sile (*software Workshop*).

Uzorci su opterećeni statičkom silom koja je nanošena uz kontrolu pomaka (brzina prirasta pomaka bila je konstantna $0,01$ mm/s ($0,6$ mm/min) tijekom cijelog ispitivanja do otkazivanja uzorka. Ispitivanje počinje opterećivanjem uzorka vlačnom silom do vrijednosti elastične proračunske otpornosti para kutnika pri savijanju ($2/3 F_{Rd}^*$). F_{Rd}^* je prihvaćena preliminarna proračunska otpornost para vlačno opterećenih kutnika. Budući da se radilo o uzorcima s ukrućenjem i bez ukrućenja, prihvaćene su dvije različite vrijednosti sile koje definiraju kraj 1. faze opterećivanja.

Nakon stanke u trajanju od 3 minute slijedilo je rasterećenje na vrijednost sile nešto malo iznad 0 kN, kako bi se zadržala lagana napetost uzorka radi ostvarenja kontinuiranog rada mjernih uređaja. Time je završio drugi korak unosa opterećenja. Zatim su uzorci opterećivani do otkazivanja i to tako da su se stanke, u trajanju od približno 3 min, radile na nivoima elastične otpornosti, $2/3 F_{Rd}^*$, plastične (proračunske) otpornosti, F_{Rd}^* , a nakon toga u području početka nelinearnosti (KR – *knee range*) i poslije ove granice svakih 6 min, što odgovara pomaku pistonu od $3,6$ mm. Područje omekšavanja $F-\Delta$ krivulje (*knee range*) odgovara prijelazu od krutog na mekši dio. Stanke pri unosu opterećenja tijekom ispitivanja trajale su 3 min kako bi se zabilježile kvazistatičke sile.



Slika 3 Razmještaj uzorka para kutnika (g0s0) i dodatne opreme

Potrebno je još jednom napomenuti da su vrijednosti proračunske otpornosti standardnog i modificiranog (ojačanog) kutnika na vlak različite, [1 i 2], pa je prema tome bila različita procedura unosa opterećenja za grupe kutnika s oznakom $s0$ (uzorci od 01_g0s0 do 06_g1s0) i za grupe s oznakom $s1$ (uzorci od 07_g0s1 do 12_g1s1). Zapravo, i za pojedine grupe kutnika iz ovih podgrupa (standardni i ojačani) dobiju se prema razmatranim modelima različite vrijednosti otpornosti. Međutim, te razlike koje proizlaze iz različitog razmaka, g , nisu toliko velike. Stoga su za ova laboratorijska ispitivanja prihvaćene vrijednosti $F_{Rd}^* = 106 \text{ kN}$ za standardne grupe i $F_{Rd}^* = 235 \text{ kN}$ za ojačane grupe.

3.2.4 Opis mjernih uređaja

Pomaci su mjereni induktivnim osjetilima (LVDT) i tenzometarskim trakama (*strain gages*). Na standardnim

kutnicima, dakle onim uzorcima bez ukrućenja, $s0$ – grupe 1. i 2., postavljeno je ukupno dvanaest (12) LVDT-ova. Razmještaj mjernih uređaja na primjeru uzoraka sa standardnim kutnicima (02_g0s0 i 03_g0s0) prikazan je na slici 4. Na toj slici dani su pogledi s lijeve i desne strane.

Na ojačanim kutnicima, dakle onim uzorcima s ukrućenjem, ($s1$ - grupe 3. i 4.), postavljeno je ukupno dvanaest (12) LVDT-ova i tri (3) tenzometarske trake, (slika 5.). Potanki opis za svaki od petnaest kanala (CH 1 - CH 15) sa specifikacijama mjernog mjesta, mjernog uređaja, opisom kanala i tipa mjernog uređaja dan je u [2].

3.3. Mehanička svojstva čelika

Ispitivanje mehaničkih svojstava materijala spojnih sredstava (vijci) i elemenata spoja (kutnik, ukrućenje i ploča K2 koja simulira nosač) provedeno je u Laboratoriju za ispitivanje konstrukcija na Građevinskom fakultetu u



a) pogled s desna

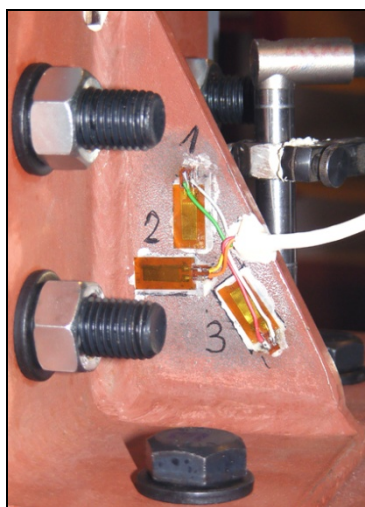


b) pogled s lijeva

Slika 4. Razmještaj mjernih uređaja na uzorcima standardnih kutnika (g0s0 i g1s0)



