

BOČNI PRITISK VIJAKA NA PLOČEVINO V SPOJIH Z ENIM VIJAKOM

BOLT BEARING IN SINGLE BOLT CONNECTIONS

asist. dr. Primož Može, univ. dipl. inž. grad.

primoz.moze@fgg.uni-lj.si

prof. dr. Darko Beg, univ. dipl. inž. grad.

dbeg@fgg.uni-lj.si

Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo

Univerza v Ljubljani, Jamova 2, 1000 Ljubljana

Znanstveni članek

UDK 624.014.2.078.4

Povzetek | V prispevku predstavljamo rezultate testov spojev z enim in dvema vijakoma. Spoji so bili narejeni iz pločevin kvalitete S235. Rezultate testov primerjamo z rezultati testov na podobnih spojih, narejenih iz jekla visoke trdnosti, in jih dodatno podkrepimo z numerično parametrično študijo. S temi rezultati podrobno analiziramo pločevino, obremenjeno s pritiskom vijaka. Podajamo kritično oceno kontrole nosilnosti v bočnem pritisku po SIST EN 1993-1-8 in predlagamo spremenjeno kontrolo nosilnosti, ki je konceptualno enaka obstoječi kontroli, vendar je enostavnejša, manj konservativna in se bolje ujema z rezultati testov. Obravnavamo tudi kontrolo nosilnosti oslabiljenega prereza in strižnega iztrga skupine vijakov po SIST EN 1993, kjer predlagamo tudi možne izboljšave kontrol.

Ključne besede: vijачeni spoji, duktilnost, bočni pritisk, oslabiljen prerez, neto prerez, strižni iztrg vijakov, jeklo visoke trdnosti

Summary | The paper presents the tests on the connections with one and two bolts made of mild steel grade S235. The results are compared with the tests on the connections made of high strength steel. The test results are substantiated by numerical parametric analysis. The effect of bolt bearing is thoroughly analysed. The bearing strength at bolt holes according to standard EN 1993-1-8 is critically evaluated and a modified design check is proposed. The modified check is conceptually the same as the current one, but it is simpler, less conservative and it is in better correlation with the test results. The block shear strength and net cross-section strength are also discussed and modifications to the EN 1993 design rules are given.

Keywords: bolted connections, ductility, bearing stress, net cross-section, block shear, high strength steel

1 • UVOD

Vijačeni preklonni spoji so v jeklenih konstrukcijah tipičen način stikovanja dveh elementov. Glede na prenos obremenitev ločimo torne in strižne vijačene preklonne spoje. V članku je obravnavan strižni tip spoja z enim in dvema vijakoma, kjer obremenitev med elementi prehajajo preko kontaktov med pločevino in vijaki. Pri tem nastanejo veliki bočni pritiski v pločevini, ki so v ravnotežju s

strižnimi napetostmi v vijakih. Takšen prenos obremenitev nastane tudi v tornem spoju, ko je torna nosilnost presežena in pločevino zdrsnejo. Bočni pritisk na vijaka na pločevino predstavlja osnovno komponento togosti in nosilnosti v vijačenih preklonnih spojih. Večina obsežnih raziskav s tega področja sega v drugo polovico prejšnjega stoletja ((Snijder, 1988a), (Snijder, 1988b), (Kulak, 2001)),

vendar je uporaba jekel visokih trdnosti odprla nova vprašanja in s tem nove raziskave ((Kouhi, 1990), (Kim, 1999), (Puthli, 2001), (Aalberg, 2002), (Može, 2010), (Može, 2011)). Hiter razvoj numeričnih simulacij v kombinaciji s testi pa je odprl vpogled v deformacijsko-napetostno stanje, ki ga je v laboratorijskih raziskavah težko izmeriti (Može, 2011). Načini porušitev preklonnega strižnega spoja z enim vijakom so poznane. Porušitev nastane, ko je prekoračena nosilnost na bočni pritisk, nosilnost oslabiljenega prereza ali nosilnost vijaka v strigu. Bočni pritiski

povzročijo več različnih tipov porušitev. Te so odvisne v glavnem od geometrije in materialnih parametrov. V literaturi najdemo tudi fenomen vihanja pločevin (Rex, 2003), ki znižuje nosilnost na bočni pritisk. Pri tej porušitvi se preklopne pločevine začnejo

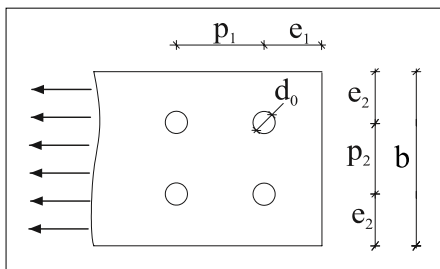
vihati navzven. Ta pojav je običajnejši pri tanjših pločevinah.

Bočni pritiski v pločevini nastanejo zaradi kontaktnih napetosti. Začetna kontaktna površina je zelo majhna, zato se pojavijo koncentracije napetosti, ki s tečenjem otopijo. Tečenje ma-

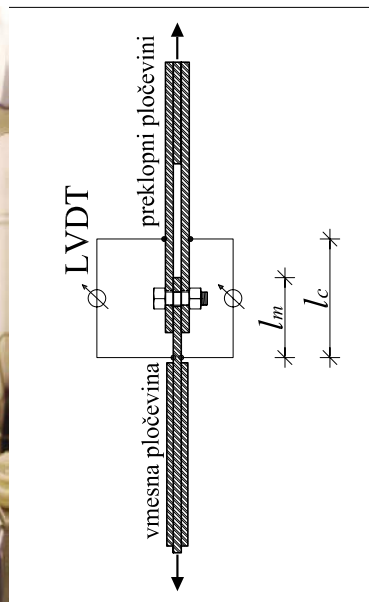
teriala s plastičnimi deformacijami omogoči ugnezdenje vijaka v pločevino in s tem večjo kontaktno površino. Takšen odziv opišemo kot nominalno elastičen odziv, saj v okolici luknje za vijak material preide v območje plastičnosti, praktično takoj, ko na vijak deluje sila.

2 • ZASNOVA TESTA IN PROGRAM TESTIRANJA

Testirali smo trinajst preklopnih spojev z enim vijakom in šest spojev z vijakoma, postavljenima pravokotno na smer obremenjevanja. Spoji so imeli dve strižni ravnini. Geometrije spojev so podane v preglednici 1, simboli pa so označeni na sliki 1. Za izdelavo spojev smo uporabili 12 mm debelo pločevino nominalne kvalitete S235, z napetostjo tečenja $f_y = 313$ MPa in natezno trdnostjo $f_u = 425$ MPa. Natezna trdnost je bila dosežena pri 16 % deformaciji, standardna natezna epruveta pa se je pretrgala pri 37 % deformaciji. Pri tem smo na mestu preloma zabeležili 30 % zmanjšanje prečnega preseza. Vijake smo vstavili v standardne luknje in jih tesno privili, tako da smo dosegli kontakt med pločevinami, vendar je bilo začetno prednapetje vijakov dovolj majhno, da se sila trenja ni razvila. Vijaki in preklopne pločevine so bili zasnovani tako, da ostanejo elastični, zato so plastične deformacije in porušitev nastale v vmesni pločevini. Spoj smo vpeli v čeljusti preizkuševalne naprave in ga obremenili s pomikom 1 mm/min. Pri tem smo poleg sile in pomika čeljusti merili tudi relativni pomik med vmesno pločevino in preklopnimi pločevinami. Ta pomik smo merili na definiranih mestih z induktivnim merilnikom pomikov (LVDT na sliki 2).



Slika 1 • Definicija razdalj



Slika 2 • Spoj M101 med testom (levo) in skica pozicij merilnikov pomikov LVDT (desno)

ime spoja	št. vijakov	velikost vijaka	d_0 (mm)	e_1/d_0	e_2/d_0	p_2/d_0	b (mm)	t (mm)	l_m (mm)	l_c (mm)
M101	1	M24	26	1,23	1,23		64	12	120	149
M102	1	M24	26	1,5	1,23		64	12	132	154
M103	1	M24	26	2	1,23		64	12	142	149
M104	1	M24	26	1	1,5		78	12	120	156
M105	1	M24	26	1,23	1,5		78	12	119	148
M106	1	M24	26	1,5	1,5		78	12	130	152
M107	1	M24	26	2	1,5		78	12	141	150
M108	1	M24	26	2,5	1,5		78	12	151	146
M109	1	M16	18	1	1,5		54	12	81	119
M110	1	M16	18	1,22	1,5		54	12	92	123
M111	1	M16	18	1,5	1,5		54	12	92	121
M112	1	M16	18	2	1,5		54	12	112	118
M113	1	M16	18	2,5	1,5		54	12	112	121
M201	2	M20	22	1,5	2,41	2,41	159	12	131	153
M202	2	M20	22	2,5	2,41	2,41	159	12	146	152
M203	2	M20	22	1,5	1,23	3,68	134	12	162	200
M204	2	M20	22	2,5	1,23	3,68	134	12	161	165
M205	2	M20	22	1,5	1,5	3	132	12	159	181
M206	2	M20	22	2,5	1,5	3	132	12	139	160

Preglednica 1 • Geometrija spojev

3 • REZULTATI TESTOV IN PRIMERJAVA Z JEKLOM VISOKE TRDNOSTI

V tem poglavju bomo podali rezultate opisanih testov na mehkem konstrukcijskem jeklu (MKJ) in jih primerjali z rezultati spojev, narejenih iz jekel visoke trdnosti (JVT) S690. Spoji JVT so bili zasnovani z 10 mm debelo pločevino kvalitete S690 in vijakom velikosti M27. Dejanska napetost tečenja pločevine je bila $f_y = 847$ MPa, dejanska natezna trdnost pa $f_u = 885$ MPa. Testi JVT so bili zasnovani enako kot prej opisani testi. Nadaljnje informacije so podane v ((Može, 2007), (Može, 2010)).

