

Primljen / Received: 27.12.2011.

Ispravljen / Corrected: 22.2.2012.

Prihvaćen / Accepted: 12.3.2012.

Dostupno online / Available online: 25.4.2012.

Specifičnosti ponašanja veza tankostijenih čeličnih elemenata

Autori:



Prof. dr. sc. **Zlatko Marković**, dipl.ing. građ.¹
zlatko@imk.grf.bg.ac.rs



Prof. dr. sc. **Dragan Buđevac**, dipl.ing. građ.¹
budjevac@grf.bg.ac.rs



Mr. sc. **Jelena Dobrić**, dipl.ing. građ.¹
jelena@imk.grf.bg.ac.rs



Nenad Fric, dipl.ing. građ.¹
fric@imk.grf.bg.ac.rs



Prof. dr. sc. **Miloš Knežević**, dipl.ing. građ.²

¹Sveučilište u Beogradu, Građevinski fakultet

²Sveučilište Crne Gore, Građevinski fakultet

Prethodno priopćenje

Zlatko Marković, Dragan Buđevac, Jelena Dobrić, Nenad Fric, Miloš Knežević

Specifičnosti ponašanja veza tankostijenih čeličnih elemenata

Kod veza tankostijenih elemenata je, zbog male debljine lima, prisutno niz specifičnosti. U radu su prikazana teorijska i eksperimentalna istraživanja ponašanja spoja tankostijenih čeličnih elemenata ostvarenih pomoću mehaničkih spojnih sredstava: vijaka i samonarezujućih vijaka. Analizirani su posmični i vlačno opterećeni spojevi. Rezultati ispitivanja uspoređeni su s aktualnim europskim i američkim propisima. Određene su i karakteristične nosivosti samonarezujućih vijaka na posmik i vlak.

Ključne riječi:

tankostijeni čelični elementi, veze, vijci, samonarezujući vijci, posmik, vlak

Preliminary note

Zlatko Marković, Dragan Buđevac, Jelena Dobrić, Nenad Fric, Miloš Knežević

Specific behaviour of thin-walled member joints with fasteners

Due to small plate thickness, thin-walled members are characterized by some specific features. The theoretical and experimental study of behaviour of thin-walled member connections with mechanical fasteners, bolts and selftapping screws, is presented in the paper. The shear and tensile behaviour of connections is analyzed. Experimental results are compared with current European and American design codes. Characteristic shear and tensile resistance values of selftapping screws are also defined.

Key words:

thin-walled steel members, joints, bolts, selftapping screws, shear, tension

Vorherige Mitteilung

Zlatko Marković, Dragan Buđevac, Jelena Dobrić, Nenad Fric, Miloš Knežević

Spezifisches Verhalten von dünnwandigen Stahlelementen mit Verbindungsmitteln

Bei Verbindungen dünnwandiger Elemente ist wegen der geringen Blechstärke eine Reihe von Spezifitäten präsent. In der Arbeit sind theoretische und experimentelle Forschungen über das Verhalten von Verbindungen dünnwandiger Stahlelemente dargestellt, die mittels mechanischen Verbindungsmittel verwirklicht wurden: Schrauben und selbstschneidenden Schrauben. Es wurden schub- und zugspannungsbelastete Verbindungen analysiert. Die Forschungsergebnisse wurden mit aktuellen europäischen und amerikanischen Vorschriften verglichen. Es wurden auch charakteristische Tragfähigkeiten selbstschneidender Schrauben bezüglich Schub und Zugspannung festgesetzt.

Schlüsselwörter:

Dünnwandige Stahlelemente, Verbindungen, Schrauben, selbstschneidende Schrauben, Schub, Zugspannung

1. Uvod

Pri proračunu i projektiranju spojeva tankostijenih čeličnih hladno oblikovanih elemenata ne mogu se primijeniti pravila i metode koje vrijede za veze elemenata od vruće valjanih ili zavarenih profila. Potencijalni se načini loma kod posmičnih i vlačnih spojeva tankostijenih elemenata razlikuju u odnosu prema klasičnim čeličnim konstrukcijama. Da bi se dobili najpovoljniji, ekonomski opravdani spojevi, kod kojih su izjednačene nosivosti mehaničkih spojnih sredstava i osnovnog materijala, mehanička spojna sredstva, kao što su vijci, treba prilagoditi ovom tipu spojeva, a otvara se mogućnost primjene i drugih mehaničkih spojnih sredstava. S obzirom da je kod takvih veza najčešće mjerodavan način loma po osnovnom materijalu, dimenzije su spojnih sredstava manje u odnosu na one koje se obično primjenjuju u zgradarstvu. Uglavnom se rabe: vijci (eng. *bolts*), samorezni vijci (eng. *self-tapping screws*), pop-zakovice (eng. *blind rivets*) i čavli s eksplozivnim upucavanjem (eng. *cartridge fired pins*).

Samorezni vijci formiraju navoj u limu za koji se vežu urezivanjem ili bušenjem. Nazivni se promjeri kreću od 2,2 do 8 mm, a najčešće se primjenjuju samorezni vijci promjera 6,3 mm. Izrađuju se od ugljičnih ili legiranih čelika za cementiranje. Rabe se u spojevima opterećenim na posmik i vlak, a posebno je važna njihova uloga kod konstrukcija kod kojih se primjenjuje *stressed-skin* koncept projektiranja.

U prvim eksperimentalnim ispitivanjima posmičnih spojeva, koja su provedena neposredno nakon II. svjetskog rata u SAD-u [1], uočeni su osnovni načini loma (slika 1.). Pokazano je da pojava određenog tipa loma ovisi o promjeru i klasi čvrstoće spojnog sredstva, debljini i kvaliteti osnovnog materijala i razmaku spojnih sredstava. Imajući na umu specifičnosti ponašanja takvih spojeva, proteklih dvadesetak godina intezivirana su eksperimentalna i numerička istraživanja u ovom području [2 do 10]. Cilj je ovih istraživanja bio da se prodube i upotpune postojeća znanja, dorade ili revidiraju važeći propisi i proširi njihovo područje primjene.

Početa su ispitivanja obuhvatila veze s običnim i samoreznim vijcima. Variranjem udaljenosti vijka od ruba lima u pravcu

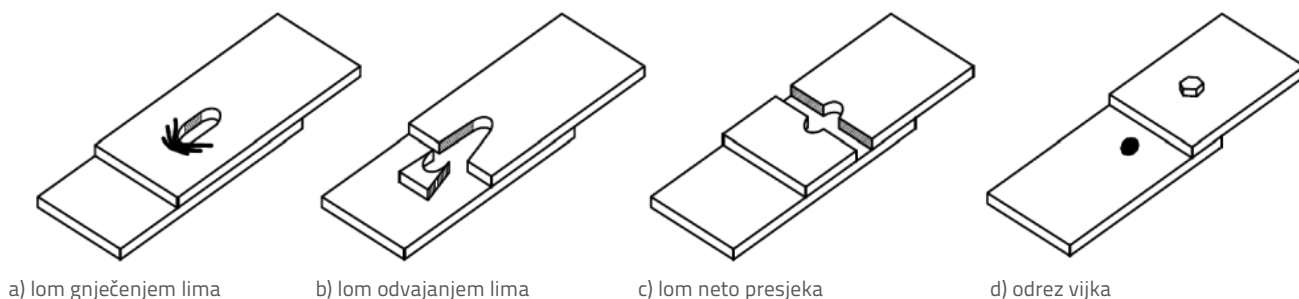
djelovanja sile, F. Zadanfarrokh, E.R. Bryan [2] potvrđuju da se lom zbog odvajanja lima očekuje kada je odnos ove udaljenosti i polumjera vijka manji od 2,5, dok se za veće vrijednosti ovog odnosa pojavljuje lom gnječenjem lima u okolini rupe. C. Rogers, J. Hancock [3, 4, 5, 6] proveli su opsežna ispitivanja posmičnih spojeva s limovima male debljine ($t < 1$ mm) i različitom kvalitetom osnovnog materijala. Ova su ispitivanja dala dragocjen doprinos u proširenju područja primjene kod limova malih debljina. Rezultati utjecaja podloška na mehanizme loma zbog gnječenja omotača rupe kasnije su verificirani u analizama koje su proveli J.A. Wallace, R.M. Schuster, L.A. LaBoube [7] i uključeni u posljednje revidirano izdanje američkih propisa [11].