a) pogled s desna



b) tenzometarske trake



c) pogled s lijeva

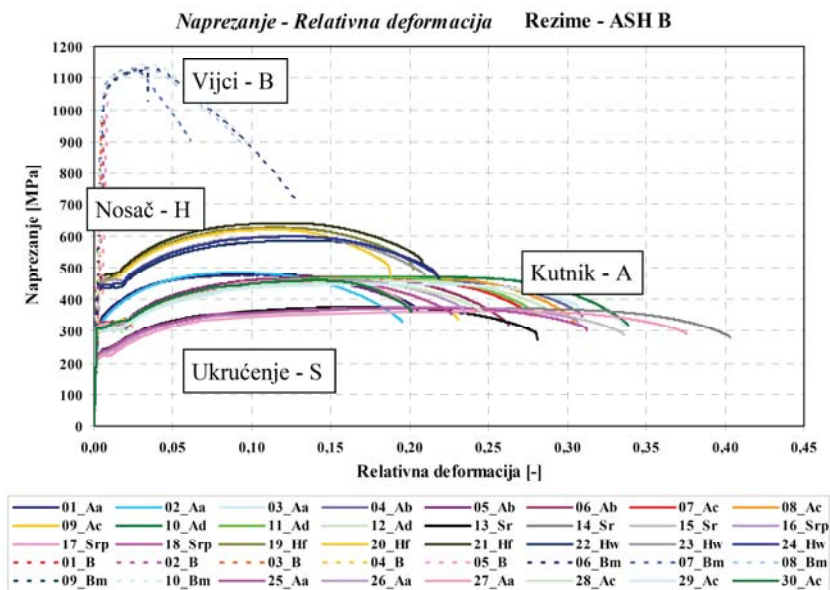
Slika 5. Razmještaj mjernih uređaja na uzorcima modificiranih kutnika (09_g0s1 i 08_g0s1)

Zagrebu. Ispitano je ukupno 40 uzoraka materijala, od toga 10 uzoraka vijaka, 18 kutnika, 6 ukrućenja i 6 ploča (nosača).

Svi su uzorci ispitani na Zwick&Roell statičkom uređaju za ispitivanje (preši) kapaciteta ± 600 kN, brzine unosa opterećenja 0,001 mm/min - 200 mm/min, s maksimalnim pomakom od 1700 mm (slobodan prostor). Za vlačne uzorke ovaj uređaj (preša) ima hidraulične čeljusti maksimalnog pritiska oko 1 MN. Ovu prešu pokreće elektromotor, a njome se upravlja računalom (*software*

tip 1, ali s otkazivanjem vijaka u krajnjim uvjetima). Kod 1. grupe, uzorak *g0s0*, jasno se uočava položaj linija popuštanja koje su se formirale na kraćem kraku kutnika pri savijanju, i to u osi vijaka i neposredno uz prijelaz kraćeg u duži krak. Otkazivanje 2. grupe, uzorci *g1s0*, nastupilo je također popuštanjem kutnika, ali za razliku od 1. grupe uzoraka gdje su linije popuštanja zabilježene na području kraćeg kraka, ovdje je druga linija popuštanja formirana na duljem kraku kutnika uz ploču (pojasnicu nosača).

Kod 3. grupe uzoraka *g0s1* uočava se fenomenološki sličan način otkazivanja kao kod 1. grupe uzoraka, ali uz bitnu razliku što se linija popuštanja uz prijelaz kraćeg u duži krak, spaja s linijom popuštanja koja se formira uz zavar ukrućenja kutnika na spoju s kraćim krakom kutnika. Stoga je odizanje kutnika između dvaju vijaka na mjestu ukrućenja istog reda veličine kao i odizanje kutnika uz ploču (pojasnicu nosača). I kod 4. se grupe uzoraka *g1s1* uočava fenomenološki sličan način otkazivanja kao kod 2. grupe uzoraka, ali s time da se linija popuštanja uz prijelaz kraćeg u duži krak spaja s linijom popuštanja koja se formira uz zavar ukrućenja kutnika na spoju s kraćim krakom kutnika. Bitno je uočiti i formiranje linije popuštanja na duljem kraku kutnika koja je za razliku od 2. grupe uzoraka ograničena na područje uz rubove kutnika.



Slika 6. Sažetak σ - ϵ dijagrama svih ispitanih uzoraka materijala

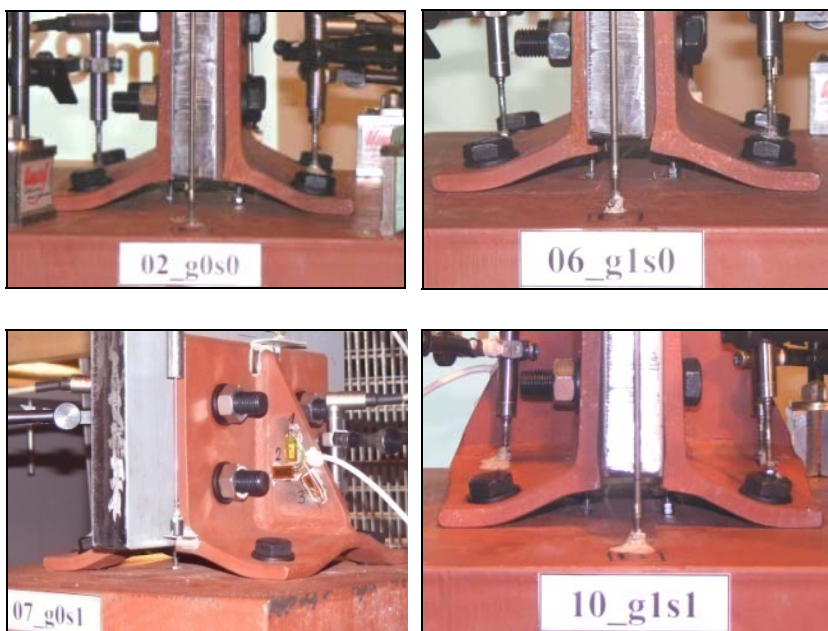
TestExpert). Unos opterećenja je bio uz kontrolu pomaka.