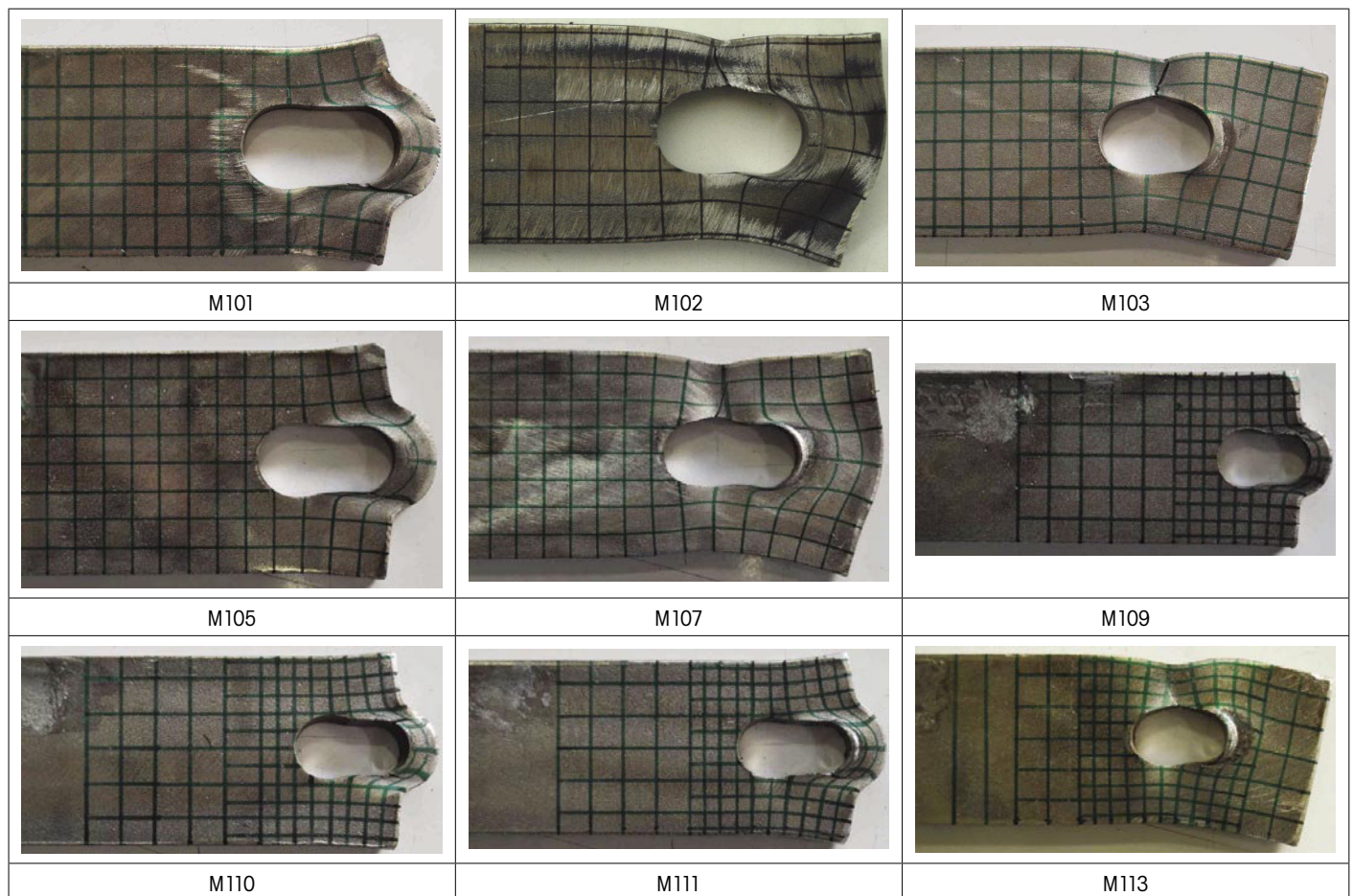
Na slikah 3 do 5 so prikazani porušeni preizkušanci. V preglednici 2 sta podana tip porušitve, nosilnosti in pomik oziroma podaljšanje luknje pri doseženi nosilnosti. Strižna porušitev se razvije, ko je robna razdalja e_1 relativno kratka, nekje do $1,5 d_0$. Vijak potisne material iz pločevine, ki steče in se upogne, pri čemer nastaneta dve strizni ravnini (levi stolpec na sliki 4). Pretrg nastane

v območju visokih strižnih napetosti v strižni ravnini oziroma na zunanjem robu, ki je pravokoten na obremenitev, kjer nastanejo velike natezne napetosti.

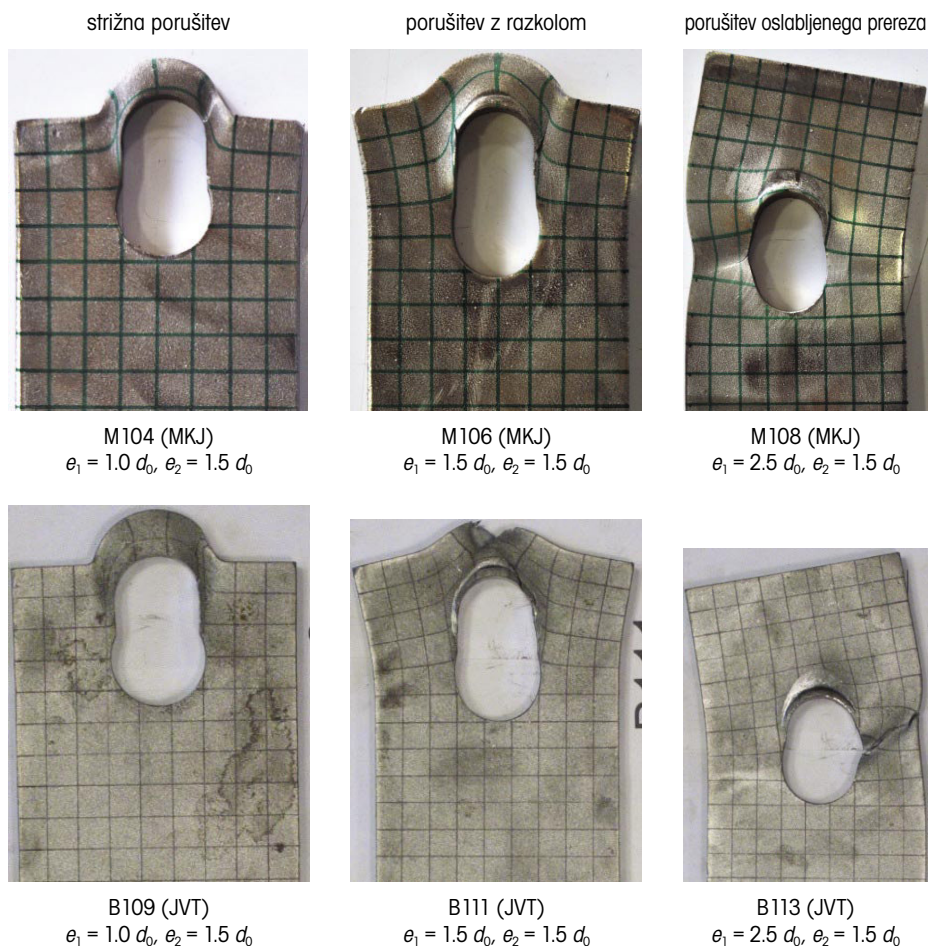
Porušitev, ki je prikazana v sredinskem stolpcu slike 4, opišemo kot porušitev z razkolom, saj se pločevina pred vijakom želi razklati na podoben način, kot se odpre zadruga. Pri tem se del oslabilenega prereza plastificira (glej sliko 6) in dovoli rotacijo v oslabiljenem prerezu oziroma upogib robov pločevine navzven. Čeprav se to porušitev uvršča med porušitve zaradi bočnih pritiskov, jo v kontrolah nosilnosti pogosto zajamemo v kontroli oslabiljenega prereza. Na pločevini iz JVT se je razpoka odprla na prostem robu zaradi prečnih natezih napetosti, medtem ko so se na pločevini iz MKJ na prostem robu razvile velike plastične deformacije, razpoka pa se je odprla v strižni ravnini. Takšen zaključek potrjuje tudi rezultat numerične analize na sliki 6, kjer so prikazane

primerjalne plastične deformacije na pločevini iz MKJ in JVT pri enakem podaljšanju luknje. Opazimo tudi, da so pri JVT plastične deformacije bolj lokalizirane kot pri MKJ (glej sliko 4 in 6). Numerični model, ki je bil uporabljen za prikaz deformacij na sliki 6, je podrobno opisan v poglavju 4.

Če je robna razdalja e_1 dovolj velika, se material začne kopičiti pred vijakom, kar privede do prestriga vijaka ali do porušitve oslabiljenega prereza (desni stolpec na sliki 4). Porušitev oslabiljenega prereza lahko razdelimo v več tipov. Če je razmerje med polnim in oslabiljenim prerezom manjše od razmerja med natezno trdnostjo in napetostjo tečenja, potem se naprej plastificira poln prerez, kar vodi v duktilen odziv konstrukcijskega elementa v nategu. Če je nosilnost v bočnem pritisku podobna nosilnosti oslabiljenega prereza, potem podaljšanje luknje omogočijo plastične deformacije, ki se razvijejo v oslabiljenem prerezu in v materialu pred vijakom (M112 na sliki 5). Če je razmerje med polnim in oslabiljenim prerezom veliko, potem so plastične deformacije omejene na oslabiljen prerez. V tem primeru je



Slika 3 • Porušeni preizkušanci (glej tudi sliko 4, 5)



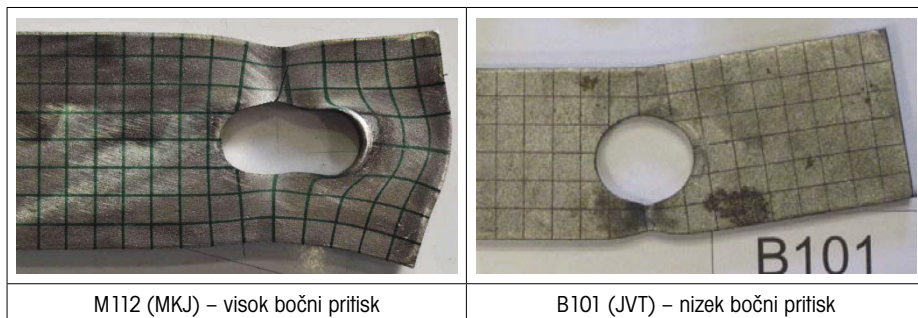
Slika 4 • Porušitve preizkušancev iz jekla kvalitete S235 in S690 (Može, 2010) z enako relativno geometrijo

nosilnost na bočni pritisk precej večja od nosilnosti oslabiljenega prereza (B101 na sliki 5), kar vodi v neduktilen odziv konstrukcijskega elementa.