U Europi, A.W. Tomà [8] provodi ispitivanja veza s vijcima i pop-zakovicama. Ispitivale su se veze na preklop s jednim spojnim sredstvom, a varirani su sljedeći parametri: debljina lima, udaljenost vijka od ruba lima u pravcu djelovanja sile i širina uzorka. Ispitivale su se veze s jednostrukim prijevojem lima na kraju, kao i veze s kontinuiranim dvostrukim zakošenim prijevojem. Prvenstveni je cilj ovih istraživanja bio da se prouči ponašanje veza kod izuzetno tankih limova, kao i u slučajevima malih udaljenosti vijaka od ruba lima ili pop-zakovica i da se obuhvati utjecaj prijevoja. Osnovne specifičnosti u ponašanju posmičnih spojeva sa samoreznim vijcima definirali su T. Pekoz [9], M.R. Babalola i R.A. LaBoube [10]. Rezultati njihovih istraživanja činili su bazu za formiranje računskih izraza za različite mehanizme loma.

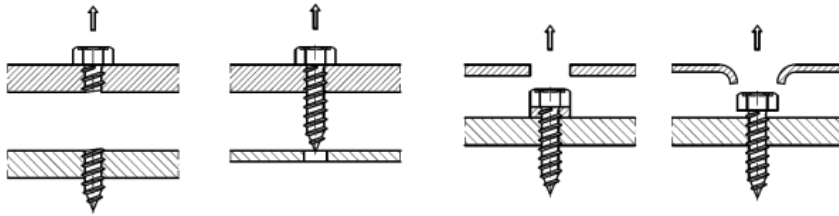
Kod spojeva opterećenih na vlak sa samoreznim vijcima, ovisno o promjeru vijka, debljini i kvaliteti materijala limova koji se spajaju, mogu se pojaviti četiri oblika loma, prema [9], koji su prikazani na slici 2.

Značajan su doprinos u tumačenju ponašanja vlačno opterećenih spojeva dali R. Francka, R.A. LaBoube [12] koji su analizirali i interaktivno djelovanje posmika i čupanja kod samoreznih vijaka.

Trenutačne svjetske spoznaje iz ovog područja sažete su u europskom standardu EN 1993-1-3 [13] i propisima Američkog instituta za željezo i čelik (eng. American Iron



Slika 1. Karakteristični načini loma kod posmičnih spojeva s mehaničkim spojnim sredstvima



a) lom vijka zatezanjem b) lom čupanjem vijka c) lom probijanjem d) lom provlačenjem

Slika 2. Načini loma kod vlačnih spojeva sa samoreznim vijcima

and Steel Institute) - AISI [11]. U njima su dana pravila za proračun mehaničkih spojnih sredstava u posmičnim spojevima i vlačnim spojevima, i to za suvremena mehanička spojna sredstva (vijke, samorezne vijke, pop - zakovice i čavle) koja se primjenjuju kod tankostijenih hladno oblikovanih profila i limova. Međutim, za određene oblike loma nisu dani izrazi za proračun, već se preporučuje eksperimentalno određivanje nosivosti ([13], Poglavlje 8., tablica 8.2).

Aktualnost ove problematike, kao i težnja da se prodube trenutačne spoznaje i dopune praznine u postojećim propisima navode na potrebu za daljim istraživanjima u ovom području. Ispitivanja prikazana u ovome radu nastoje dati odgovore na sva neriješena pitanja. Njihov je osnovni cilj da se utvrde sličnosti i razlike u ponašanju vijaka i samoreznih vijaka, provjere načini loma i odrede nosivosti standardnih samoreznih vijaka, kako bi se omogućila njihova veća primjena u građevinskim konstrukcijama.

2. Prikaz eksperimentalnih ispitivanja

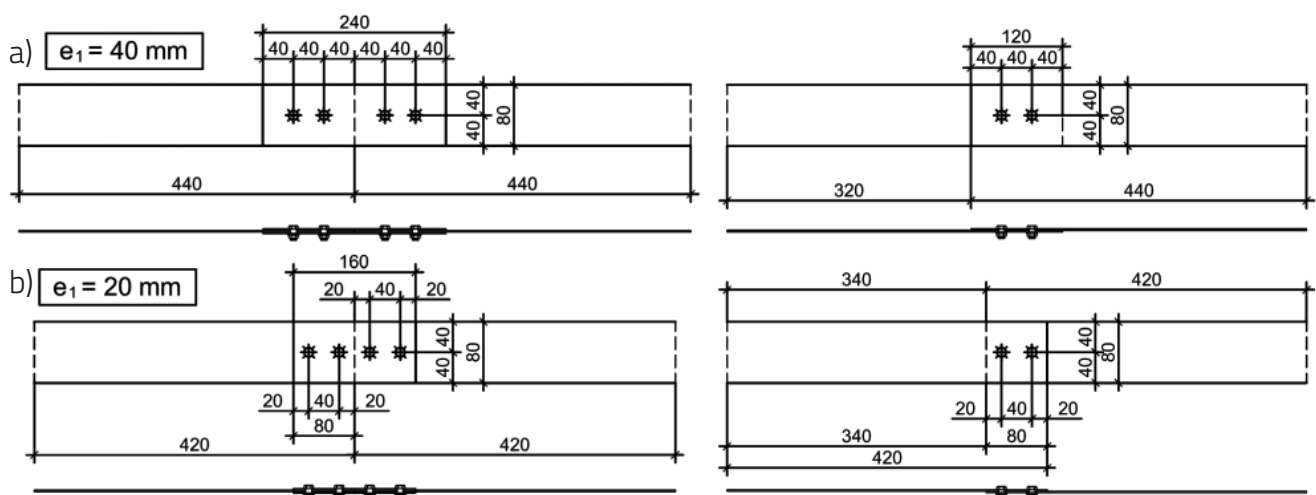
Eksperimentalnim istraživanjima, koja su provedena na Građevinskom fakultetu u Beogradu, primarno su

obuhvaćeni posmični spojevi s običnim i samoreznim vijcima, dok je problem vlačnih spojeva obrađen fenomenološki na manjem broju uzoraka da bi se potvrdili potencijalni oblici loma i odredila nosivost samoreznih vijaka na vlak. Kod posmičnih su spojeva (oznaka uzorka počinje sa *S* - *shear*) varirana četiri parametra koja bitno utječu na njihovu nosivost (slika 3.):

- vrsta spojnog sredstva: obični vijci (*B* - *bolts*) i samorezni vijci (*S*, *T* - *screw*)
- tip spoja: na preklop (*L* - *lap*) i s vezicama (*S* - *splices*)
- debljina lima: $t = 2$ mm i 4 mm (debljina vezica jednaka je debljini lima koji se nastavlja)
- udaljenost vijka od ruba lima: $e_1 = 20$ mm i 40 mm (oznake 1 i 2, respektivno).

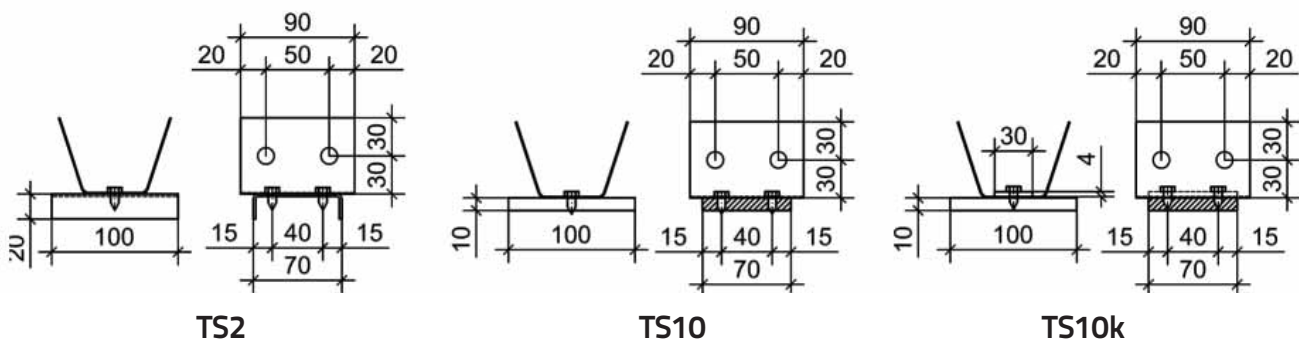
Svi su spojevi izvedeni sa po dva vijka. Da bi se pokazala opravdanost primjene spojnih sredstava manjih promjera upotrijebljeni su obični vijci M8, nominalne klase čvrstoće 5.8 i samorezni vijci promjera 6,3 mm (tip A - vrh navoja sa šiljkom), prema DIN 7976/ISO1479.