Sažetak ispitanih mehaničkih svojstava materijala elemenata koji su upotrijebljeni u izradi laboratorijskih uzoraka prikazan je na slici 6. Jasno se uočavaju različitosti u ponašanju materijala raznih elemenata (kutnik, ukrućenje, nosač i vijak) i što se tiče otpornosti i što se tiče duktilnosti.

4 Rezultati i komentar laboratorijskih ispitivanja

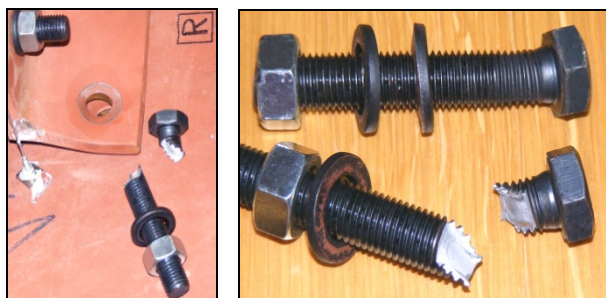
4.1 Načini otkazivanja

Na slici 7. prikazani su karakteristični načini otkazivanja po grupama ispitanih uzoraka parova kutnika. Svi su uzorci otkazali uz plastični mehanizam tipa 1 odnosno uz tip 1-3 u uvjetima krajnjeg stanja (plastični mehanizam



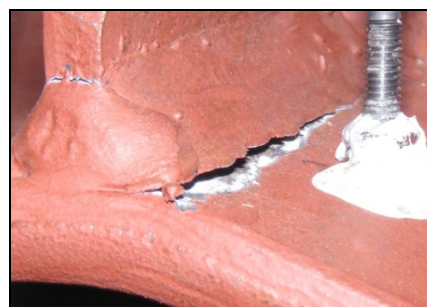
Slika 7. Karakteristični oblici otkazivanja uzoraka po grupama

Iako su svi uzorci para kutnika otkazali savijanjem kutnika, ipak su u postkritičnom području ponašanja kutnika uočene i znatne deformacije vijaka pri vlaku. Dakle, može se zaključiti da je konačno otkazivanje (slom) svih uzoraka nastupilo uz mehanizam tipa 1-3. Jedan karakteristični slom vlačno opterećenog vijka koji je posljedica interakcije uzdužne vlačne sile i momenta savijanja prikazan je na slici 8.



Slika 8. Otkazivanje vijaka (uzorak 02_g0s0)

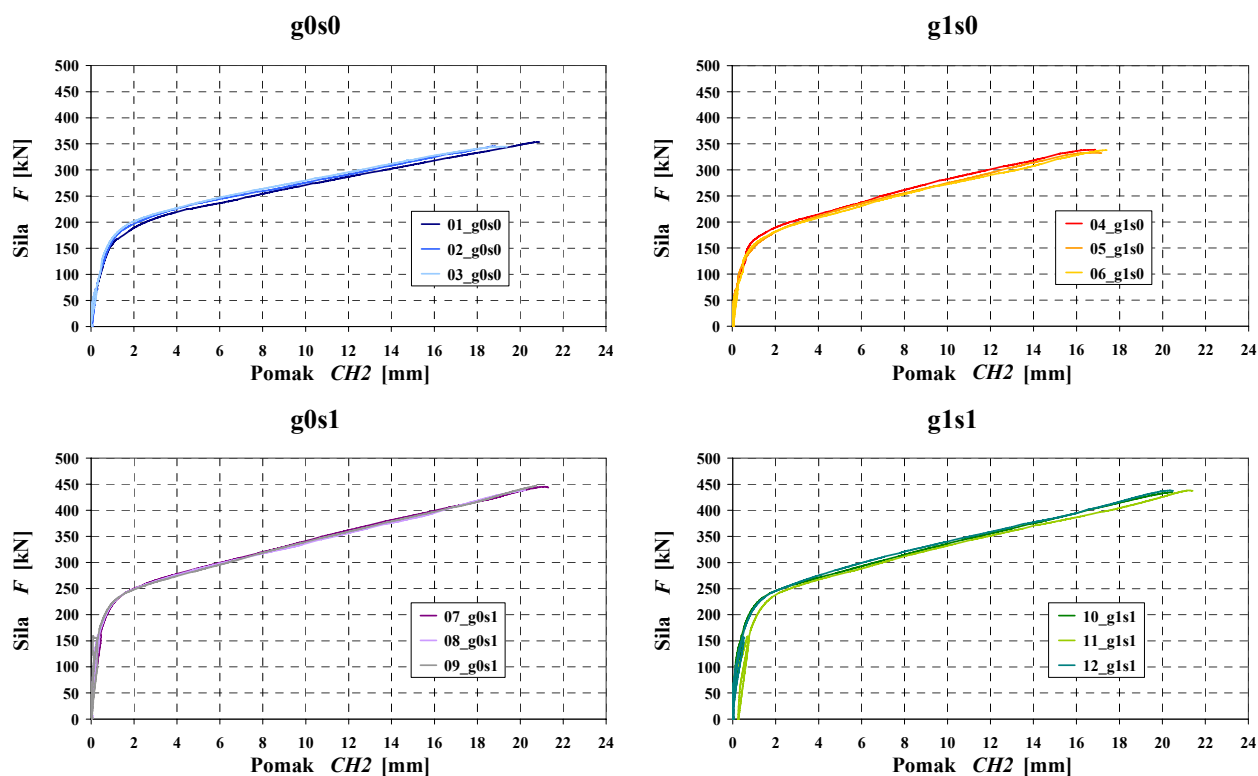
Otkazivanje zavara između ukrućenja i kraćeg kraka kutnika pri savijanju prikazan je na slici 9. Otkazivanje zavara zabilježeno je na 2 od 6 uzoraka s ukrućenjem, a nastupalo je uvijek nakon popuštanja kraka kutnika i uvijek uz velike deformacije vijaka. Zbog toga se ne može okarakterizirati kao tipično otkazivanje u krajnjim stanjima, odnosno kao slom uzorka.