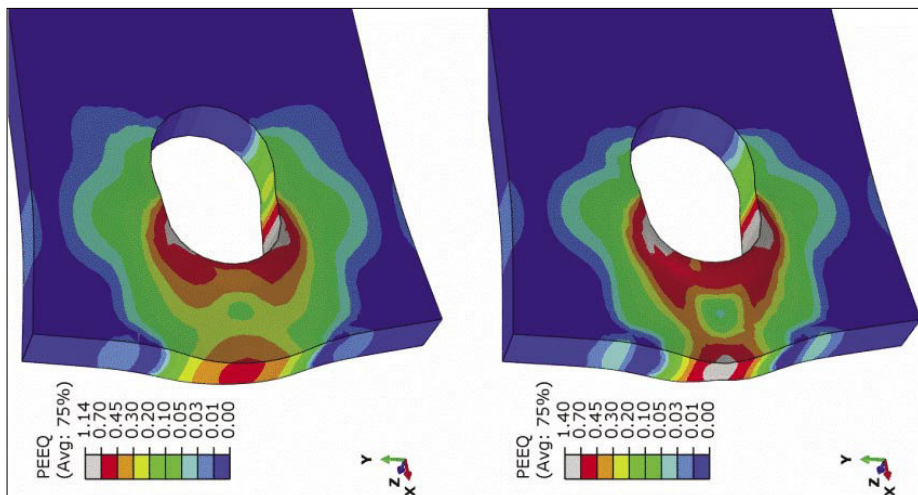
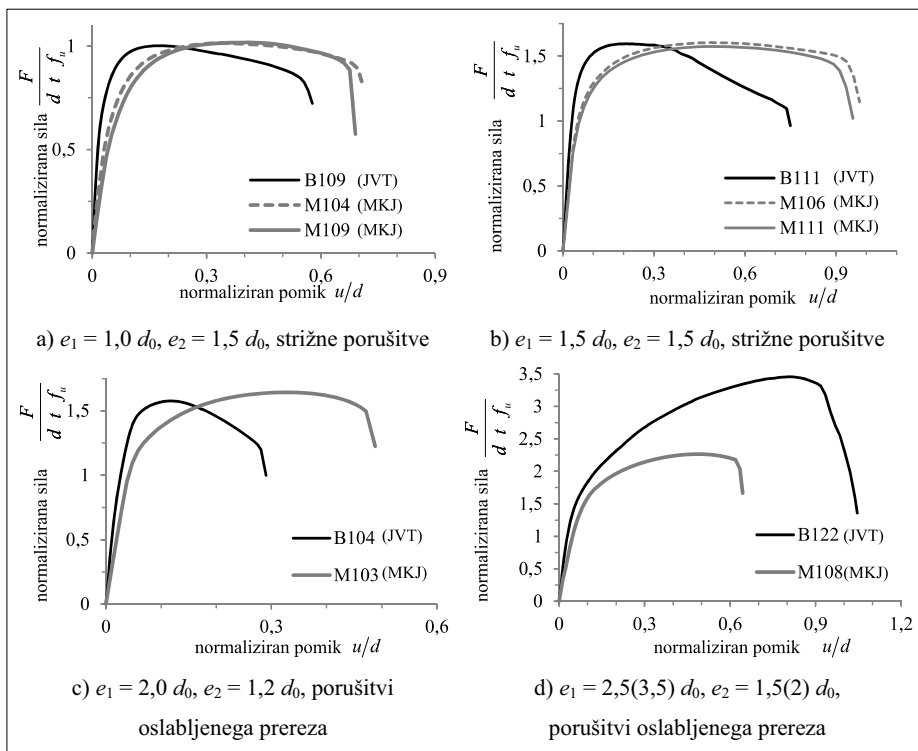
Slike 7 do 9 prikazujejo odziv spojev iz MKJ in JVT (Može, 2010) z enim vijakom. Abscise prikazujejo normiran pomik, to je pomik u , ki smo ga izmerili v testu (slika 2), deljen s premerom vijaka d . Ordinate pa prikazujejo normirano silo, ki je normirana s produktom dejanske natezne trdnosti f_w debeline pločevine t in premerom vijaka d . Na sliki 7 je relativna pozicija luknje pri MKJ in JVT enaka. Slike 8 in 9 prikazujejo odzive vseh spojev, ki so se porušili zaradi bočnih pritiskov. S teh slik je razvidno, da med MKJ in JVT praktično ni razlike v relativni nosilnosti, razlika pa se pokaže pri deformacijski kapaciteti. Krivulje za MKJ in JVT so bilinearne brez posebnega utrjevanja. Nosilnost je dosežena med 30 % in 50 % razpoložljive deformacijske kapacitete. Zadnji del krivulje po platoju je pri spojih iz JVT v primerjavi z MKJ ($e_1 \leq 1.5 d_0$) približno linearen z negativnim gradientom. Padajoči del krivulje je pomemben pri spojih z več vijaki, saj omogoči prerazporeditev sil med vijake. Porušitev spojev iz MKJ smo zabeležili med $0,7 d_0$ in $1,0 d_0$ (slika 8), spoji iz JVT pa so se porušili med $0,55 d_0$ in $0,8 d_0$ (slika 9). Čeprav testov spojev iz MKJ z veliko robno razdaljo e_1 nismo opravili, pričakujemo, da bi se obnašali vsaj tako kot spoji iz JVT.

	ime	tip porušitve	F_{max} (kN)	$u(F_{max})$ (mm)
spoji z enim vijakom	M101	strižna porušitev	151	11,4
	M102	oslabiljen prerez (visoki bočni pritiski)	192	13,7
	M103	oslabiljen prerez	202	9,0
	M104	strižna porušitev	125	9,2
	M105	strižna porušitev	164	12,2
	M106	strižna porušitev/razkol	197	13,7
	M107	oslabiljen prerez (visoki bočni pritiski)	283	20,5
	M108	oslabiljen prerez	279	13,4
	M109	strižna porušitev	84	7,7
	M110	strižna porušitev	104	8,1
	M111	strižna porušitev	129	9,4
	M112	oslabiljen prerez (visoki bočni pritiski)	182	14,7
	M113	oslabiljen prerez	188	10,3
spoji z dvema vijakoma	M201	strižni iztrg vijakov	359	11,6
	M202	strižni iztrg vijakov	493	13,4
	M203	strižna porušitev/del oslabiljenega prereza	348	15,6
	M204	del oslabiljenega prereza	455	14,9
	M205	strižna porušitev	353	14,7
	M206	oslabiljen prerez	469	16,3

Preglednica 2 • Rezultati testov



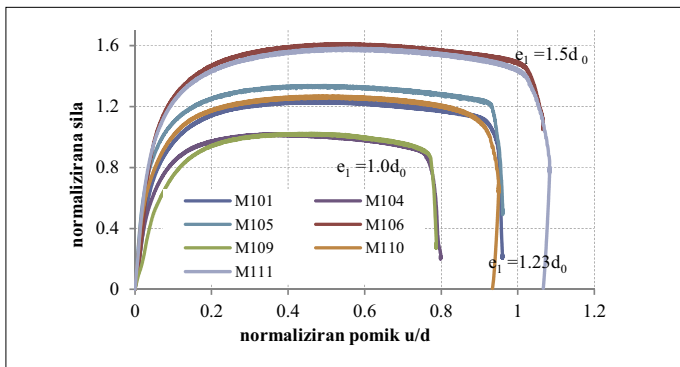
Slika 5 • Različna tipa porušitve oslabiljenega prereza

Slika 6 • Primerjalne plastične deformacije pri podaljšanju luknje $0,5 d_0$ za S235 (levo) in S690 (desno). Geometrija pločevine: $e_1 = 1,5 d_0$, $e_2 = 1,5 d_0$, $d_0 = 26$ mm, $t = 12$ mm

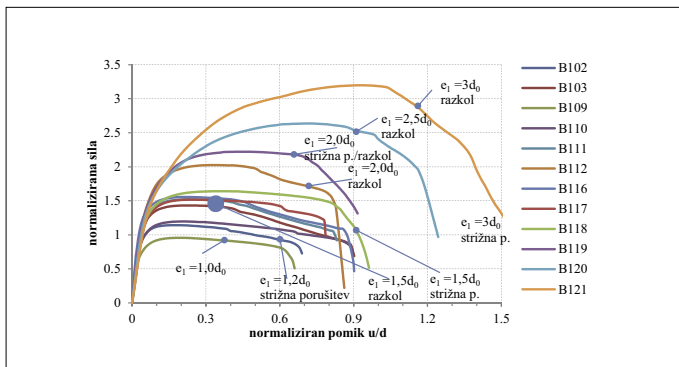
Slika 7 • Krivulje odziva (sila-pomik) za spoje iz MKJ in JVT v normirani obliki (vrednosti v oklepajih so za JVT)

Primerjava spojev iz MKJ in JVT na slikah 7 c–d pokaže, da je pri porušitvi oslabiljenega prereza odziv drugačen. Pomiki na sliki 7c so se v glavnem izvršili v oslabiljenem prerezu, medtem ko so pomiki na sliki 7d posledica deformacij zaradi bočnih pritiskov in tečenja polnega prereza. Slika 7d tudi prikazuje, da je spoj B122 iz JVT dosegel povprečni bočni pritisk $3,5 f_u$. Na sliki 7 je razliko opaziti tudi v začetni togosti spojev. Čeprav elastična togost ni odvisna od trdnosti materiala, spoji iz JVT izkazujejo višjo togost. Kot smo že pojasnili, se material pred vijakom plastificira že ob nizkem pritisku vijaka, saj material s tečenjem otopi konice napetosti, kar posledično vpliva na začetno togost.

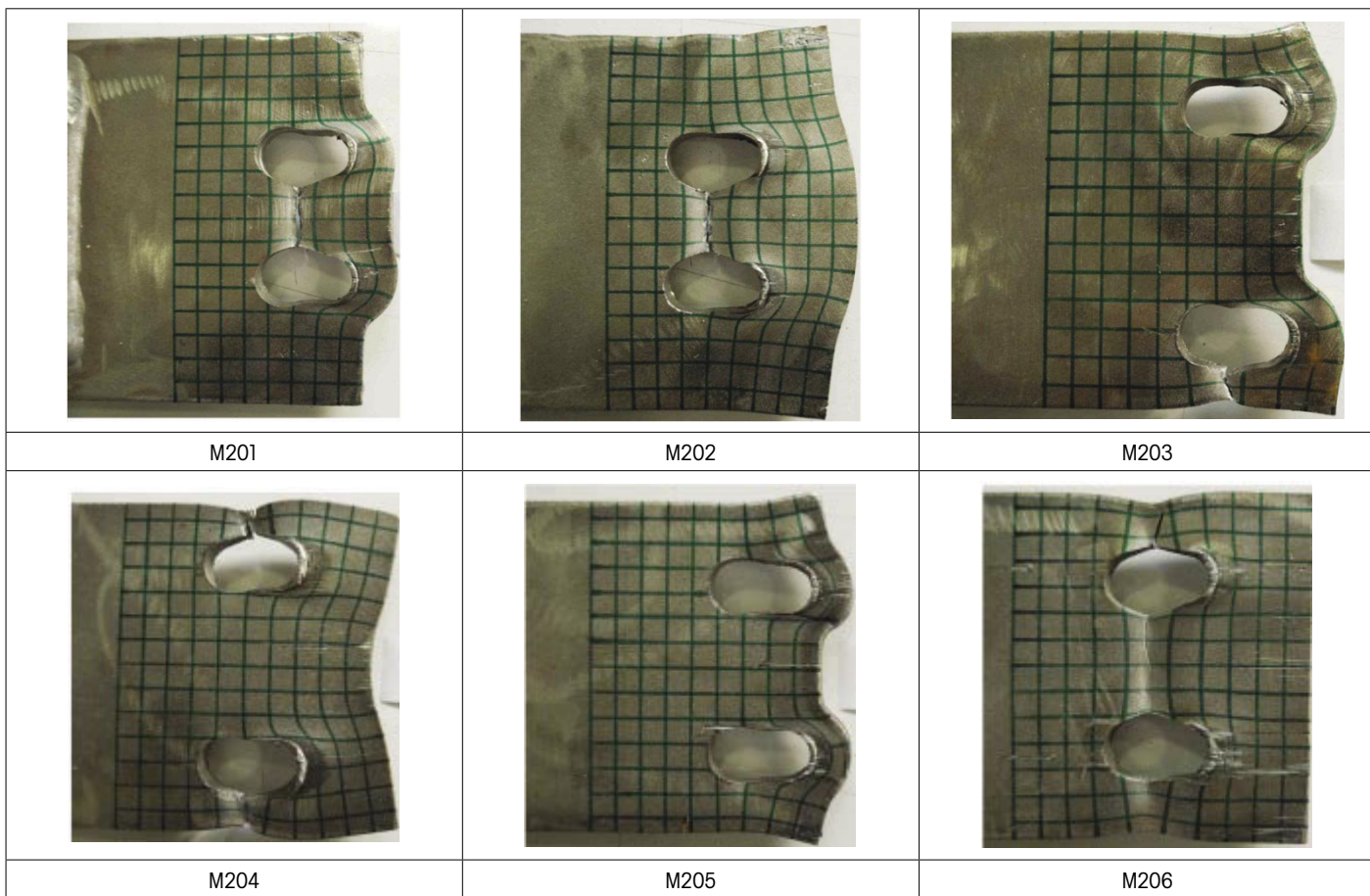
Geometrije šestih spojev z dvema vijakoma smo izbrali tako, da smo zajeli različne mehanizme porušitev (slika 10). Spoja M201 in M202 sta se porušila s strižnim iztrgom vijakov, pri M205 sta vijaka vsak zase razklala pločevino, pri spoju M206 pa se je pretrgal oslabiljen prerez. Zanimivi sta porušitvi spojev M203 in M204, kjer se je pretrgal le del oslabiljenega prereza. Če bi spoja M203 in M204 po dolgem prerezali, prezrcalili in ju staknili skupaj, bi ti porušitvi opisali kot porušitvi s strižnim iztrgom vijakov. Čeprav so vse porušitve tipične, pa ne smemo pozabiti, da sta M201 in M203 skoraj dosegli nosilnost oslabiljenega prereza.