Ispitivanje spojeva s vlačno opterećenim samoreznim vijcima provedeno je na tri serije uzoraka (slika 4.). Kod ovih je uzoraka varirana debljina donjega, nosivog lima u koji se vijak urezuje (2 i 10 mm), dok su oblik i dimenzije gornjeg profiliranog lima bili isti za sve uzorke (standardni trapezni lim debljine 0,85 mm). Kod serije TS10k ispod glava samoreznih vijaka postavljene su čelične kontrapločice debljine 4 mm da bi se spriječio lom probijanjem glave vijka i odredila nosivost samoreznih vijaka na vlak. Za ispitivanje ovih uzoraka konstruiran je poseban alat. Sva ispitivanja provedena su na elektronskim kralicama Shenck-Trebel



Značenje oznake SBS2-1: posmični spoj s vijcima i vezicama, debljina limova 2 mm i krajnji razmak 20 mm

Slika 3. Uzorci ispitivanih veza s mehaničkim spojnim sredstvima opterećenim na posmik a) spojevi s vezicama (S), b) spojevi na preklop (L)



Slika 4. Uzorci spojeva ili priključaka sa samoreznim vijcima opterećenim na vlak

nosivosti 100 kN i 400 kN (slika 5.). Pri svim je ispitivanjima brzina deformacije iznosila 15 mm/min, a to je uobičajeno za statička opterećenja.

izrezane su iz ploča limova debljine 2 mm (CR250) i 4 mm (S275JRG2), i to za uzdužni (L) i poprečni (T) smjer valjanja, kao i iz profiliranoga trapeznog lima debljine 0,85 mm (slika 6.).



Slika 5. Elektronska kidalica RM400 nosivosti 400 kN

Na slici 7. prikazani su $\sigma - \epsilon$ dijagrami, kao i srednje vrijednosti mehaničkih svojstava dobivene na temelju ispitivanja po tri uzorka.



Slika 6. Ispitane epruvete od limova debljine 2 mm (T2-L), 4 mm (T4-L) i 0,85 mm (T1)

Na temelju dobivenih rezultata ispitivanja statističkom analizom, prema EN 1993-1-3, Dodatak A [13], određene su karakteristične vrijednosti nosivosti na temelju izraza koji se primjenjuje za serije s najmanje 4 uzorka:

$$F_k = F_m - ks \tag{1}$$

gdje je:

F_m - srednja vrijednost

s - standardna devijacija

k - koeficijent koji ovisi o broju uzoraka (za serije s 4 uzorka $k=2,63$).

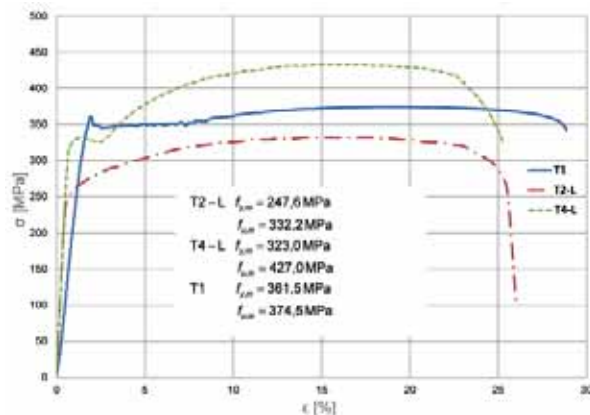
Kod serija s tri uzorka, karakteristične se vrijednosti nosivosti određuju izrazom:

$$F_k = \eta_k F_m \tag{2}$$

gdje je $\eta_k = 0,9$.

2.1. Mehanička svojstva osnovnog materijala

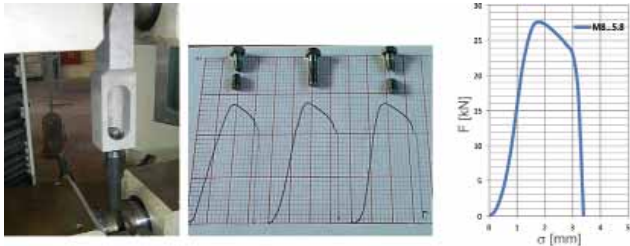
Mehanička svojstva materijala od kojeg su izrađeni uzorci određena su ispitivanjem. Epruvete standardnih dimenzija



Slika 7. $\sigma - \epsilon$ dijagrami i mehanička svojstva uzoraka osnovnog materijala uzetih iz čeličnih limova

2.2. Mehanička svojstva spojnih sredstava

Da bi se ustanovila nosivost primijenjenih vijaka s metričkim navojem na vlak i njihova mehanička svojstva, izvršeno je njihovo ispitivanje na vlak (slika 8.). Nosivost samoreznih vijaka na vlak određena je na temelju ispitivanja uzoraka u vlačnim spojevima TS10k.



$F_u = 27,36 \text{ kN}$ $f_u = 747,3 \text{ MPa}$ $\delta_u = 1,80 \text{ mm}$

Slika 8. Ispitivanje nosivosti običnih vijaka i F- δ dijagrami

Pri ispitivanju vijaka uočena su izuzetno mala odstupanja rezultata. Na slici 8. prikazani su karakteristični dijagrami

sila-deformacija $F-\delta$ za vijke M8..5.8 kao i srednje vrijednosti rezultata ispitivanja: granična nosivost na vlak F_u , vlačna čvrstoća f_u i deformacija pri graničnoj sili loma δ_u . Dobivene su vrijednosti vlačne čvrstoće znatno veće od nazivne vrijednosti (49,5%) što pokazuje važnost eksperimentalnog određivanja stvarnih mehaničkih karakteristika zbog kasnijeg tumačenja rezultata ispitivanja.

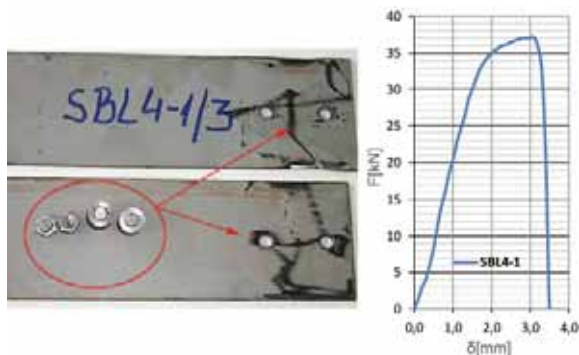
2.3. Posmični spojevi s vijcima (SB)

Rezultati ispitivanja prikazani su u tablici 1. Osim granične vrijednosti sile F_u za svaki uzorak, dane su i srednja vrijednost F_m , standardna devijacija s , varijanca V i karakteristična vrijednost sile F_k . Također su naznačeni i načini loma.

Tablica 1. Rezultati ispitivanja spojeva s vijcima

Seriya	Tip veze	t [mm]	e_t [mm]	Tip loma	F_u [kN]	δ_u [mm]	F_m [kN]	s [kN]	V [%]	F_k [kN]
SBS2-1	Vezice	2	20	Kidanje lima	27,40	22	27,85	0,42	1,51	26,74
					27,60	27				
					28,30	28				
					28,10	25				
SBS2-2	Vezice	2	40	Neto presjek	43,20	65	41,92	1,33	3,17	38,42
					42,80	66				
					40,30	52				
					41,40	62				
SBL2-1	Preklop	2	20	Savijanje lima i probijanje glave vijka	23,50	14	24,03	0,36	1,50	23,08
					24,20	15				
					24,10	14				
					24,30	13				
SBL2-2	Preklop	2	40	Savijanje lima i probijanje glave vijka	24,10	12	24,65	1,00	4,05	22,02
					23,90	12				
					26,10	13				
					24,50	12				
SBS4-1	Vezice	4	20	Odrez tijela vijka	63,10	9,8	63,77	2,16	3,38	59,06
					63,10	8,8				
					60,30	7,4				
					63,80	8,0				
SBS4-2	Vezice	4	40	Odrez tijela vijka	65,20	6,6	63,77	2,16	3,38	59,06
					64,30	7,0				
					66,60	6,8				
					63,70	7,1				
SBL4-1	Preklop	4	20	Odrez tijela vijka	37,30	3,0	37,28	0,64	1,71	35,89
					36,30	3,1				
					37,20	2,8				
					37,30	3,0				
SBL4-2	Preklop	4	40	Odrez tijela vijka	37,30	2,6	37,28	0,64	1,71	35,89
					37,30	2,6				
					37,20	2,5				
					38,30	2,9				
					37,40	2,9				

Kod limova debljine 4 mm do loma dolazi uslijed odreza vijaka, neovisno o tipu veze i udaljenosti vijka od ruba lima (slika 9.). Površina je loma ravna i glatka, a deformacije su male i kreću se oko 3 mm kod spojeva na preklop, tj. oko 7 mm kod spojeva s vezicama.