Slika 9. Otkazivanje kutnog zavara između ukrućenja i kraćeg kraka kutnika (uzorak 08_g0s1)

4.2 Komentar rezultata laboratorijskih ispitivanja

U ovoj se točki potanko opisuju eksperimentalni rezultati s osvrtom na najbitnije mjerne uređaje, odnosno kanale, i sve ispitane uzorke parova vlačno opterećenih kutnika. Za svaki prikazani kanal dana su po četiri dijagrama sila - pomak, odnosno po dva dijagrama sila - relativna deformacija, po grupama uzoraka $g0s0$, $g1s0$, $g0s1$ i $g1s1$. Važno je uočiti da su dijagrami dani za ukupni postupak opterećivanja uzoraka (sva tri koraka). Također je bitno napomenuti da su standardni uzorci bez ukrućenja dostizali maksimalnu vrijednost sile oko 350 kN, dok su modificirani uzorci s ukrućenjem dostizali maksimalnu vrijednost sile oko 450 kN. Iz upravo iznesenih razloga, sve zabilježene pomake mjernih ure-



Slika 10. Odvajanje kutnika od pojasnice stupa, kanal CH 2

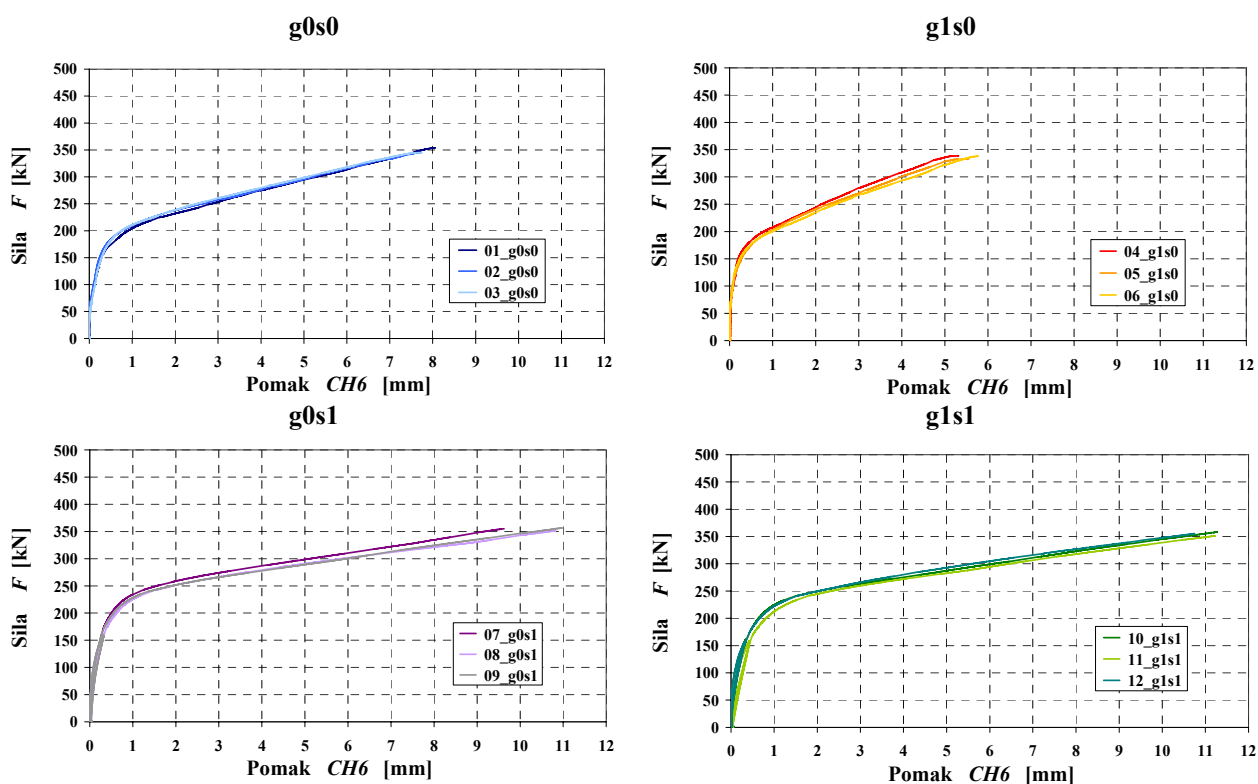
đaja, a naročito onih maksimalnih, treba promatrati ovisno o vrijednosti sile.