Slika 8 • Krivulje odziva v normalizirani obliki za jeklo S235



Slika 9 • Krivulje odziva v normalizirani obliki za jeklo S690



Slika 10 • Porušitve preizkušancev z dvema vijakoma

4 • NUMERIČNA PARAMETRIČNA ŠTUDIJA SPOJEV Z ENIM VIJAKOM

V okolju Abaqus v6.10 smo zasnovali relativno preprost numerični model spoja z enim vijakom (slika 11a), da bi s parametrično študijo analizirali napetostno stanje, ki nastane zaradi bočnih pritiskov. Spoj smo modelirali z deformabilno pločevino in s togim

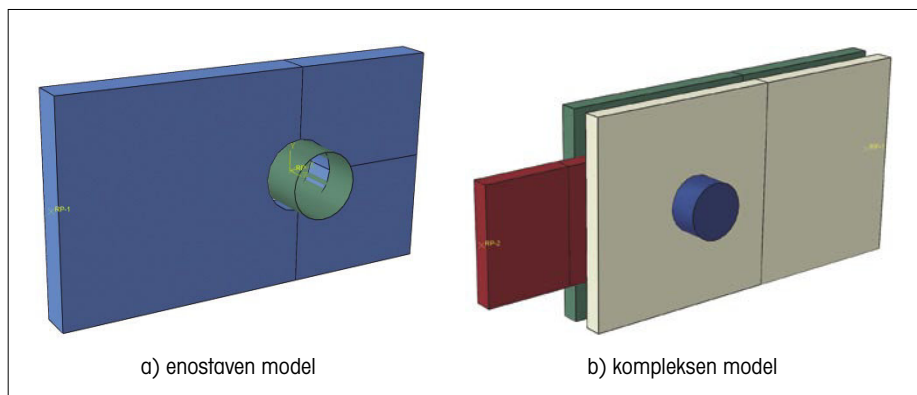
plaščem valja, ki predstavlja vijak. Preklopnih pločevin nismo upoštevali, saj bi to podaljšalo računski čas. Med pločevino in vijakom smo v normalni smeri definirali kontakt. Pločevino smo modelirali z osemvozlječnimi prostorski končnimi elementi z inkompatibilnimi

prostostnimi stopnjami (C3D8I). Ti elementi imajo boljše upogibno obnašanje kot osnovni osemvozlječni elementi z reducirano integracijo (C3D8R), hkrati pa so cenejši od kvadratičnih elementov z 20 vozlišči. Jeklu smo pripisali elasto-plastičen materialni model z Misesovim pogojem izotropičnega tečenja, ki je bil definiran z dejanskimi deformacijami in napetostmi, iz vrednotenimi s simulacijo standardnega nateznega testa (slika 12). Elastični

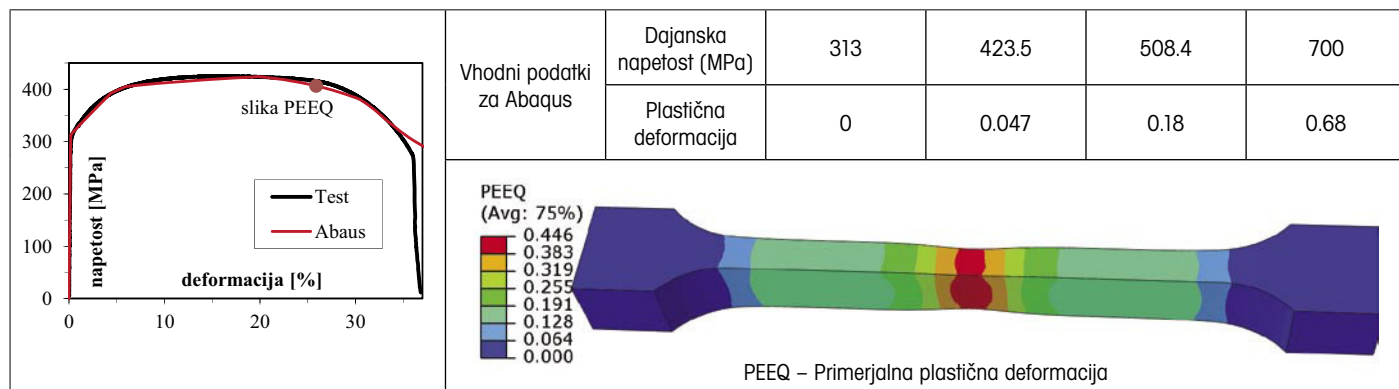
del je bil zajet z elastičnim modulom 210 GPa in koeficientom prečne kontrakcije 0,3.

Ustreznost preprostejšega numeričnega modela spoja smo preverili s kompleksnejšim modelom (slika 11b), v katerem smo zajeli preklopne pločevine in vse kontakte, ki nastopijo v spoju.

Na sliki 13 je prikazana primerjava med izračunanimi in izmerjenimi krivljami odziva za spoje z enim vijakom. Numerične krivulje so bile izračunane s preprostejšim numeričnim modelom in se dobro ujemajo s testom. Razlika se pojavi v začetnem delu krivulje, saj v analizah nismo zajeli začetnega zdrsa.



Slika 11 • Numerična modela



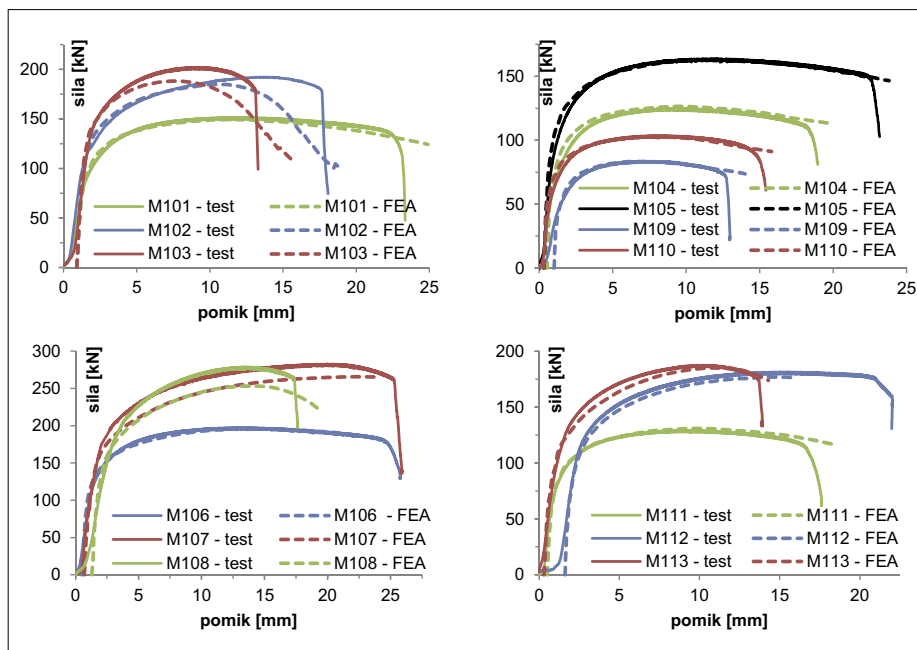
Slika 12 • Numerična simulacija standardnega nateznega testa in vhodni podatki za plastičen del materialnega modela za Abaqus

Odstopanje nastopi tudi pri spojih M102, M103, M107 in M108. Vsi ti spoji so se porušili v oslabiljenem prerezu, hkrati pa so razvili visoke bočne pritiske. Definicija numerično izračunane nosilnosti je trivialna, saj je izračun zajel tudi padajoči del krivulje. Primerjava preprostega in kompleksnejšega numeričnega modela je prikazana na sliki 14. Opazimo, da so preklopne pločevine pomembne prav pri spojih, kjer se razvijejo visoki bočni pritiski (M102, M107), saj preprečijo kopičenje materiala pred vijakom in s tem vsiljujejo ravninsko deformacijsko stanje (RDS). RDS v splošnem poveča togost v plastičnem območju in predstavlja zgornjo mejo odziva, ravninsko napetostno stanje (RNS) pa na račun togosti dopušča deformacije pločevine v smeri debeline in s tem predstavlja spodnjo mejo odziva. Eksperimentalni odziv je bil vedno nekje med RNS in RDS, pri nižjih bočnih pritiskih bliže RNS, višji bočni pritiski pa pričnejo ustvarjati RDS. Na sliki 14 je ta fenomen prikazan na primeru spoja M102, kjer sta prikazani krivulji odziva za čisti RNS in RDS.

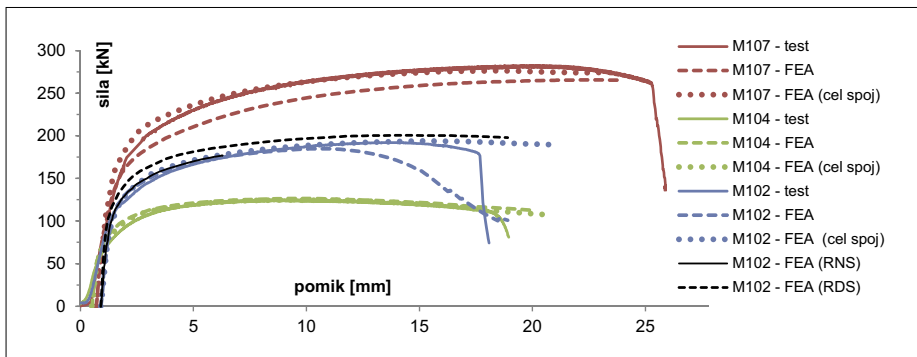
Slika 15 primerja numerično in eksperimentalno nosilnost. Korelacija med rezultati je 0,999, naklon regresije premice pa 1,04. S

tem zaključimo, da so numerični rezultati zanesljivi. Podobno zaključke lahko strnemo za spoje iz JVT (sliki 16, 17). Vpliv RDS na

nosilnost se pokaže pri spoju B120, kjer preprostejši numerični model ni približno ni ujel togosti v območju visokih bočnih pritiskov,



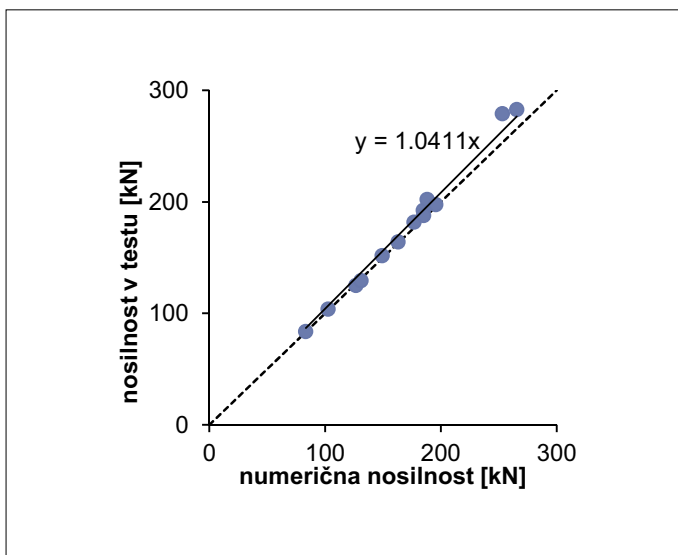
Slika 13 • Primerjava numeričnih (FEA) in eksperimentalnih krivulj odziva



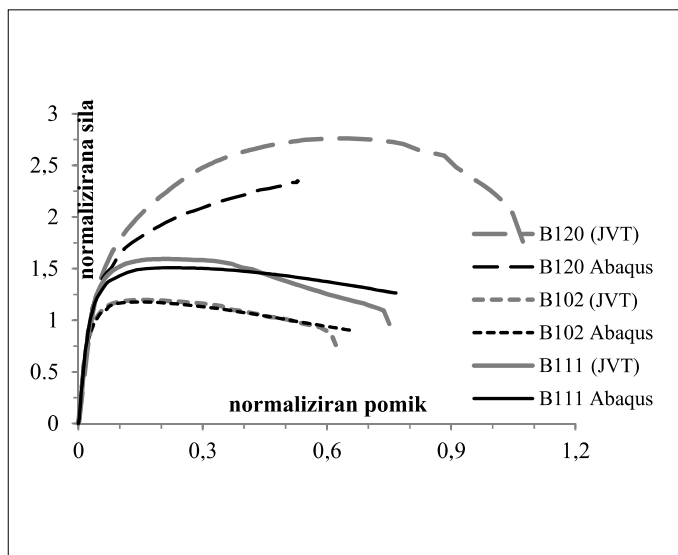
Slika 14 • Primerjava med različnimi numeričnimi modeli in testom

zaradi težav s konvergenco pa nosilnost ni bila dosežena.