Slika 9. Lom uslijed odreza vijaka kod spojeva na preklop i dijagram sila-deformacija F-δ

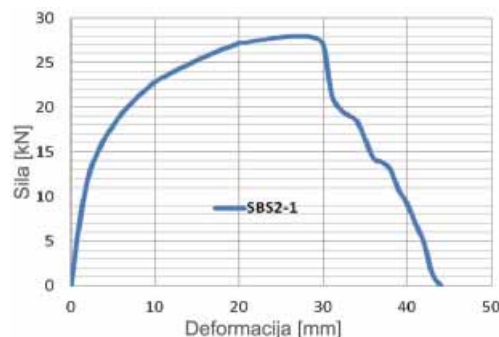
Kod spojeva na preklop nema uočljivih deformacija u osnovnom materijalu, oblik rupa za vijke i nakon loma ostaje nepromijenjen – kružan. Kako su kod spojeva s vezicama vijci dvorezni jer imamo dvije ravnine posmika, naprezanje u osnovnom materijalu pri lomu znatno je veće, a to dovodi do deformacije u zonama oko rupa za spojna sredstva pa je ukupna deformabilnost spoja veća. Zbog toga treba razmotriti i sile pri deformacijama od 3 mm (tablica 2.). Osim toga, valja napomenuti da kod dvoreznih vijaka jedna ravnina posmika prolazi kroz dio tijela vijka bez navoja, a druga kroz dio s navojem, pa stoga nosivost dvoreznog vijka nije dvostruko veća od nosivosti jednoreznog kod kojega se posmik vrši na dijelu tijela bez navoja.

Kod limova debljine 2 mm do loma dolazi po osnovnom materijalu. U slučaju spojeva s vezicama pojavljuje se lom kidanjem lima (slika 10.) ili lom neto presjeka (slika 11.), dok se kod spojeva na preklop zbog ekscentriciteta pojavljuju lom savijanjem i probijanjem glave vijka (slika 12.). Svi navedeni tipovi lomova praćeni su izrazito velikim deformacijama koje se kreću od 20 do gotovo 70 mm.

Tablica 2. Srednje ($F_{ser,3,m}$) i karakteristične (F_k) vrijednosti nosivosti vijaka na posmik pri deformacijama od 3 mm

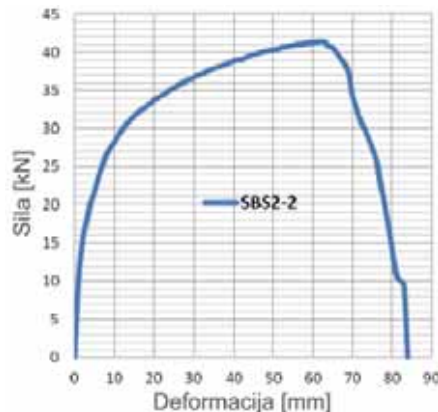
Seriya	$F_{ser,3}$ [kN]	δ_u [mm]	$F_{ser,3,m}$ [kN]	s [kN]	V [%]	F_k [kN]
SBS4-1 SBS4-2	50,00	9,7	48,30	3,26	6,76	41,18
	51,00	9,4				
	52,20	7,4				
	44,30	6,5				
	45,00	6,9				
	47,30	6,7				

Stoga je, kada je u pitanju lom po osnovnom materijalu, posebno važan podatak vrijednost sile pri deformaciji od 3 mm.



Slika 10. Lom kidanjem lima

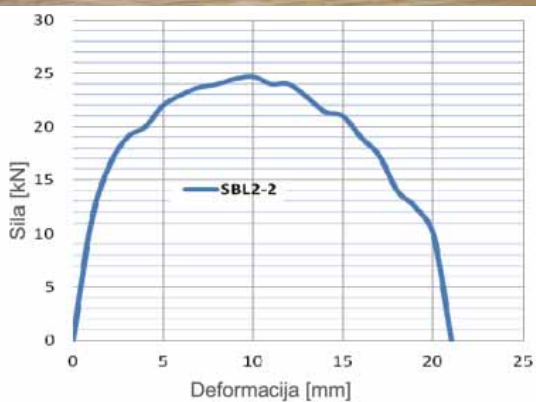
Do loma po neto poprečnom presjeku došlo je kod uzoraka serije SBS2-2 kod koje je udaljenost vijka od ruba lima $e_7=40$ mm. Pri lomu zbog plastifikacije čeličnog materijala uočene velike deformacije od 65 mm (slika 11.).



Slika 11. Lom neto presjeka

Kod svih ispitivanih uzoraka spojeva na preklop izrađenih od tankih limova ($t = 2$ mm), zbog ekscentričnog naprezanja dolazi do savijanja lima, rotacije vijaka koji se okreću približno u pravcu djelovanja vlačne sile i konačno, poslije znatnih deformacija, do probijanja glave vijaka kroz lim osnovnog materijala.

Kada je udaljenost vijka od ruba lima dovoljno velika omogućava se formiranje kompletne, približno kružne slike plastičnog proboja ispod glava vijaka (slika 13.a). U slučaju male udaljenosti vijka od ruba lima, slika proboja se deformira jer nakon proboja dolazi do odvajanja (kidanja) dijela osnovnog materijala između prve rupe i slobodnog ruba elementa (slika 13.b).



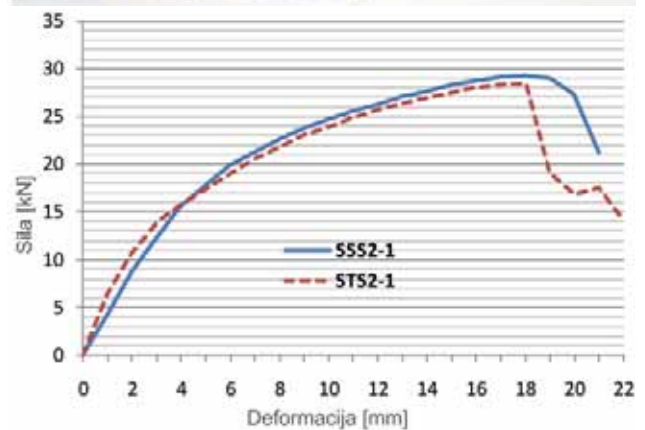
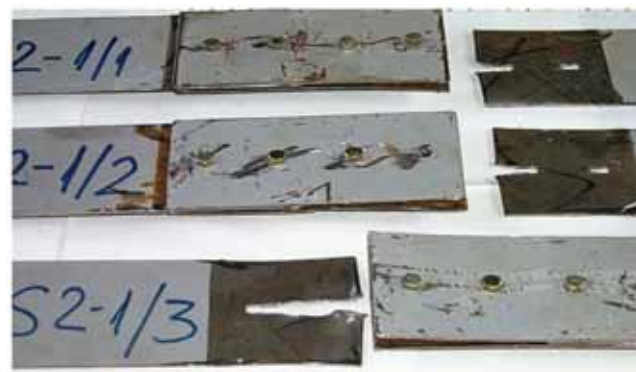
Slika 12. Lom savijanjem lima kod spojeva na preklop



Slika 13. Probijanje glave vijaka a) veliki krajnji razmak, b) mali krajnji razmak

2.4. Posmični spojevi sa samoreznim vijcima (SS i ST)

Ispitivanjem su obuhvaćeni samorezni vijci promjera 6,3 mm (prema DIN 7976/ISO1479) koji se najčešće primjenjuju. Broj ispitivanih uzoraka veći je nego kod spojeva s običnim vijcima. Ispitivale su se dvije grupe samoreznih vijaka (tip S i tip T) različitih proizvođača. Na ovaj je način povećan broj uzoraka i analizirana njihova nosivost. Ispostavilo se da je nosivost samoreznih vijaka obaju ispitivanih tipova veoma slična i da nema znatnih odstupanja što se tiče kvalitete. Stoga su rezultati obiju ispitivanih grupa samoreznih vijaka sjedinjeni pri statističkim analizama podataka. U tablici 3. su granične vrijednosti sila F_u za svaki uzorak, srednja vrijednost F_m , standardna devijacija s , varijanca V i karakteristična vrijednost F_k .