Odizanje kutnika od gornje ploče stupa K1 ($F-\Delta$ krivulja), najbitniji podatak, prikazano je na slici 10. u ovisnosti o vrijednosti ukupne sile na uzorcima. Rezultati zabilježeni na kanalima CH 2 do CH 5 izjednačeni su po grupama uzoraka, a ovdje su prikazani dijagrami zabilježeni na kanalu CH 2. Maksimalni pomak u vrijednosti od oko 21 mm zabilježen je na uzorcima s ukrućenjem, dok su uočljivo najmanji pomaci zabilježeni na grupi $g1s0$ s vrijednosti oko 17 mm.

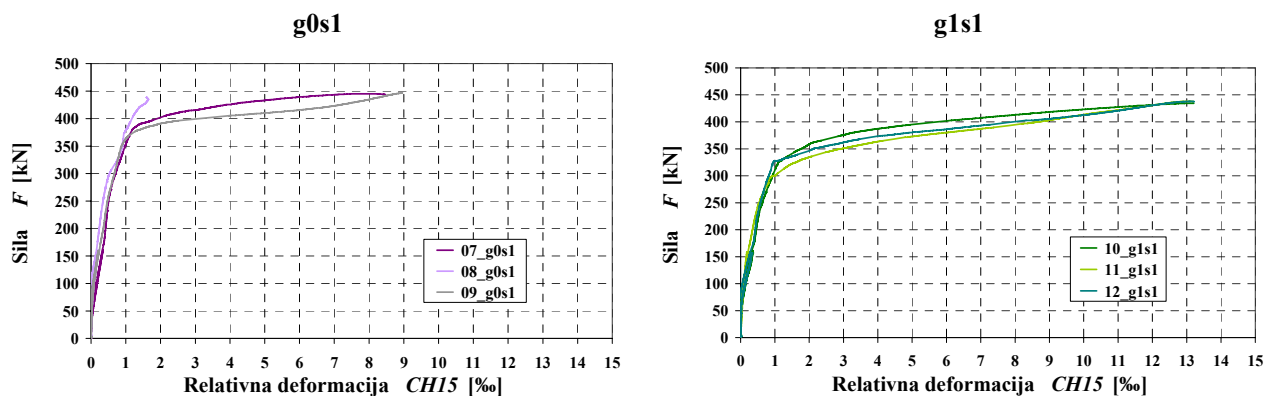
Odizanje lijevog kutnika u osi vijaka koji spajaju kraći krak kutnika i pojasnicu stupa, 30 mm od uzdužnog ruba i 80 mm od poprečnog ruba kutnika (kanal CH 6, od-

nosno mjerno mjesto 3L, [2]), prikazano je na dijagramima na slici 11. Zbog blizine ukrućenja, i prijenosa sile preko ukrućenja u donji krak kutnika, najveći pomaci s vrijednosti oko 11 mm zabilježeni su na uzorcima s ukrućenjem. Najmanji su pomaci zabilježeni na 2. grupi uzoraka $g1s0$ koji, zbog najmanje uzdužne krutosti, imaju upola manje odizanje u osi vijaka u vrijednosti oko 5,5 mm.

Relativne su deformacije mjerene na ukrućenjima kod svih uzoraka treće i četvrte grupe (07-12). Smjer glavnih naprežanja u ukrućenju okvirno odgovara dijagonalnom smjeru tenzometarske trake, dakle kanalu CH 15 na kojem su zabilježene maksimalne relativne deformacije s vrijednostima oko 13 ‰ odnosno 9 ‰. Relativne su deformacije u ukrućenju veće za 'mekšu' grupu uzoraka $g1s1$, ali se popuštanje događa kod vrijednosti sile od



Slika 11. Odizanje kutnika u osi vijaka 80 mm od ruba, kanal CH 6



Slika 12. Relativna deformacija ukrućenja u dijagonalnom smjeru, kanal CH 15

oko 320 kN, što je znatno manje od 380 kN kada nastupa popuštanje u ukrućenju kod uzoraka grupe g0s1 (slika 12.).

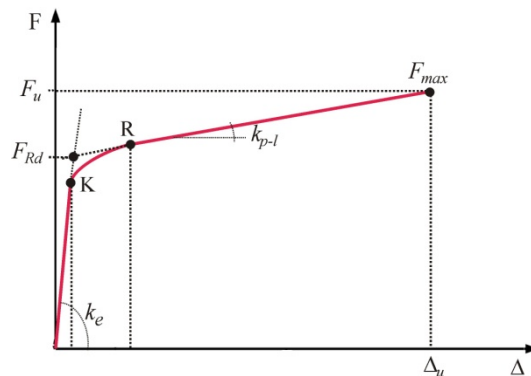
Glavne se karakteristike $F-\Delta$ krivulja za uzorke vlačno opterećenih parova kutnika nalaze u tablici 2. Nadalje, u osjenčanim redovima tablice 2. dane su srednje vrijednosti osnovnih karakteristika $F-\Delta$ krivulja za pojedine grupe uzoraka. Najmanja otpornost, F_{Rd} , zabilježena je za grupu uzoraka g1s0, nešto veća za g0s0, još veća za g1s1 i najveća za g0s1. Omjer između eks-

perimentalno utvrđenih otpornosti, F_{Rd} , za grupu g0s1 i g1s0 jest $243,41/177,79=1,37$, što znači da ukrućenje kutnika i smanjenje razmaka g u odnosu na kutnike iz grupe g1s0 povećava otpornost za 37%. Taj je omjer za grupu g1s1 nešto malo manji $242,01/177,79=1,36$, dok je za grupu g0s0 najmanji $203,66/177,79=1,15$. Povećanje otpornosti uvjetovano je prije svega smanjenjem razmaka g (razmak između ploče koja predstavlja pojasnicu nosača i pojasnice stupa) i, naravno, s ukrućenjem. Najveća vrijednost maksimalne sile, F_{max} , doseg-