V parametrično študijo je bilo vključenih 228 spojev (114 različnih geometrij in dva materiala). Geometrija spojev, normirana nosilnost in pomik pri doseženi nosilnosti so prikazani v preglednicah 3 in 4. V preglednicah je nosilnost normirana s produktom natezne trdnosti, debelino pločevine in premerom vijaka, pomik pri F_{max} pa predstavlja podaljšanje luknje. V analizi smo uporabili materialni model za MKJ S235 iz te preiskave in model za JVT S690 iz ((Može, 2010), (Može, 2011)). Upo-



Slika 15 • Primerjava numerične nosilnosti z eksperimentalno nosilnostjo



Slika 16 • Numerične in eksperimentalne krivulje odziva za spoje kvalitete S690 z enim vijakom (Može, 2010) v normalizirani obliki

B102	B111	B120
$e_1 = 1.2 d_0, e_2 = 1.2 d_0$	$e_1 = 1.5 d_0, e_2 = 1.5 d_0$	$e_1 = 2 d_0, e_2 = 2.5 d_0$
$t = 10 \text{ mm}, d_0 = 30 \text{ mm}, f_y = 847 \text{ MPa}, f_u = 885 \text{ MPa}$		

Slika 17 • Porušitve in osnovni podatki za preizkušance S690 (glej (Može, 2010))

rabljena materiala se razlikujeta v trdnosti in predvsem v duktilnosti, saj ima MKJ razmerje med natezno trdnostjo in napetostjo tečenja enako 1,36, medtem ko je pri JVT to razmerje le 1,05.

V študiji smo spreminjali naslednje parametre: premer vijaka d , debelino pločevine t , robno razdaljo e_1 in robno razdaljo e_2 . Pri izbranih robnih razdaljah $e_1 / d_0 = 1,2; 1,5; 2; 3$ smo spreminjali robno razdaljo e_2 / d_0 . Najkrajša izbrana robna razdalja e_2 je bila tista, pri kateri je nosilnost oslabiljenega prereza približno enaka nosilnosti v bočnem pritisku (npr. slika 18b – oslabiljen prerez je polno plastificiran). Za krajše robne razdalje e_2 je oslabiljen prerez vedno kritičen. Robno razdaljo smo povečevali, dokler nosilnost spoja ni pričela konvergirati k zgornji meji (slika 18a, c). Pri vseh spojih z geometrijo $e_1 = 3 d_0$ in $e_2 = 1,5 d_0$ se je oslabiljen prerez polno plastificiral, zato mora biti

S235 $f_y = 313 \text{ Mpa}$ $f_u = 425 \text{ Mpa}$		Normalizirana sila bočnega pritiska $F_{max}/(d \cdot t \cdot f_u)$						Pomik pri nosilnosti F_{max} (mm)					
		M16 $d = 16 \text{ mm}$ $d_0 = 18 \text{ mm}$			M24 $d = 24 \text{ mm}$ $d_0 = 26 \text{ mm}$			M16 $d = 16 \text{ mm}$ $d_0 = 18 \text{ mm}$			M24 $d = 24 \text{ mm}$ $d_0 = 26 \text{ mm}$		
e_1/d_0	e_2/d_0	debelina pločevine t (mm)						debelina pločevine t (mm)					
		8	12	16	8	12	20	8	12	16	8	12	20
1,2	1,2	1,26	1,26	1,26	1,22	1,23	1,54	7,3	7,3	7,3	10,7	11,1	11,0
	1,5	1,29	1,29	1,30	1,26	1,26	1,58	7,6	7,4	7,5	11,1	10,8	10,8
	2	1,36	1,37	1,37	1,32	1,33	1,66	7,8	7,7	7,7	10,6	10,3	10,8
	3	1,39	1,39	1,40	1,35	1,35	1,70	6,9	7,0	8,0	10,3	10,2	10,1
	5	1,39	1,40	1,40	1,35	1,35	1,70	7,3	7,6	7,5	9,9	10,2	9,9
1,5	1,25	1,67	1,66	1,66	1,62	1,63	2,03	10,5	11,4	11,2	14,8	16,2	15,4
	1,5	1,65	1,65	1,65	1,60	1,61	2,01	9,1	9,1	9,2	14,3	13,3	14,3
	2	1,71	1,71	1,72	1,67	1,67	2,09	9,2	9,5	9,5	13,6	13,8	14,7
	3	1,79	1,79	1,80	1,74	1,74	2,18	9,6	9,6	9,8	13,2	13,9	13,2
	5	1,80	1,80	1,80	1,75	1,74	2,19	9,8	9,8	9,9	13,0	13,9	13,2
2	1,5	2,21	2,21	2,20	2,16	2,15	2,69	14,1	13,9	13,6	21,2	21,4	22,1
	2	2,21	2,21	2,20	2,16	2,16	2,69	11,9	11,9	12,0	18,4	18,9	18,2
	3	2,33	2,33	2,32	2,28	2,26	2,84	14,7	14,4	14,3	20,4	17,6	20,1
	5	2,38	2,38	2,37	2,32	2,32	2,89	13,2	13,2	13,1	19,5	19,0	18,5
3	1,5*	2,29	2,32	2,35	2,19	2,21	2,81	10,2	10,9	11,6	13,2	13,8	15,5
	2	3,02	3,03	3,02	2,95	2,76	3,71	20,2	22,1	23,5	26,4	17,1	30,0
	3	3,09	3,09	3,09	3,00	2,80	3,76	18,7	20,9	22,4	24,5	16,2	26,8
	5	3,21	3,20	3,22	3,14	2,83	3,95	18,5	19,3	22,2	25,7	15,7	29,5
	7	3,23	3,22	3,24	3,16	2,84	3,96	18,4	19,8	22,4	25,5	15,6	29,2

* oslabljen prerez je polno plastificiran

Preglednica 3 • Rezultati parametrične študije za spoje z enim vijakom kvalitete S235

nosilnost teh spojev zajeta v kontroli oslabljenega prereza. Slika 18a prikazuje, da se pri povečanju robne razdalje za faktor 4 nosilnost poveča le za 10 %. To pomeni, da je nosilnost v bočnem pritisku skorajda neodvisna ob robne razdalje e_2 , če je seveda ta razdalja dovolj velika, da prepreči porušitev oslabljenega prereza (glej tudi preglednici 3 in 4). Iz rezultatov parametrične študije zaključimo, da porušitev v razkolu predstavlja spodnjo mejo nosilnosti v bočnem pritisku, strižna porušitev pa zgornjo mejo (glej sliko 18a).

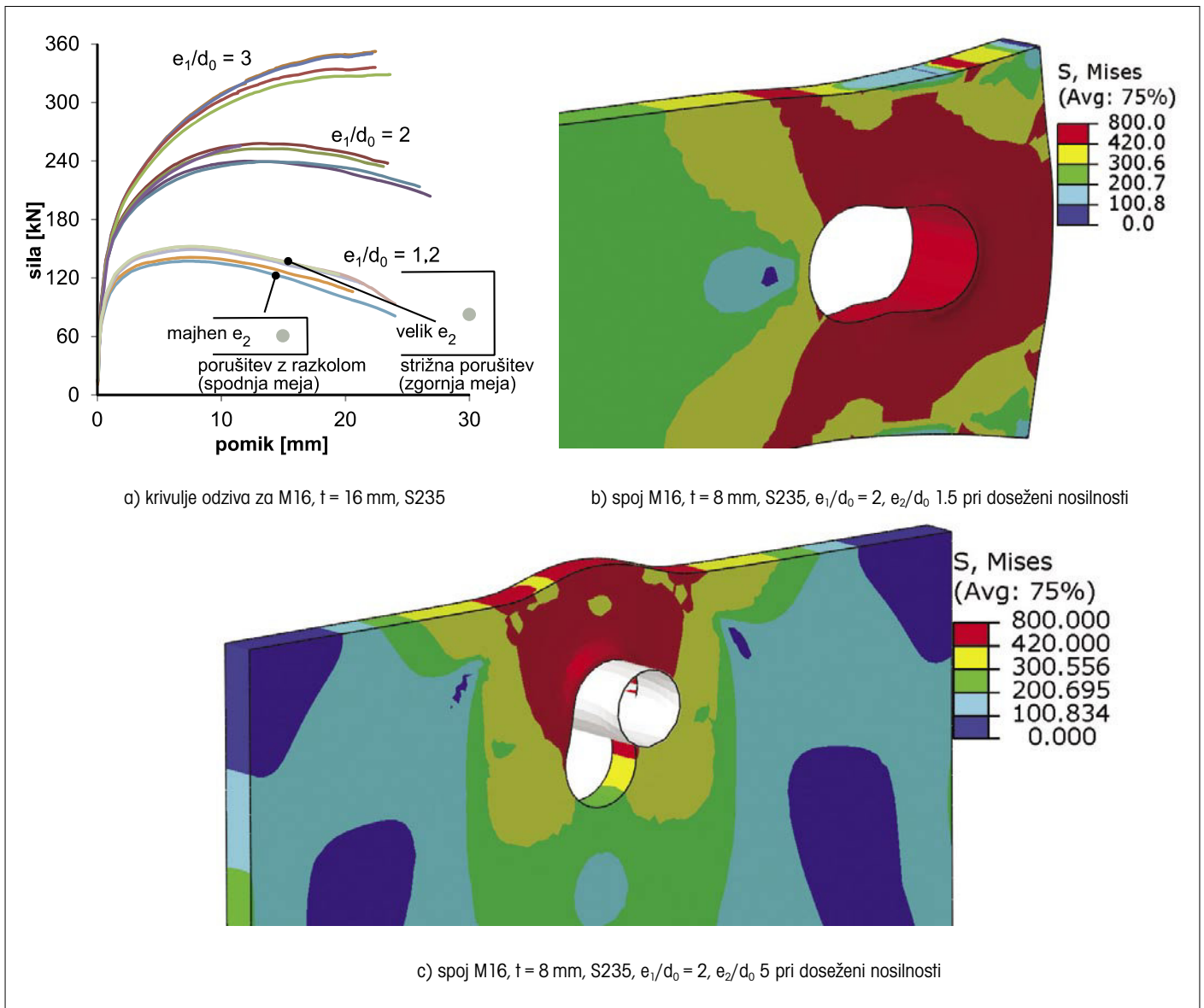
S690 $f_y = 796 \text{ Mpa}$ $f_u = 844 \text{ Mpa}$		Normalizirana sila bočnega pritiska $F_{max}/(d \cdot t \cdot f_u)$						Pomik pri nosilnosti F_{max} (mm)					
		M16 $d = 16 \text{ mm}$ $d_0 = 18 \text{ mm}$			M24 $d = 24 \text{ mm}$ $d_0 = 26 \text{ mm}$			M16 $d = 16 \text{ mm}$ $d_0 = 18 \text{ mm}$			M24 $d = 24 \text{ mm}$ $d_0 = 26 \text{ mm}$		
e_1/d_0	e_2/d_0	debelina pločevine t (mm)						debelina pločevine t (mm)					
		8	12	16	8	12	20	8	12	16	8	12	20
1,2	1,2	1,15	1,15	1,16	1,11	1,12	1,13	2,9	3,0	2,9	3,5	3,8	3,5
	1,5	1,19	1,19	1,20	1,15	1,16	1,16	2,9	3,0	2,9	4,0	4,3	4,2
	2	1,23	1,23	1,24	1,20	1,21	1,20	3,1	3,1	3,0	4,8	4,7	4,5
	3	1,23	1,23	1,24	1,22	1,22	1,22	2,8	3,2	2,9	4,7	4,3	4,6
	5	1,24	1,25	1,25	1,22	1,22	1,23	2,9	2,8	2,9	4,3	4,3	4,1
1,5	1,25	1,44	1,45	1,45	1,41	1,41	1,42	3,7	3,8	3,2	5,4	5,2	5,3
	1,5	1,45	1,46	1,46	1,42	1,42	1,43	4,2	4,3	2,9	5,5	6,0	5,4
	2	1,51	1,51	1,51	1,48	1,48	1,47	5,2	5,3	3,6	7,6	7,6	7,2
	3	1,54	1,54	1,54	1,51	1,51	1,51	5,4	4,6	4,4	7,5	6,6	5,0
	5	1,55	1,55	1,55	1,52	1,51	1,52	5,3	4,5	4,3	7,0	6,6	5,2
2	1,5	1,90	1,88	1,87	1,87	1,85	1,84	9,1	8,8	8,8	12,2	11,9	11,9
	2	1,93	1,91	1,90	1,89	1,88	1,86	9,4	9,3	9,2	13,6	14,5	13,2
	3	2,00	1,98	1,96	1,97	1,95	1,93	10,1	10,2	10,0	15,1	14,7	14,9
	5	2,02	2,00	1,99	1,99	1,98	1,95	10,2	10,3	9,9	14,2	13,8	14,0
3	1,5*	2,21	2,25	2,26	2,10	2,14	2,18	12,8	15,2	16,8	15,7	18,0	22,9
	2	2,49	2,54	2,56	2,39	2,34	2,49	12,1	14,3	16,9	14,8	14,5	20,8
	3	2,47	2,54	2,56	2,38	2,33	2,48	11,9	14,3	16,4	14,5	14,0	20,2
	5	2,47	2,55	2,60	2,38	2,31	2,53	11,9	14,3	16,8	14,6	13,5	21,5
	7	2,47	2,56	2,61	2,39	2,32	2,53	11,8	14,2	16,7	14,6	13,7	20,9