Slika 14. Lom kidanjem lima i usporedba F- δ dijagrama serija SSS2-1 i STS2-1

Kod serija uzoraka s vezicama i malim rubnim razmakom koje su izrađene od limova debljine 2 mm (serije SSS2-1 i STS2-1) do loma dolazi kidanjem lima u rubnoj zoni. Vrijednosti su graničnih sila kod obaju tipova vijaka vrlo slične. Na slici 14. prikazana je usporedba karakterističnih F- δ dijagrama serija SSS2-1 i STS2-1. Kod limova debljine 4 mm nije došlo do loma kidanjem lima ni pri malim udaljenostima vijka od ruba lima (20 mm), već posmikom samoreznih vijaka (slika 15.). Kod spojeva s podvezicama, vrijednosti sile loma približno su dvostruko veće od spojeva s preklopom.

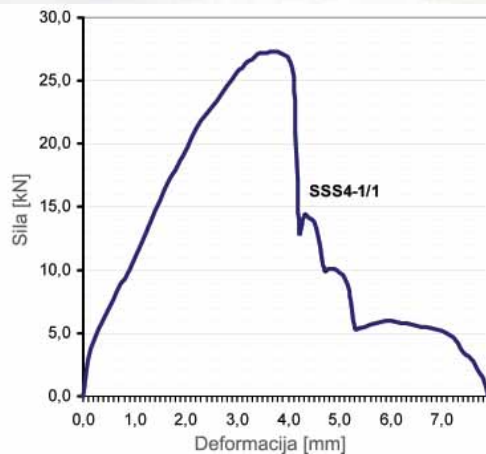
Tablica 3. Rezultati ispitivanja spojeva sa samoreznim vijcima

Serija	Tip veze	t [mm]	e_1 [mm]	Tip loma	F_u [kN]	δ_u [mm]	F_m [kN]	s [kN]	V [%]	F_k [kN]			
SSS2-1	Vezice	2	20	Kidanje lima	28,8	16	28,18	0,92	3,3	26,17			
					28,1	18							
29,2					16								
26,5					13								
28,2					16								
28,3					18								
STS2-1													
SSL2-1	Preklop	2	20	Odrez tijela vijka	13,6	2,0	12,97	0,78	6	11,68			
SSL2-2			40		13,3	4,2							
						12,5					4,1		
						14,3					4,4		
						13,1					3,9		
						15,3					4,0		
SSS4-1	Vezice	4	20	Odrez tijela vijka	27,40/2=13,70	3,7	12,97	0,78	6	11,68			
STS4-1												26,10/2=23,05	4,0
												27,20/2=13,60	3,9
												24,70/2=12,35	4,1
												24,40/2=12,20	4,0
												22,00/2=11,00	3,8
SSS4-2	Preklop	4	40	Odrez tijela vijka	29,10/2=14,55	3,2	12,97	0,78	6	11,68			
STS4-2												26,30/2=13,15	3,0
												26,60/2=13,30	4,0
												24,70/2=12,35	4,4
												23,80/2=11,90	3,8
												23,40/2=11,70	3,7
SSL4-1	Preklop	4	20	Odrez tijela vijka	11,8	1,5	12,97	0,78	6	11,68			
STL4-1												12,6	1,4
												12,9	1,4
												13,2	1,8
												13,3	2,3
												14,1	2,0
SSL4-2	Preklop	4	40	Odrez tijela vijka	13,5	1,9	12,97	0,78	6	11,68			
STL4-2												12,3	1,6
												12	1,5
												12,7	1,7
												12,6	1,4
												12,7	1,6

Interesantno je ponašanje spojeva s vezicama koje su izrađene od lima debljine 2 mm, a kod kojih je udaljenost vijka od ruba lima 40 mm. Kod uzoraka ovih serija do loma dolazi smicanjem samoreznih vijaka uz znatne deformacije u zoni rupa za spojna sredstva.

2.5. Vlačni spojevi sa samoreznim vijcima (TS)

Da bi se upotpunila slika o ponašanju samoreznih vijaka u vezama tankostijenih čeličnih elemenata, izvršena su ispitivanja vlačno opterećenih spojeva. Imajući na umu



Slika 15. Lom posmikom samoreznih vijaka serije SSS4-1

potencijalne načine loma kod spojeva tankostijenih elemenata opterećenih na vlak, uzorci su osmišljeni tako da se mogu uočiti sva tri različita oblika loma. Ispitivanje je provedeno posebno konstruiranim alatom (slika 16.). Rezultati ispitivanja prikazani su u tablici 4.

Tablica 4. Rezultati ispitivanja spojeva opterećenih na vlak

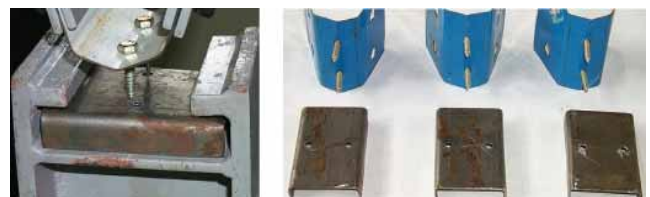
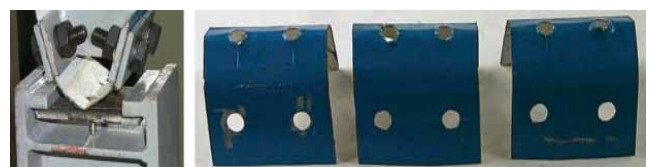
Serija	Tip loma	F_u [kN]	F_m [kN]	F_k [kN]	s [kN]	V [%]
TS2	čupanje vijka iz donjeg lima	3,9	4,83	4,35	0,83	17,23
		5,5				
		5,1				
TS10	probijanje glave vijka kroz gornji lim	10,0	10,9	9,81	0,82	7,51
		11,6				
		11,1				
TS10k	zatezanje vijka	23,5	23,6	21,24	0,66	2,78
		23,0				
		24,3				



Slika 16. Ispitivanje uzoraka u spojevima opterećenim na vlak

Kod uzoraka serije TS2 zbog male debljine donjeg lima ($t_{sup} = 2$ mm) do loma dolazi čupanjem, odnosno izvlačenjem samoreznih vijaka iz donjeg, nosivog lima (slika 17.). Deformacije nastale pri takvom tipu loma većim su dijelom posljedica fleksibilnosti gornjega profiliranog lima.

Kada je donji, nosivi lim velike debljine, kao što je to kod uzoraka serije TS10, do loma dolazi probijanjem glave vijka (slika 18.). Treba napomenuti da su ispitivanja izvršena bez podložnih pločica pa je oblik loma približno jednak obliku glave vijka (šesterokutni).

Slika 17. Lom čupanjem samoreznih vijaka iz donjeg lima ($t=2$ mm)

Slika 18. Lom probijanjem glave samoreznoga vijka kroz profilirani lim

Uzorci serije TS10k koncipirani su tako da do loma dođe upravo iscrpljenjem nosivosti vijaka na vlak (slika 19.). Oni su dobiveni modifikacijom serije TS10 tako da je ispod glave vijka postavljena kontrapločica koja sprječava lom probijanjem ili provlačenjem.



Slika 19. Lom samoreznih vijaka opterećenih na vlak

3. Analiza rezultata ispitivanja

3.1. Posmični spojevi s vijcima

U tablici 5. uspoređene su karakteristične vrijednosti sila dobivenih eksperimentalnim putem s karakterističnim vrijednostima nosivosti spojeva određenim prema referentnim normama [13] i [11], za svaki od potencijalnih načina loma, uzimajući u obzir stvarne, mjerene karakteristike materijala. Budući da mjerene debljine lima nisu bitno odstupale od nazivnih, pri određivanju karakterističnih nosivosti uzete su nazivne debljine.

Kod svih uzoraka s limovima debljine 4 mm do loma dolazi uslijed odreza tijela vijaka. Prema EN 1993-1-3 [13], proračunska nosivost vijka na posmik određuje se na isti način kao i u slučaju klasičnih čeličnih konstrukcija prema izrazu (3) u tablici 5., gdje je A_s površina ispitnog presjeka, a f_u vlačna čvrstoća materijala vijka. S obzirom da se radi o dobro poznatom fenomenu i da

su vijci visoko standardizirani, odstupanja rezultata ispitivanja u odnosu na karakteristične vrijednosti dobivene proračunom relativno su mala i kreću se u granicama od 3-9%.