Tablica 2. Glavne karakteristike $F-\Delta$ krivulja za uzorke parova kutnika u vlaku

| Oznaka uzorka | Otpornost [kN] | | | | Krutost [kN/mm] | | | Δ_u [mm] |
|---------------|----------------|-------|----------|-----------|-----------------|-----------|---------------|--------------------|
| | K - R | | F_{Rd} | F_{max} | k_e | k_{p-l} | k_e/k_{p-l} | |
| 01_g0s0 | 152 | - 225 | 200,89 | 353,66 | 168,51 | 8,01 | 21,04 | 20,49 |
| 02_g0s0 | 149 | - 227 | 203,86 | 345,31 | 168,88 | 7,79 | 21,68 | 19,41 |
| 03_g0s0 | 151 | - 224 | 206,23 | 344,56 | 154,31 | 7,78 | 19,83 | 20,08 |
| g0s0 | 151 | - 225 | 203,66 | 347,84 | 163,90 | 7,86 | 20,85 | 19,99 |
| 04_g1s0 | 121 | - 199 | 178,51 | 338,78 | 227,32 | 10,21 | 22,26 | 17,62 |
| 05_g1s0 | 117 | - 196 | 179,26 | 332,71 | 238,59 | 9,70 | 24,60 | 17,84 |
| 06_g1s0 | 108 | - 193 | 175,61 | 337,90 | 201,96 | 9,44 | 21,39 | 18,45 |
| g1s0 | 115 | - 196 | 177,79 | 336,46 | 222,62 | 9,78 | 22,75 | 17,97 |
| 07_g0s1 | 180 | - 263 | 247,56 | 445,03 | 323,72 | 9,88 | 32,77 | 21,24 |
| 08_g0s1 | 182 | - 268 | 242,22 | 438,50 | 363,54 | 10,02 | 36,30 | 20,32 |
| 09_g0s1 | 175 | - 262 | 240,46 | 447,01 | 390,17 | 10,22 | 38,18 | 20,75 |
| g0s1 | 179 | - 264 | 243,41 | 443,51 | 359,14 | 10,04 | 35,75 | 20,77 |
| 10_g1s1 | 173 | - 259 | 238,62 | 430,19 | 339,44 | 10,10 | 33,61 | 20,54 |
| 11_g1s1 | 173 | - 257 | 241,83 | 438,16 | 343,05 | 9,66 | 35,51 | 21,10 |
| 12_g1s1 | 175 | - 262 | 245,58 | 438,00 | 324,26 | 9,83 | 32,99 | 20,60 |
| g1s1 | 174 | - 259 | 242,01 | 435,45 | 335,58 | 9,86 | 34,04 | 20,75 |

| | |
|------------|--|
| Oznake: | |
| K-R | područje omekšavanja K-R (<i>knee range</i>) |
| F_{max} | maksimalna sila (otpornost) |
| F_{Rd} | otpornost određena kao sjecište pravca koji opisuju elastično područje i pravca koji opisuju postkritično područje eksperimentalne deformacijske krivulje |
| k_e | početna (elastična) krutost, nagib pravca koji je dobiven linearnom regresijskom analizom eksperimentalne deformacijske krivulje u elastičnom području do područja omekšavanja K-R |
| k_{p-l} | postkritična krutost, nagib pravca koji je dobiven linearnom regresijskom analizom eksperimentalne deformacijske krivulje u postkritičnom području od područja K-R do otkazivanja |
| Δ_u | krajnji (maksimalni) pomak |



nuta je za grupu $g0s1$ i njezina je srednja vrijednost, 443,51 kN što je u odnosu na grupu $g1s0$ 443,51/336,46 = 1,32 puta više.

Što se tiče krutosti, situacija je nešto drugačija. Početna (elastična) krutost, k_e , je najmanja za grupu $g0s0$, veća za $g1s0$, pa za $g1s1$ i na kraju najveća za grupu $g0s1$. Dakle, za početnu krutost veći doprinos ima ojačanje kutnika od smanjenja udaljenosti g . Međutim, apsurdna se situacija događa kada se razmotre grupe uzoraka bez ukrućenja ($g0s0$ i $g1s0$), gdje je zabilježeno da veću krutost ima uzorak s većom udaljenosti g (uzorak $g1s0$). Naravno da je najveća početna krutost k_e za grupu $g0s1$, i to u odnosu na grupu $g0s0$ za $359,14/163,90=2,19$ puta veća. Za postkritičnu krutost k_{p-l} situacija je ista kao kod početne krutosti k_e . Gotovo identične vrijednosti omjera k_e/k_{p-l} dobivene su po grupama uzoraka ovisno o tome ima li kutnik ukrućenje (uzorci $g0s1$ i $g1s1$) ili nema (uzorci $g0s0$ i $g1s0$). Manja srednja vrijednost omjera $k_e/k_{p-l} \approx 22$ dobivena je za kutnike bez ukrućenja, dok je za kutnike s ukrućenjem dobivena približno 60 % veća vrijednost ($k_e/k_{p-l} \approx 35$).