* oslabljen prerez je polno plastificiran

Preglednica 4 • Rezultati parametrične študije za spoje z enim vijakom kvalitete S690

Analiza rezultatov parametrične študije je pokazala, da je numerični izračun pri spojih z robno razdaljo $e_1/d_0 \leq 2$ vedno zajel padajoči del odziva. S tem je nosilnost F_{max} določena neposredno iz rezultatov. V primeru daljših robnih razdalj $e_1/d_0 = 3$ je bila nosilnost definirana s platojem, ki je nastal pri velikem podaljšanju luknje (glej npr. krivulje za $e_1/d_0 = 3$ na sliki 18a), saj so se analize prenehale zaradi težav s konvergenco, ki jo je povzročilo kopičenje materiala pred vijakom. Zato so rezultati analiz verodostojni

za $e_1/d_0 \leq 2$, medtem ko so nosilnosti za daljše robne razdalje precej na varni strani. To smo pokazali že s primerjavo festnih in numeričnih rezultatov na slikah 13 in 16. Rezultati spojev z daljšimi robnimi razdaljami so zato predstavljeni zgolj zaradi trenda. Teh rezultatov za MKJ ne moremo primerjati s testi, saj teh za takšne geometrije ni na voljo. Ne smemo pa pozabiti, da so spoji iz JVT dosegli bočne pritiske $3,5 f_u$, ki so nastali pri podaljšanju luknje za cel premer vijaka (sliki 7, 9).



Slika 18 • Krivulje odziva in polje Misesovih napetosti za izbrane spoje

5 • TEORETIČNI MODELI NOSILNOSTI V BOČNEM PRITISKU

5.1 Primerjava eksperimentalnih rezultatov s kontrolami nosilnosti v Evrokodu

Standarda SIST EN 1993-1-1 (CEN, 2005a) in SIST EN 1993-1-8 (CEN, 2005b) podajata več mejnih kontrol nosilnosti, ki ustrezajo mejni nosilnosti spojev z enim in dvema vijakoma. Podajamo samo kontrole nosilnosti v pločevini, saj nosilnost vijaka v predstavljeni študiji ni merodajna.

Mejna projektna nosilnost oslabiljenega prereza, ki velja za MKJ in JVT, je podana ob

predpostavki enakomerne napetosti v oslabiljenem prerezu:

$$F_{net,Rd} = \frac{0,9 A_{net} f_u}{\gamma_{M2}} \quad (1)$$

Mejna projektna nosilnost v bočnem pritisku za en vijak pri kratkih robnih razdaljah e_1 preprečuje iztrg vijaka iz pločevine, za daljše razdalje pa omeji povprečno napetost na $2,5 f_u$ z namenom preprečitve prevelikega podaljšanja luknje za vijak:

$$F_{b,Rd} = \frac{k_1 \alpha_b d \cdot t \cdot f_u}{\gamma_{M2}}, \quad (2)$$

kjer koeficienta k_1 in α_b upoštevata pozicijo vijaka in smer obtežbe:

- v smeri prenosa obtežbe

$$\alpha_b = \min \left(\alpha_d; \frac{f_{ub}}{f_u}; 1 \right) \quad (3)$$

$$\alpha_d = \frac{e_1}{3d_0} \quad \text{za robne vijake} \quad (4)$$

$$\alpha_d = \frac{p_1}{3d_0} - \frac{1}{4} \quad \text{za notranje vijake} \quad (5)$$

- pravokotno na smer delovanja obtežbe

$$k_1 = \min\left(2, 8 \frac{e_2}{d_0} - 1, 7; 2, 5\right)$$

za robne vijake (6)

$$k_1 = \min\left(1, 4 \frac{p_2}{d_0} - 1, 7; 2, 5\right)$$

za notranje vijake (7)

Pri spoju z dvema vijakoma, ki sta postavljena pravokotno na smer obtežbe, moramo upoštevati, da lahko vijak zavzame pozicijo robnega ali notranjega vijaka. Zato je treba upoštevati manjšo izmed vrednosti enačb (6) in (7).

Interakcijo med vijakoma preverimo s projektno kontrolo strižnega iztrga vijakov $V_{eff,Rd}$. V obravnavanem primeru spoja je skupina vijakov obremenjena simetrično:

$$V_{eff,Rd} = \frac{A_{nt} f_u}{\gamma_{M2}} + \frac{A_{nv} f_y}{\sqrt{3} \gamma_{M0}} \quad (8)$$

Koeficienti, ki nastopajo v enačbah (1) do (8), so definirani kot:

f_y, f_u, f_{ub} napetost tečenja pločevine, natezna trdnost pločevine in vijaka

A_{net} oslabljen prerez

e_v, p_1 robna razdalja, razdalja med vijaki v smeri obtežbe

e_2, p_2 robna razdalja, razdalja med vijaki pravokotno na smer obtežbe

d, d_0 premer vijaka in luknje za vijak

t debelina pločevine

A_{nt}, A_{nv} oslabljen prerez v nategu, oslabljen prerez v strigu

γ_{Mi} delni varnostni faktorji

Evrokod (CEN, 2005a) podaja tudi projektno nosilnost polnega prereza, ki pa ne predstavlja zloma materiala in tudi v nobenem izmed primerov ni merodajna.

V preglednici 5 so podane nosilnosti, dosežene v testu, z opisom porušitve in nosilnosti, izračunane po EC3, kjer je podana kritična oziroma merodajna kontrola. V izračunih so bile upoštevane dejanske vrednosti parametrov geometrije in materiala brez upoštevanja delnih varnostnih faktorjev. Opazimo, da EC3 večinoma pravilno opiše tip porušitve za spoje z enim vijakom (z izjemo M102, M103, M107 in M112), medtem ko pri spojih z dvema vijakoma edino spoja M2065 in M206 ustrezata dejanskim porušitvam. Čeprav so se spoji M102, M107, in M112 porušili v oslabljenem prerezu, so pred vijakom nastali veliki bočni pritiski, zato je

lahko tu merodajna tudi kontrola nosilnosti v bočnem pritisku, saj sta porušitev oslabljenega prereza in porušitev zaradi bočnih pritiskov zelo izenačeni. Na sliki 19 pa so prikazane eksperimentalne nosilnosti v odvisnosti od merodajne nosilnosti po EC3. Če je merodajna nosilnost oslabljenega prereza, potem je takšna porušitev tudi nastopila. Opozoriti velja, da implikacija v nasprotni smeri ne velja. Zato krogi, ki na sliki 19 predstavljajo rezultate nosilnosti oslabljenega prereza po EC3, skoraj popolno ležijo na

regresijski premici. Naklon premice $b = 1,16$ nakazuje na to, da je koeficient 0,9 v kontroli oslabljenega prereza (1) odveč (glej tudi (Može, 2007), ki obravnava nosilnost oslabljenih prerezov). Diamanti na sliki 19 predstavljajo rezultate, kjer je bila merodajna nosilnost v bočnem pritisku. Povsem jasno je, da je za določeno skupino rezultatov ta kontrola na precej varni strani. Iz tega velja zaključiti, da kontrola nosilnosti v bočnem pritisku po EC3 ni osnovana na pravilnem modelu nosilnosti.

ime	test	kontrola nosilnosti po SIST EN 1993-1-8							
		tip porušitve	F_{max} (kN)	bočni pritisk		ΣF_b (kN)	F_{net} (kN)	V_{eff} (kN)	kritična kontrola
				k_1 α_b	F_b (kN)				
spoji z enim vijakom	M101	strižna porušitev	151	0.72	88	88	174		bočni pritisk
	M102	oslabljen prerez (visoki bočni pritiski)	192	0.87	107	107	174		bočni pritisk
	M103	oslabljen prerez	202	1.16	143	143	174		bočni pritisk
	M104	strižna porušitev	125	0.83	102	102	239		bočni pritisk
	M105	strižna porušitev	164	1.03	126	126	239		bočni pritisk
	M106	strižna porušitev/razkol	197	1.25	153	153	239		bočni pritisk
	M107	oslabljen prerez (visoki bočni pritiski)	283	1.67	204	204	239		bočni pritisk
	M108	oslabljen prerez	279	2.08	255	255	239		oslabljen prerez
	M109	strižna porušitev	84	0.83	68	68	165		bočni pritisk
	M110	strižna porušitev	104	1.02	83	83	165		bočni pritisk
	M111	strižna porušitev	129	1.25	102	102	165		bočni pritisk
	M112	oslabljen prerez (visoki bočni pritiski)	182	1.67	136	136	165		bočni pritisk
	M113	oslabljen prerez	188	2.08	170	170	165		oslabljen prerez
spoji 2 vijaka	M201	strižni iztrg vijakov	359	0.84	85	171	528	254	bočni pritisk
	M202	strižni iztrg vijakov	493	1.40	142	285	528	349	bočni pritisk
	M203	strižna porušitev/del oslabljenega prereza	348	0.87	89	177	418	259	bočni pritisk
	M204	del oslabljenega prereza	455	1.45	148	295	418	354	bočni pritisk
	M205	strižna porušitev	353	1.25	128	255	404	320	bočni pritisk
	M206	oslabljen prerez	469	2.08	213	425	404	415	oslabljen prerez