Kod limova debljine 2 mm do loma dolazi po osnovnom materijalu. Kod spojeva s vezicama i malim udaljenostima vijka od ruba lima - e_1 (SBS2-1) pojavljuje se lom zbog kidanja lima (slika 10.). Ovaj tip loma nastaje kidanjem osnovnog materijala po dvije bliske, približno paralelne ravnine koje se formiraju u pravcu djelovanja sile u elementu. Kidanje počinje u krajnjim zonama prve rupe i doseže sve do slobodnog ruba elementa. Početak ravnine posmika nalazi se negdje između sredine rupe i njezina vanjskog ruba. Do gnječenja omotača rupe dolazi zbog koncentracije naprezanja na mjestu kontakta između tijela vijka i osnovnog materijala. U ovoj relativno uskoj zoni zbog poremećaja ravnomjernog toka sila dolazi do koncentracije naprezanja. Daljim povećanjem opterećenja ove se zone plastificiraju i deformiraju - kidaju.

Tablica 5. Nosivost posmičnih spojeva s vijcima

Seriya	Tip loma	F_k [kN]	$F_{k,EC3}$ [kN]	$F_{k,AISI}$ [kN]	$F_k/F_{k,EC3}$	$F_k/F_{k,AISI}$
SBS2-1	kidanje lima	26,74	22,15	26,59	1,21	1,01
SBS2-2	neto presjek	38,42	41,88	47,19	0,92	0,81
SBL2-1	savijanje lima i probijanje glave vijka	23,08	22,15	20,16	1,04	1,14
SBL2-2		22,02	26,58	20,16	0,83	1,06
SBS4-1 SBS4-2	odrez tijela vijka	59,06	64,92	57,51	0,91	1,03
SBL4-1 SBL4-1		35,89	37,57	33,24	0,95	1,08
EN 1993-1-3			AISI - American Iron and Steel Institute			
Nosivost na posmik $F_{k,EC3} = 0,5 \cdot f_{ub} \cdot A_s$ (3)			Nosivost na posmik $F_{k,AISI} = A_b \cdot F_n$ (6)			
Nosivost na pritisak po omotaču rupe $F_{k,EC3} = 2,5 \cdot \alpha_b \cdot k_t \cdot f_u \cdot d \cdot t$ (4)			Pritisak po omotaču rupe $F_{k,AISI} = C \cdot m_r \cdot d \cdot t \cdot f_u$ (7)			
Nosivost neto presjeka $F_{k,EC3} = (1 + 3 \cdot r \cdot (d_0 / u - 0,3)) \cdot A_{net} \cdot f_u$ (5)			Nosivost na kidanje lima $F_{k,AISI} = t \cdot e \cdot f_u$ (8)			
			Nosivost neto presjeka $F_{k,AISI} = A_n \cdot f_u$ (9)			

Nosivost lima na kidanje krajnjih vijaka ovisi o udaljenosti od ruba, debljini lima i kvaliteti osnovnog materijala, dok je nosivost na gnječenje omotača rupe, koje se manifestira gužvanjem lima u zoni ispred vijka, u funkciji promjera vijka, debljine lima i njegove vlačne čvrstoće. Uočava se da u oba slučaja odlučuju debljina lima i vlačna čvrstoća kao zajednički parametri značajni za određivanje nosivosti. Treba primjetiti da i nosivost na kidanje lima ne ovisi bitno o promjeru vijka, kao i da nosivost na gnječenje omotača rupe ne ovisi o vrijednosti udaljenosti od ruba. Odnos ovih dviju veličina valja odrediti tako da nosivosti na kidanje i gnječenje omotača rupe budu približno jednake.

U EC3 [13] lom kidanjem lima i lom gnječenjem omotača rupe integrirani su u zajednički tip loma koji se naziva lom pritiskom po omotaču rupe. Gnječenje omotača rupe zapravo nije pravi lom već samo početna etapa u kojoj dolazi do lokalne plastifikacije osnovnog materijala u zonama kontakta s vijkom praćenog znatnim izduženjem rupe, ali do pravoga, formalnog loma dolazi ili kidanjem lima u krajnjoj zoni ili savijanjem lima i probijanjem glave vijka. Prema EN 1993-1-3 [13] proračunska nosivost vijka na pritisak po omotaču rupe određuje se na osnovu izraza (4) danog u tablici 5., gdje koeficijent α_b zavisi od odnosa udaljenosti vijka od ruba lima i promjera vijka ($\alpha_b = \min(1; e_1/3d)$), a koeficijent k_t obuhvaća spomenute specifičnosti iznimno tankih limova, i za limove deblje od 1,25 mm jednak je jedinici. AISI [11] razdvaja ova dva fenomena. Posebno daje izraz za lom zbog gnječenja omotača rupe, u funkciji debljine lima, promjera vijka i primjene podloška ispod glave i matice, a posebno za lom zbog kidanja lima, u funkciji udaljenosti vijka od ruba lima i debljine lima. Također pruža mogućnost obuhvaćanja utjecaja podloška na nosivost spoja. Pretpostavlja se da je zbog toga dobiveno bolje poklapanje eksperimentalnih rezultata s karakterističnim vrijednostima nosivosti dobivenim prema AISI (razlika samo 1%), nego prema EC3 koji daje znatno konzervativniju vrijednost (razlika je 21%).

Bez obzira na udaljenost vijaka od ruba lima, kod spojeva na preklap izrađenih od čeličnih limova debljine 2 mm zbog ekscentričnog naprezanja dolazi do loma savijanjem lima (engl. *Inclination failure*) praćenog probijanjem glave vijka kroz osnovni materijal. Do probijanja vijka dolazi redovito ispod šesterokutne glave i to postupno, tako što jedno po jedno tjeme glave vijka probija relativno tanak lim. Deformacije se progresivno šire, a pri samom su lomu vijci okrenuti za gotovo 90° u odnosu prema prvobitnom položaju. Slični oblici loma uočeni su i kod drugih autora [8] pri ispitivanju spojeva na preklap s limovima male debljine.

Može se zaključiti da kod tankih limova i mali ekscentriciteti bitno utječu na

ponašanje spojeva s preklapom. Posljedica je to male krutosti na savijanje ovih limova. Mehanizmi su loma komplicirani i teški za numeričko modeliranje, pa uporište u proračunu treba potražiti u postojećim propisima. Usporedbom eksperimentalnih rezultata s karakterističnim vrijednostima nosivosti dobivenim na temelju postojećih standarda (tablica 5.) uočavaju se odstupanja od 4 do 17% koja se, imajući na umu složenost fenomena, mogu smatrati prihvatljivim.

Do loma neto presjeka dolazi kada su udaljenosti vijaka od ruba limadovoljno velike, tako da se ne može ostvariti lom kidanjem osnovnog materijala i kada je širina lima relativno mala. Lom neto presjeka redovito je praćen suženjem presjeka. Karakterističan je za veze s malom debljinom i nižom kvalitetom čelika osnovnog materijala. U slučaju limova malih debljina često je praćen deformacijama gnječenja i gužvanja lima u zoni rupa [3], dok se u slučaju spojeva na preklap može uočiti i savijanje zbog ekscentriciteta [8].

Karakteristična se nosivost neto presjeka kod tankostijenih elemenata (prema EN 1993-1-3) razlikuje od klasične čelične konstrukcije (EN 1993-1-1) i ovisi o broju vijaka u presjeku i ukupnom broju vijaka, o širini lima i udaljenosti vijaka od ruba lima, a određuje se na temelju izraza (5) iz tablice 5., gdje je r odnos broja vijaka u jednom redu i ukupnog broja vijaka u spoju, a $u = 2e_2$ ali ne veće od p_2 . Usporedbom rezultata ispitivanja s vrijednošću dobivenom prema EC3, izraz (5), uočava se razlika od 8%, dok su odstupanja u odnosu na AISI čak 19%.

3.2 Posmični spojevi sa samoreznim vijcima

Kod posmičnih spojeva sa samoreznim vijcima uočena su dva tipa loma: kidanjem lima i odrezom samoreznih vijaka. Treba istaknuti da je lom posmikom vijaka prisutan u većem broju uzoraka, što je omogućilo znatno veći broj podataka za statističku obradu, čime se povećava pouzdanost dobivenih rezultata. U tablici 6. uspoređene su karakteristične vrijednosti sila koje su dobivene eksperimentalnim putem s karakterističnim vrijednostima nosivosti određenim prema [13] i [11] za lom kidanjem lima.