Vežano uz maksimalni ostvareni pomak, odnosno krajnji pomak, Δ_u , koji se poklapa s točkom maksimalne sile, dakle $\Delta_{F_{max}}$, može se reći da su te vrijednosti dosta ujednačene za pojedine grupe uzoraka. Neočekivano najveća vrijednost ostvarena je kod grupe uzoraka $g0s1$, dok je najmanja vrijednost maksimalnog pomaka zabilježena za grupu $g1s0$. Pri tome treba imati na umu da su male relativne razlike po grupama uzoraka i da se na temelju registriranih pomaka ne mogu donijeti zaključci o tome koja je grupa uzoraka najduktivnija. Međutim, može se reći da su sve grupe pokazale izuzetnu sposobnost deformacije i da se ovakav konstrukcijski detalj, odnosno ova komponenta, može svrstati u komponente s velikom duktilnošću.

4.3 Usporedba eksperimentalnih i teorijskih rezultata

Na kraju se diskutiraju otpornosti i krutosti utvrđene iz laboratorijskih ispitivanja u odnosu na teorijske vrijednosti koje su dobivene semiprobabilističkim analizama prema sedam razmatranih teorijskih modela [2]. Osnovni cilj provedenih semiprobabilističkih analiza bio je

dobiti teorijske vrijednosti otpornosti i krutosti sa stvarnim geometrijskim i mehaničkim svojstvima ispitanih laboratorijskih uzoraka para kutnika u vlaku

Tablica 3. Sažetak usporedbe eksperimentalnih F_{Rd} i teorijskih otpornosti prema razmatranim modelima

| Oznaka uzorka | Model otpornosti | | | | | | |
|---------------|------------------|----------|-------------|--------|------|------|-------------|
| | EC3 | | Faella | Coelho | AISC | Chen | Swanson |
| | Metoda 1 | Metoda 2 | | | | | |
| g0s0 | 1,17 | 0,97 | 0,84 | 1,04 | 1,34 | 0,59 | 1,02 |
| g1s0 | 1,40 | 1,21 | 1,01 | 1,25 | 1,17 | 0,52 | 1,32 |
| g0s1 | 1,07 | 0,89 | 0,93 | 0,96 | – | – | – |
| g1s1 | 1,13 | 0,98 | 1,00 | 1,01 | – | – | – |

(savijanju). Napominje se da su ove analize provedene na originalnim Excel (Microsoft Office) rutinama koje su razvijene ponajprije radi odabira laboratorijskih uzoraka i planiranja laboratorijskih ispitivanja.

Radi ograničenosti prostora potrebnog za prikazivanje čitavog postupka provedenih semiprobabilističkih analiza prikazuju se samo krajnji rezultati. U tablici 3. dane su, za svaku grupu uzoraka, srednje vrijednosti omjera eksperimentalno utvrđene otpornosti F_{Rd} i teorijske vrijednosti $F_{Rd,model}$ utvrđene prema razmatranim modelima. Optimalni je model za grupu uzoraka $g0s0$ Swansonov model sa srednjom vrijednosti omjera 1,02. Faellin model, odnosno modificirani Faellin model, čini se 'idealnim' za procjenu otpornosti grupa s većim razmakom g , odnosno grupa $g1s0$ (1,01), $g1s1$ (1,00). Većina razmatranih modela precjenjuje otpornosti za grupu uzoraka $g0s1$. Jedino modificirani Eurocode 3 model – metoda 1 malo podcjenjuje otpornost grupe uzoraka $g0s1$ što ga čini najprikladnijim modelom otpornosti za tu grupu uzoraka.

Tablica 4. Sažetak usporedbe eksperimentalnih i teorijskih rezultata prema modelima krutosti

| Oznaka uzorka | Model krutosti | | | |
|---------------|----------------|-------------|-------------|-------------|
| | EC3 | | Faella | Coelho |
| | Metoda 1 | Metoda 2 | | |
| g0s0 | 0,35 | 0,35 | 0,92 | 0,35 |
| g1s0 | 0,99 | 0,99 | 2,75 | 0,99 |
| g0s1 | 0,63 | 0,63 | 1,05 | 0,63 |
| g1s1 | 0,97 | 0,97 | 1,50 | 0,97 |

U tablici 4. je sažetak eksperimentalnih i teorijskih rezultata vezanih uz krutost i to preko srednje vrijednosti

omjera eksperimentalne početne krutosti, k_e , i početne krutosti proračunane s izmjerenim svojstvima prema razmatranim modelima, $k_{e,model}$. Zapravo radi se o dvama modelima krutosti - Eurocodeovu i Faellinu modelu. Procjena početne krutosti preko Eurocodeovih modela (standardnog i modificiranog) daje vrijednosti koje su za grupe uzoraka s manjim rasponom g veće od eksperimentalnih, što znači da je početna krutost znatno precijenjena. Međutim, Eurocodeovi modeli izuzetno dobro procjenjuju otpornost za grupe uzoraka s većim rasponom g ($g1s0$ i $g1s1$). S druge strane, Faellini modeli (standardni i modificirani) dosta dobro procjenjuju početnu krutost za grupe uzoraka s malim razmakom g (grupe $g0s0$ i $g0s1$). Međutim, ovi modeli znatno podcjenjuju početnu krutost za uzorke $g1s1$ (1,50), a osobito za $g1s0$ (2,75).