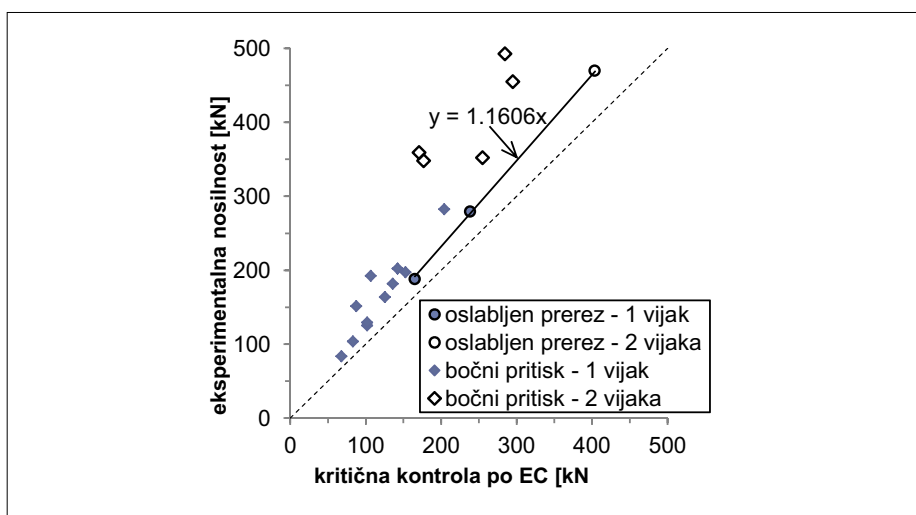
Preglednica 5 • Rezultati testov in nosilnosti po Evrokodu 3

Na slikah 20 in 21 so predstavljeni rezultati parametrične študije z vidika nosilnosti v bočnem pritisku in nosilnosti oslabiljenega prereza po EC3, ločeno za jeklo S235 in S690. Na sliki 20a so podane absolutne vrednosti nosilnosti, na sliki 20b pa normirane vrednosti. Na sliki 20a se razločno opazi skupino rezultatov, ki odstopajo na zgornjo stran regresijske premice. To skupino lahko identificiramo na sliki 20b, kjer se rezultati s kratkimi robnimi razdaljami $e_2 < 1,5 d_0$ pomaknejo precej nad regresijsko premico z naklonom $b = 1,299$. Na sliki 20b so krogci, ki predstavljajo nosilnosti v bočnem pritisku, združeni v navpične linije. Zaradi formulacije modela nosilnosti v bočnem pritisku vsaka izmed linij predstavlja konstantno robno razdaljo e_1 . Spodnji krogec predstavlja porušitev z razkolom, zgornji pa čisto strižno porušitev oziroma širina pločevine narašča od spodaj navzgor (glej tudi 18). Za robno razdaljo $e_1 < 3 d_0$ je razlika v nosilnosti med spodnjim in zgornjim krogcem majhna. Nosilnost je omejena na $2,5 f_u$ za spoje z robno razdaljo $e_1 \geq 3 d_0$ (glej tudi enačbo (2)). Vsi numerični rezultati za spoje iz MKJ so dosegli nosilnost, višjo od $2,5 f_u$, čeprav so se analize končale zaradi težav s konvergenco. Ker je poleg tega tudi primerjava z eksperimentalnimi rezultati pokazala, da so numerični rezultati za daljše robne razdalje e_1 vedno precej na varni strani, teh rezultatov ne smemo upoštevati kot verodostojnih. Podobni zaključki veljajo za spoje iz JVT na sliki 21. Pri teh spojih je razlika med porušitvijo z razkolom in čisto strižno porušitvijo manjša. Nižji je tudi naklon regresijske premice ($b = 1,091$), nosilnost pa je malenkost nižja, kar razberemo tudi iz testov.

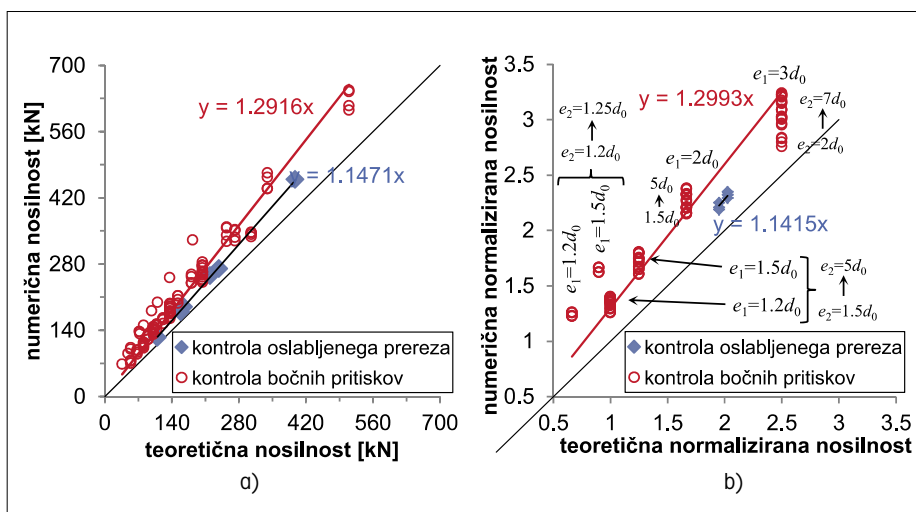
Za šest rezultatov je kritična kontrola nosilnosti oslabiljenega prereza. Ti rezultati so označeni v preglednicah 3 in 4, na slikah 20 in 21 pa so označeni z diamanti, ki ležijo zelo blizu ali celo na regresijski premici. Glede na naklon premice tudi tu opazimo, da bi lahko v enačbi (1) koeficient 0,9 povečali na 1.

5.2 Spremenjeni modeli nosilnosti z vidika Evrokoda

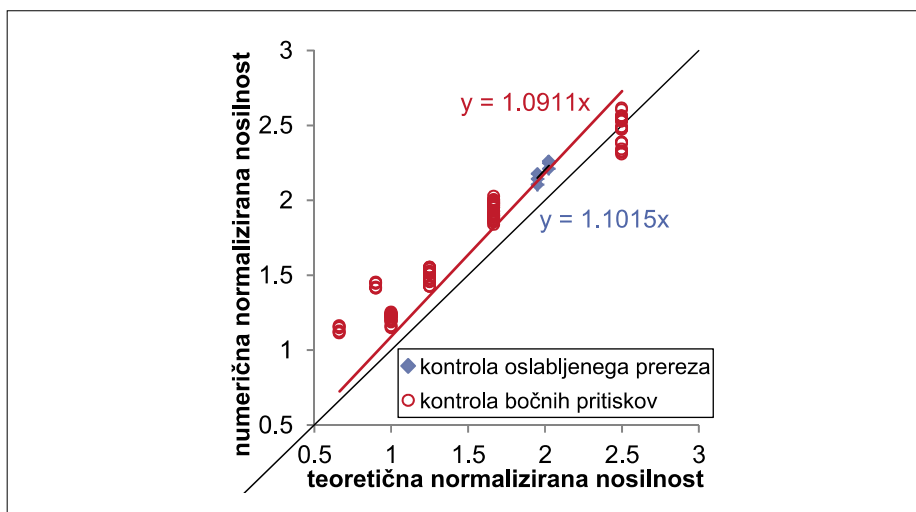
Bočni pritisk povzroči velike tlačne glavne napetosti v bližini kontakta med vijakom in pločevino (slika 22). Pločevina tlakom nasprotuje z nateznim lokom, ki se tvori v pločevini okoli vijaka (sliki 22 b, d) in se sidra v oslabiljenem prerezu. Zaradi majhne površine kontakta se v pločevini razvijejo visoke tlačne napetosti (sliki 22 a, c), ki povzročijo tečenje materiala že pri nizki obremenitvi. Razpoka se odpre v temenu nateznega loka ali v



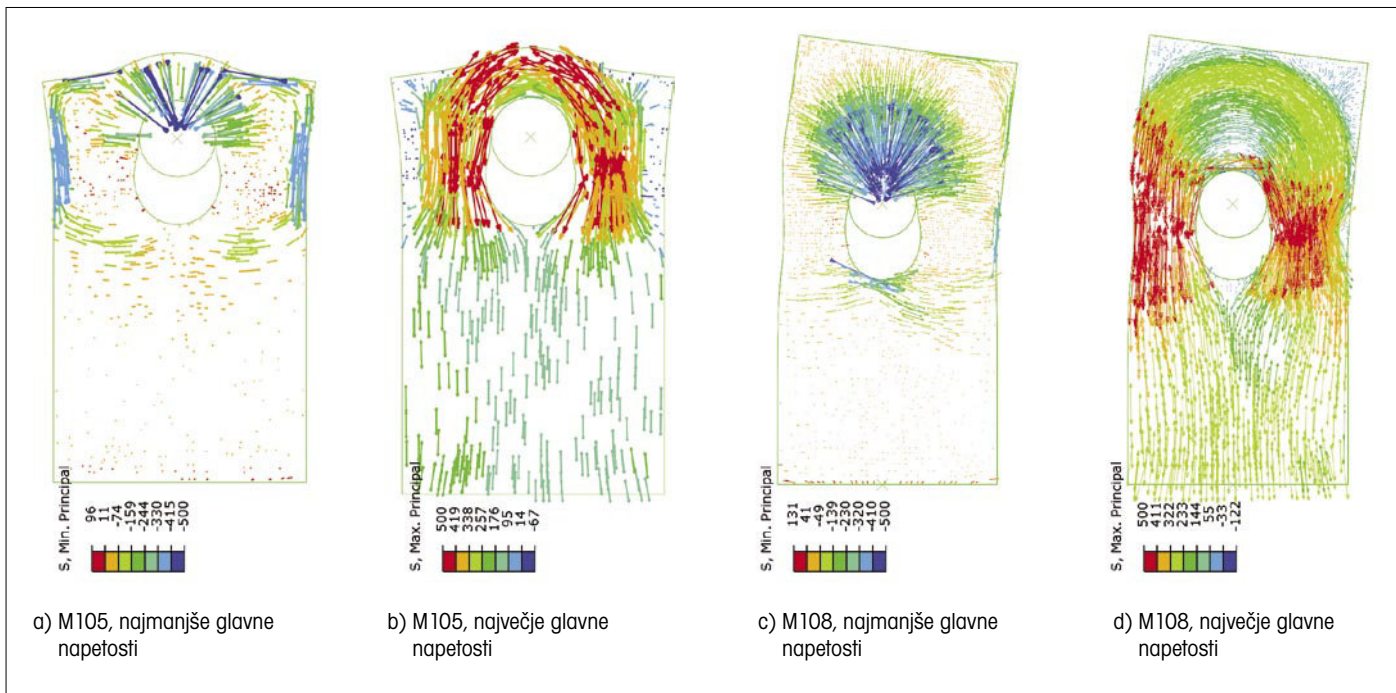
Slika 19 • Kontrole nosilnosti po Evrokodu 3 v primerjavi z rezultati testov



Slika 20 • Kontrole nosilnosti Evrokoda 3 v odvisnosti od numeričnih nosilnosti za jeklo S235



Slika 21 • Kontrole nosilnosti Evrokoda 3 v odvisnosti od numeričnih nosilnosti za jeklo S690



Slika 22 • Glavne napetosti pri doseženi nosilnosti

strižni ravnini (slika 4). Razvoj polne nosilnosti v bočnem pritisku lahko omejuje prekratka robna razdalja e_2 ali prekratka razdalja med vijaki p_2 . Zato se visoke napetosti ne razvijejo v nateznem loku, ampak nekje drugje, s čimer nastane porušitev drugega tipa, kot na primer porušitev oslabiljenega prereza (slika 22d) ali strižni iztrg vijakov. Te porušitve pa so zajete v drugih kontrolah nosilnosti.