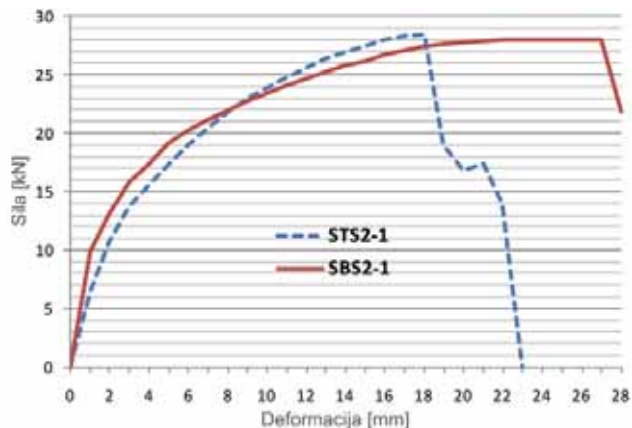
Dobivene vrijednosti granične nosivosti lima na kidanje kod spojeva sa samoreznim vijcima približno su jednake

Tablica 6. Nosivosti posmičnih spojeva sa samoreznim vijcima

Serijski broj	Tip loma	F_k [kN]	$F_{k, EC3}$ [kN]	$F_{k, AISI}$ [kN]	$F_k / F_{k, EC3}$	$F_k / F_{k, AISI}$
SSS2-1 STS2-1	kidanje lima	26,17	30,20	39,63	1,15	1,51
EN 1993-1-3			AISI			
nosivost na pritisak po omotaču rupe $F_{k, EC3} = \alpha \cdot d \cdot t \cdot f_u$ (10)			nosivost na pritisak po omotaču rupe $F_{k, AISI} = 4,2 \cdot \sqrt{t_2^3 \cdot d} \cdot f_{u2}$ (11)			

vrijednostima dobivenim kod ekvivalentnih spojeva s običnim vijcima (slika 20.). Naime, karakteristična vrijednost granične sile kidanja lima kod spoja s vijcima iznosi 26,74 kN (tablica 5.), dok je kod samoreznih vijaka ona neznatno manja i iznosi 26,17 kN (tablica 6.). Dakle, razlika je samo 0,57 kN, odnosno oko 2%.

To ukazuje na bitnu činjenicu da nosivost lima na kidanje praktično ne ovisi o veličini i tipu spojnog sredstva. Također se može konstatirati da je granična deformacija približno jednaka veličini rubnog razmaka e_r , kao što je bio slučaj i kod spojeva s običnim vijcima.



Slika 20. Usporedba F-δ dijagrama serija SBS2-1 i STS2-1

Rezultati ispitivanja su približno 15% veći od karakteristične nosivosti prema EC3, dok je razlika u odnosu na AISI čak 51%, što pokazuje da su izrazi u ovom standardu prilično konzervativni (tablica 6.).

Ni europski ni američki propisi ne daju preporuke za određivanje nosivosti samoreznih vijaka na posmik, već preporučuju eksperimentalno određivanje. Karakteristična vrijednost nosivosti samoreznoga vijka na posmik kod ispitivanih je uzoraka jednaka polovici karakteristične vrijednosti nosivosti spoja, s obzirom da su spojevi ostvareni sa po dva samorezna vijaka i da je njihov udio u nosivosti spoja podjednak. Prema tome, karakteristična vrijednost nosivosti na posmik ispitivanih samoreznih vijaka promjera 6,3 mm po jednoj posmičnoj ravnini je: $11,68/2=5,84$ kN.

3.3. Vlačni spojevi sa samoreznim vijcima

Usporedba nosivosti samoreznih vijaka u vlačnim spojevima s karakterističnim nosivostima određenim na temelju normi [13] i [11] prikazana je u tablici 7., za lom čupanjem vijka iz donjeg lima (serija TS2) i lom probijanjem glave vijka (serija TS10) za koje postoje preporuke. Kod uzoraka serije TS2 zbog male

debljine donjeg lima ($t_{sup} = 2$ mm) do loma dolazi čupanjem, odnosno izvlačenjem samoreznih vijaka iz donjeg lima. Deformacije nastale pri takvom tipu loma posljedica su prije svega fleksibilnosti gornjega profiliranog lima. Nasuprot gornjem limu, donji lim u koji su urezani samorezni vijci ima male, jedva uočljive deformacije u obliku ispupčenja. Do loma, dakle, dolazi razaranjem navoja urezanog u donji, nosivi lim. Pritom su jasno uočene metalne strugotine koje su isčupane iz donjeg lima debljine 2 mm. S obzirom na tvrdoću površinskih slojeva materijala od kojeg su izrađeni samorezni vijci, njihovi su navoji ostali neoštećeni.

Nosivost ovisi o promjeru vijka d , debljini donjeg, nosivog lima t_{sup} i vlačnoj čvrstoći materijala od kojeg je izrađen $f_{u,sup}$. Također treba napomenuti da je propisana najmanja debljina donjeg lima kod veza sa samoreznim vijcima opterećenim na vlak, koja je dana u EC3 [13] veoma mala ($t_r > 0,9$ mm) te da je treba uzeti s rezervom. Prema mišljenju autora, najmanja debljina donjeg lima u koji se urezuje vijak t_{sup} trebala bi biti u funkciji promjera samoreznoga vijka, odnosno hoda navoja. Dobivene su karakteristične vrijednosti nosivosti za ovaj tip loma manje u odnosu na preporuke EC3 za 11%, što je najvjerojatnije posljedica nepovoljnog odnosa debljine donjeg, nosivog lima i hoda navoja samoreznoga vijka. Pravilnim projektiranjem spoja treba izbjeći da lom čupanjem vijka bude mjerodavan pri dimenzioniranju na vlak, a to se postiže nešto većom debljinom donjeg lima. Međutim, debljina gornjeg lima redovito je mala jer se samorezni vijci uglavnom primjenjuju za pričvršćivanje krovne i pročeljne obloge čija je debljina uvijek mala ($t \leq 1$ mm), pa je probijanje ili provlačenje najčešće mjerodavan način loma. Nosivost na probijanje odnosno provlačenje glave kod spojeva sa samoreznim vijcima ovisi o debljini gornjeg lima i njegovim mehaničkim karakteristikama, kao i veličini glave vijka odnosno promjeru podložne pločice d_w .

Tablica 7. Nosivosti veza sa samoreznim vijcima u vlačnim spojevima

Serija	Tip loma	F_k [kN]	$F_{k,EC3}$ [kN]	$F_{k,AISI}$ [kN]	$F_k/F_{k,EC3}$	$F_k/F_{k,AISI}$
TS2	čupanje vijka iz donjeg lima	4,35	5,44	7,12	0,80	0,61
TS10	probijanje glave vijka kroz gornji lim	9,81	8,25	12,38	1,19	0,79
EN 1993-1-3			AISI			
Nosivost na čupanje lima		Nosivost na čupanje lima				
$F_{m,EC3} = 0,65 \cdot d \cdot t_{sup} \cdot f_{u,sup}$ (12)		$F_{m,AISI} = 0,85 \cdot d \cdot t_c \cdot f_{u2}$ (14)				
Nosivost na probijanje glave vijka		Nosivost na probijanje glave vijka				
$F_{m,EC3} = d_w \cdot t \cdot f_u$ (13)		$F_{m,AISI} = 1,5 \cdot d_w \cdot t_1 \cdot f_{u1}$ (15)				
Opseg važenja: $0,5 \text{ mm} \leq t \leq 1,5 \text{ mm}$ i $t_r \geq 0,9 \text{ mm}$ $f_u \leq 550 \text{ /mm}^2$						

ako ga ima. Hoće li doći do probijanja glave vijka ili do njezina provlačenja kroz gornji lim ovisi o odnosu promjera podložne pločice i promjeru vijka d_w/d . Kada je ovaj odnos veći dolazi do provlačenja, a u suprotnom, što je češći slučaj, dolazi do probijanja glave vijka kroz gornji lim.