5 Zaključak

Provedena laboratorijska ispitivanja obuhvaćala su ispitivanja dvanaest (12) vlačno opterećenih parova kutnika. Prvi su put ispitane četiri grupe uzoraka s obzirom na razlike u razmaku između nosača i pojasnice stupa, g , i s obzirom na postojanje ukrućenja (standardni i modificirani kutnik).

Rezultati laboratorijskih ispitivanja uspoređeni su s teorijskim rezultatima dobivenim prema postojećim modelima za procjenu ponašanja standardnog kutnika pri savijanju. Dan je originalni prijedlog modificiranih modela otpornosti i modela krutosti za procjenu ponašanja modificiranih kutnika pri savijanju. I ovi su modificirani modeli vrednovani s obzirom na rezultate originalno provedenih laboratorijskih ispitivanja.

Predlažu se optimalni modeli za procjenu otpornosti i krutosti koji su se pokazali pouzdani na temelju dobivenog faktora modela. Faktori modela u biti su vrijednosti koje su dobivene iz omjera zabilježenih eksperimental

nih i proračunanih teorijskih vrijednosti s izmjerenim svojstvima elemenata uzoraka vlačno opterećenih parova kutnika (tablice 3. i 4.).

Dakle, za procjenu otpornosti standardnog kutnika (bez ukrućenja) pri savijanju predlaže se:

$g0s0$ - Swansonov model otpornosti

$g1s0$ - Faellin model otpornosti

Za procjenu krutosti standardnog kutnika (bez ukrućenja) pri savijanju predlaže se:

$g0s0$ - Faellin model krutosti

$g1s0$ - Eurocodeov model krutosti

Uz usvajanje predloženog izraza (2) za određivanje duljine linije popuštanja za procjenu otpornosti modificiranog kutnika (s ukrućenjem) mogu se predložiti sljedeći modeli:

$g0s1$ - Modificirani Eurocode 3 model

otpornosti - metoda 1

$g1s1$ - Modificirani Faellin model otpornosti

Za procjenu krutosti modificiranog kutnika pri savijanju uz usvajanje predloženih izraza, (2), odnosno (3), za određivanje duljine linije popuštanja predlaže se:

$g0s1$ - Modificirani Faellin model krutosti

$g1s1$ - Modificirani Eurocodeov model krutosti

Iako je iz usporedbi teorijskih s eksperimentalnim vrijednostima otpornosti i krutosti dobiven pokazatelj o pouzdanosti modela, treba biti svjestan da to nije 'prava' mjera razine pouzdanosti. Za korektni prijedlog optimalnih modela potrebno je provesti detaljne probabilističke analize, gdje su pojedine vrijednosti tretirane kao bazne varijable s pripadnom stohastičkom prirodom, kao što je to učinjeno u radu [9] za zavareni priključak nosač-stup. Naravno da se kod tih analiza treba koristiti spoznajama o faktorima nepouzdanosti modela otpornosti i krutosti koji proizlaze iz ovog rada. Jedino se tako može donijeti znanstveno argumentirana odluka o optimalnom modelu.

LITERATURA

- [1] Skejić, D.; Dujmović, D.; Javora A.: *Otpornost pojasnog kutnika kod vijčanih čeličnih priključaka*, Građevinar 60(3), 219-230, 2008.
- [2] Skejić, D.: *Procjena pouzdanosti priključaka nosač-stup izvedenih kutnicima*, Doktorski rad, Građevinski fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 2009.
- [3] Girão Coelho, A.M.: *Characterization of the ductility of bolted end plate beam-to-column steel connections*, PhD Thesis. University of Coimbra, Coimbra, Portugal, 2004.
- [4] European Committee for Standardization (CEN): *EN 1993-1-8:2005, Eurocode 3: Design of steel structures, Part 1.8: Design of joints*, May 2005, Brussels, 2005.
- [5] Girão Coelho, A.M.: *Characterization of the ductility of bolted end plate beam-to-column steel connections*, PhD Thesis. University of Coimbra, Coimbra, Portugal, 2004.
- [6] Faella, C.; Piluso, V.; Rizzano, G.: *Structural Steel Semirigid Connections, Theory, Design and Software*, CRC Press LLC, 2000 N.W. Corporate Blvd., Boca Raton, Florida 33431, 2000.
- [7] Bursi, O. S.; Jaspert, J. P.: *Benchmarks for Finite Element Modelling of Bolted Steel Connections*; Journal of Constructional Steel Research, Vol. 43, No. 1-3, 17-42, 1997.
- [8] Zoetemeijer, P.: *Summary of the research on bolted beam-to-column connections*, Report 25-6-90-2. Faculty of Civil Engineering, Stevin Laboratory - Steel Structures, Delft University of Technology, Delft, 1990.
- [9] Skejić, D.; Dujmović, D.; Androić, B.: *Reliability of the bending resistance of welded beam-to-column joints*, Journal of Constructional Steel Research, Vol.64, No.4, (2008), 388-399.