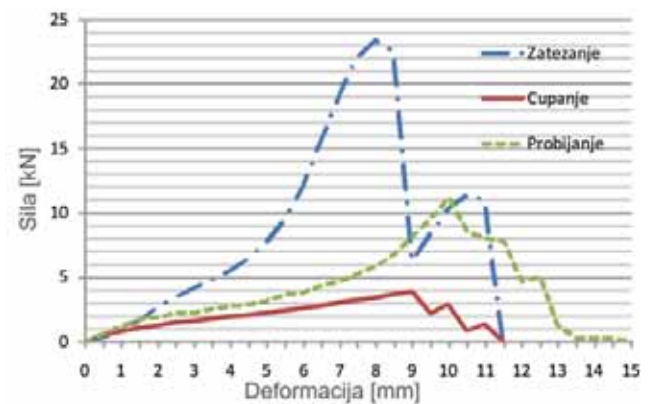
Treba napomenuti da su ispitivanja izvršena bez podložnih pločica pa je oblik loma približno jednak obliku glave vijka.

Nosivost samoreznih vijaka na vlak nije obuhvaćena standardima, a određena je ispitivanjem uzoraka serije TS10k kod kojih su spriječeni ostali načini loma. Osim ukupne, maksimalne nosivosti vlačnog spoja, s F - δ dijagrama može se očitati i nosivost jednog vijka. Naime, pri dostizanju maksimalne vrijednosti sile dolazi do loma jednog samoreznoga vijka koji je zbog neizbježne, male asimetrije više opterećen. Nakon toga, poslije naglog pada sile, ona ponovno počinje rasti i dostiže razinu pri kojoj se iscrpljuje nosivost na vlak i drugog vijka. Na temelju toga može se odrediti nosivost svakoga pojedinačnoga samoreznog vijka u spoju (tablica 8.). Na ovaj se način na osnovi triju ispitanih uzoraka dobivaju podaci o nosivosti šest samoreznih vijaka. Statističkom obradom rezultata ispitivanja (tablica 8.) dobivaju se srednja i karakteristična vrijednost nosivosti samoreznih vijaka na vlak. Usporedbom karakterističnih vrijednosti nosivosti samoreznih vijaka na posmik (5,84 kN) i na vlak (10,53 kN) može se ustanoviti odnos između čvrstoće na vlak i čvrstoće na posmik ($10,53/5,84=0,541$).

Tablica 8. Karakteristične vrijednosti F_k nosivosti samoreznih vijaka na vlak

Serija	F_u [kN]	F_m [kN]	s [kN]	V [%]	F_k [kN]
TS10k	11,30	11,80	0,58	4,94	10,53
	23,50-11,30=12,20				
	12,80				
	24,30-12,80=11,50				
	11,40				
	23,00-11,40=11,60				

Usporedna analiza različitih tipova loma kod ispitivanih uzoraka (slika 21.) pokazuje velike razlike s obzirom na nosivost spojeva. Izborom pravilne debljine donjeg lima u funkciji promjera vijka može se postignuti da nosivost na čupanje bude veća od nosivosti na probijanje. Dakle, realno je očekivati da kod takvih tipova spojeva nosivost na probijanje glave vijka bude mjerodavna. Ona se dodatno može povećati postavljanjem podložnih pločica.



Slika 21. Usporedba F - δ dijagrama za različite tipove loma

4. Zaključak

Istraživanja posmičnih i vlačnih spojeva predstavljenih u ovome radu potvrđuju načine lomova koji se očekuju kod tankostijenih čeličnih elemenata. Može se zaključiti da se kod spojeva s običnim i samoreznim vijcima pojavljuju slični način loma. Kao važan zaključak može se navesti da je nosivost na kidanje lima kod pomičnih spojeva približno ista u slučaju običnih i samoreznih vijaka i da dominantno ovisi o udaljenosti vijaka od ruba loma e_r . Također se može reći da je ispitivanjima opravdana primjena vijaka manjih promjera kod tankostijenih čeličnih elemenata. Iako su ispitivanja provedena s vijcima M8 koji su manji od konvencionalno minimalnih za klasične čelične konstrukcije u zgradarstvu (M12), kod limova debljine 2 mm svi su lomovi nastali po osnovnom materijalu, a to znači da vijak nije iskorišten. Dakle, primjena vijaka manjeg promjera kod tankostijenih čeličnih elemenata kao što su podrožnice, pročeljni zasuni i drugi sekundarni elementi ima potpunu ekonomsku opravdanost. Spojve na preklap treba izbjegavati jer zbog malog ekscentriciteta dolazi do znatnih deformacija savijanja koje dovode do specifičnog načina loma savijanjem lima i probijanjem glave vijka, a to za posljedicu ima smanjenje nosivosti i nelinearno ponašanje spoja. Posmični spojevi sa samoreznim vijcima općenito imaju manju nosivost od spojeva s vijcima. Suvremeni propisi za proračun EN 1993-1-3 i ANSI 2001 ne daju preporuke za proračun nosivosti samoreznih vijaka na posmik i vlak, već upućuju na eksperimentalna ispitivanja. U okviru ispitivanja prikazanih u ovome radu određene su karakteristične vrijednosti nosivosti samoreznih vijaka nazivnog promjera 6,3 mm na posmik i vlak. Ovako određene nosivosti pri projektiranju se mogu primijeniti samo kao indikativne. Za veću primjenu samoreznih vijaka nužno je da proizvođači, na temelju većih serija ispitivanja, deklariraju karakteristične ili proračunske nosivosti samoreznih vijaka na posmik i vlak. Na ovaj će se način otvoriti vrata za širu primjenu samoreznih vijaka i to ne samo za spojeve krovnih konstrukcija i fasadnih obloga, već i za veze elemenata sekundarnih dijelova čeličnih konstrukcija.

Rezultati ispitivanja se, u većoj ili manjoj mjeri, a ovisnost o tipu loma, poklapaju s rezultatima dobivenim proračunom prema EN1993-1-3, odnosno AISI 2001, što je detaljno elaborirano

u radu. Odstupanja su veća u slučajevima složenijih i manje ispitanih mehanizama loma, što ukazuje na smjer budućih istraživanja.

LITERATURA

- [1] Winter, G., *Tests on Bolted Connections in Light Gauge Steel*, Journal of the Structural Division, ASCE, Vol. 82 (1956) No. ST2, pp. 920-1 - 920-25.
- [2] Zadanfarrok, F., Bryan, ER.: *Testing and design of bolted connections in cold formed steel sections*, Proceedings of Eleventh International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures (1992), St. Louis, Missouri.
- [3] Rogers, C.A., Hancock, G.J.: *Failure modes of Bolted Sheet Steel Connections Loaded in Shear*, Research Report No. R772 (1998), Centre for Advanced Structural Engineering, University of Sydney, Sydney, NSW, Australia.
- [4] Rogers, C.A., Hancock, G.J.: *Bolted Connection Tests of Thin G550 and G300 Sheet Steels*, Research Report No. R749 (1997), Centre for Advanced Structural Engineering, University of Sydney, Sydney, NSW, Australia.
- [5] Rogers, C.A., Hancock, G.J.: *New Bolted Connection Design Formulae for G550 and G300 Sheet Steels Less Than 1.0 mm Thick*, Research Report No. R769 (1998), Centre for Advanced Structural Engineering, University of Sydney, Sydney, NSW, Australia.
- [6] Rogers, C.A., Hancock, G.J.: *Screwed Connection Tests of Thin G550 and G300 Sheet Steels*, Research Report No. R761 (1997), Centre for Advanced Structural Engineering, University of Sydney, Sydney, NSW, Australia.
- [7] Wallace, J.A., Schuster, R.M, LaBoube, R.A.: *Calibrations of bolted coldformed steel connections in bearing (with and without washers)*, Final report (2001a), Washington, DC: American Iron and Steel Institute.
- [8] Toma A.W., Nicolaas T.: *Design Tools and New Applications of Cold-Formed Steel in Buildings*, Final report of WP 2.2 New connection methods (2000), TNO.
- [9] Pekoz T.: *Design of Cold-Formed Steel Screw Connections*, Tenth International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures (1990), St. Louis: Wei-Wen Yu Center for Cold-Formed Steel Structures, pp. 575-587
- [10] Babalola, M.R., LaBoube, R.A.: *Strength of screw connections subject to shear forece*, Final Report (2004), Wei-Wen Yu Center for Cold-Formed Steel Structures. Rolla, MO.
- [11] American Iron and Steel Institute: *North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members*, (2001), NASPEC 2001, Washington D.C.: AISI.
- [12] Francka R.M., LaBoube R.A.: *Screw connections subject to tension pull-out and shear*, Final Report (2009), Wei-Wen Yu Center for Cold-Formed Steel Structures. Rolla, MO.
- [13] EN 1993-1-3:2005: *Design of steel structures – Part 1.1: Supplementary rules for cold formed thin gauge members and sheeting*, European Committee for Standardization, October, 2006.