Čeprav je dejansko napetostno polje kompleksno, ga lahko dobro opišemo s povprečnim bočnim pritiskom, ki nastane pred vijakom. Utrjevanje jekla in prostorsko napetostno stanje dovolita nastanek napetosti, ki so višje od napetosti tečenja. Takšen pristop je uporabljen v različnih standardih, na primer ((CEN, 2005b), (AISC, 2010)). Osnovna parametra, ki opredelita nosilnost v bočnem pritisku sta robna razdalja e_1 in natezna trdost pločevine. Evrokod 3 (CEN, 2005b) v nosilnosti v bočnem pritisku upošteva tudi robno razdaljo e_2 in razdaljo med vijaki p_2 , ki sta pravokotni na smer obtežbe. Ta parameter je bil v osnovi dodan modelu verjetno zaradi posredne kontrole nosilnosti oslabiljenega prereza in strižnega iztrga. Pokazali pa smo, da ta parameter nesmiselno znatno zniža nosilnost v bočnem pritisku.

Tu predpostavljeni model nosilnosti je konceptualno enak osnovnemu modelu v Evrokodu, vendar je preprostejši in manj konservativen kot trenutno pravilo. Pomembno je tudi vedeti, da je bila kontrola nosilnosti v EC3 statistično

ovrednotena brez koeficienta k_1 (glej enačbi (6), (7)). Predlagano je bilo tudi, da redukcija nosilnosti zaradi kratkih robnih razdalj ni potrebna, vendar je bil koeficient k_1 vključen v končno formulo nosilnosti samo zaradi pomanjkanja eksperimentalnih rezultatov (Snijder, 1988a). Poleg tega je v spremljajočem dokumentu k Evrokodu (Snijder, 1988b) navedeno, da bi bila lahko kontrola nosilnosti v bočnem pritisku za jekla kvalitete S235 manj konservativna (rezultati so takrat obstajali večinoma le za S235).

Spremenjeni model nosilnosti upošteva, da je povprečna nosilnost v bočnem pritisku linearno odvisna od robne razdalje e_1 in razdalje med vijaki p_1 , ne upošteva pa razdalj pravokotno na smer obtežbe. Zato lahko definiramo, da ima nosilnost v bočnem pritisku lokalni značaj. Nosilnost pločevine v bočnem pritisku tako definiramo kot:

$$F_b = k_B \alpha_d \cdot t \cdot d \cdot f_u, \quad (9)$$

kjer koeficienti k_B in α_d upoštevajo kvaliteto pločevine in geometrijske parametre:

$$\alpha_d = \frac{e_1}{d_0} \quad \text{za robne vijake} \quad (10)$$

$$\alpha_d = \frac{p_1}{d_0} - \frac{3}{4} \quad \text{za notranje vijake} \quad (11)$$

$$k_B = \begin{cases} 1,0; & \text{za S235} \\ 0,9; & \text{za S690} \end{cases} \quad (12)$$

Če upoštevamo, da robna razdalja e_2 in razdalja p_2 ne vplivata na bočni pritisk ($k_1 = 2,5$), potem bi bila ob upoštevanju vrednosti iz Evrokoda vrednost koeficienta k_B enaka $2,5 / 3 = 0,83$. Iz enačbe (12) sledi, da vrne spremenjeni model nosilnosti 17 % višjo vrednost za S235 in 7 % višjo za S690. Če so robne razdalje krajše od $e_2 < 1,5 d_0$, potem so vrednosti pri spremenjenem modelu še višje. Za notranji vijak lahko vrednost za α_d (11) izpeljemo neposredno iz enačb (5) in (6):

$$2,5 \left(\frac{p_1}{3d_0} - \frac{1}{4} \right) = \frac{2,5}{3} \left(\frac{p_1}{d_0} - \frac{3}{4} \right). \quad (13)$$

Enačba (11) je tu predstavljena samo zaradi celovitosti rešitve. Vpliv razdalje med vijaki je še predmet raziskave.

Poleg nosilnosti v bočnem pritisku spreminimo tudi nosilnost oslabiljenega prereza. V (Može, 2007) je predstavljeno, da lahko nosilnost oslabiljenega prereza tvorimo kot:

$$F_{net,Rd} = \frac{A_{net} f_u}{\gamma_{M2}} \quad (14)$$

S takšno definicijo bo kontrola oslabiljenega prereza kritična le za spoje, ki razvijejo na-

petost f_u po celotnem oslabiljenem prerezu, in ne tudi za porušitev z razkolom, ki doseže skoraj polno nosilnost v oslabiljenem prerezu. Porušitev z razkolom bi morala biti zajeta z enačbo (9).

Pokazali smo, da je v primeru naših spojev nosilnost strižnega iztrga vijakov po EC3 zelo konservativna. Zato to nosilnost spremenimo po zgledu ameriškega standarda AISC (AISC, 2010) in jo v Evrokodovi terminologiji zapišemo kot:

$$V_{eff} = \min\left(\frac{f_u}{\sqrt{3}} A_{nv}; \frac{f_y}{\sqrt{3}} A_{gv}\right) + f_u A_{nt}, \quad (15)$$

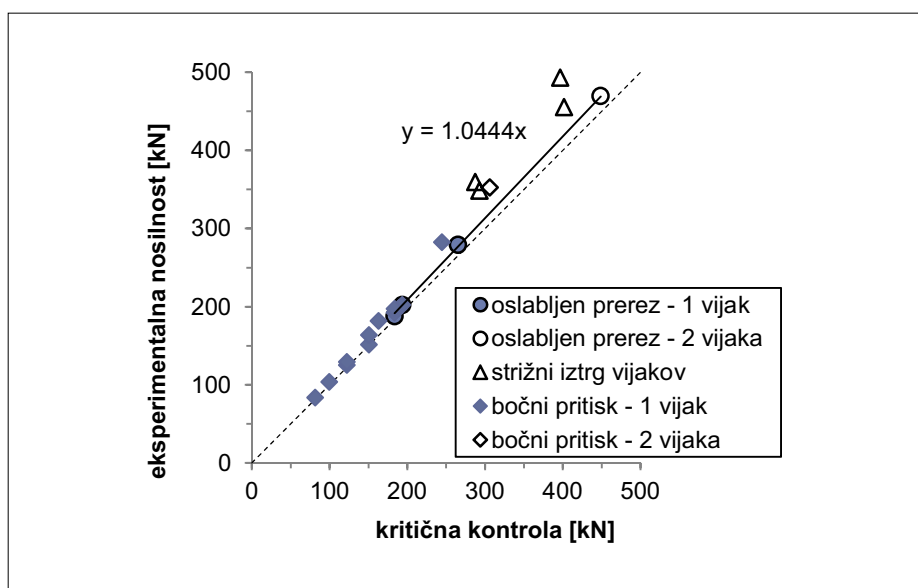
kjer je A_{gv} poln prerez v strigu.

V preglednici 6 so navedeni rezultati testov in nosilnosti, izračunane po spremenjenih modelih nosilnosti, podanih v enačbah (9), (14) in (15). Kritična kontrola nosilnosti se po spremembah modelov nosilnosti ujema z dejansko porušitvijo. Na sliki 23 je prikazana odvisnost med spremenjenimi teoretičnimi modeli nosilnosti in testi, kjer so rezultati ločeni glede na kritični teoretični model nosilnosti in na število vijakov. Diamanti označujejo kontrolo nosilnosti v bočnem pritisku in so poravnani blizu simetrale diagrama brez večjega raztrosa. Krogci podobno kot na sliki 19 ležijo blizu regresijske premice, le da je tu naklon premice nižji $b = 1,04$. Najbolj izmed vseh rezultatov so raztreseni trikotniki, ki predstavljajo kontrolo strižnega iztrga vijakov, vendar je raztros manjši kot na sliki 19. Če te rezultate, ki so izračunani po ameriškem AISC-modelu nosilnosti na strižni iztrg (15), primerjamo z Evrokodovo kontrolo (8), zaznamo, da AISC podaja boljše rezultate. Zanimivo je, da je v primeru spojev M201 in M203 nosilnost v bočnem pritisku (9) 12 % in 15 % nižja od nosilnosti, dosežene v testu. Spoja sta se porušila s strižnim iztrgom vijakov, vendar je bil bočni pritisk blizu svoje mejne nosilnosti oziroma blizu porušitve z razkolom. Iz tega sklepamo, da spremenjeni model nosilnosti v bočnem pritisku predstavlja spodnjo mejo nosilnosti (informacije o spodnji meji so prikazane na sliki 18a)

Na sliki 24 je predstavljena spremenjena kontrola nosilnosti v bočnem pritisku (9) za 31 testov spojev z enim vijakom iz JVT, ki so plod preiskav različnih avtorjev ((Kim, 1999), (Aalberg, 2001), (Aalberg, 2002), (Rex, 2003)). Naši testi so podrobneje predstavljeni v (Može, 2010), na sliki 24 pa so podani samo spoji, ki so se porušili v bočnem pritisku. V (Rex, 2003) so zabeležili vihanje pločevin, ki znižuje nosilnost v bočnem pritisku. Teh rezultatov na

ime	test		spremenjene kontrole nosilnosti						
	tip porušitve	F_{max} (kN)	bočni pritisk		ΣF_b (kN)	F_{net} (kN)	V_{eff} (kN)	kritična kontrola	
			k_B α_d	F_b (kN)					
spoji z enim vijakom	M101	strižna porušitev	151	1,23	151	151	194		bočni pritisk
	M102	oslabiljen prerez (visoki bočni pritiski)	192	1,50	184	184	194		bočni pritisk
	M103	oslabiljen prerez	202	2,00	245	245	194		oslabiljen prerez
	M104	strižna porušitev	125	1,00	122	122	265		bočni pritisk
	M105	strižna porušitev	164	1,23	151	151	265		bočni pritisk
	M106	strižna porušitev/razkol	197	1,50	184	184	265		bočni pritisk
	M107	oslabiljen prerez (visoki bočni pritiski)	283	2,00	245	245	265		bočni pritisk
	M108	oslabiljen prerez	279	2,50	306	306	265		oslabiljen prerez
	M109	strižna porušitev	84	1,00	82	82	184		bočni pritisk
	M110	strižna porušitev	104	1,22	100	100	184		bočni pritisk
	M111	strižna porušitev	129	1,50	122	122	184		bočni pritisk
	M112	oslabiljen prerez (visoki bočni pritiski)	182	2,00	163	163	184		bočni pritisk
	M113	oslabiljen prerez	188	2,50	204	204	184		oslabiljen prerez
spoji 2 vijaka	M201	strižni iztrg vijakov	359	1,50	153	306	587	288	strižni iztrg
	M202	strižni iztrg vijakov	493	2,50	255	510	587	397	strižni iztrg
	M203	strižna porušitev/ del oslabiljenega prereza	348	1,50	153	306	464	293	strižni iztrg
	M204	del oslabiljenega prereza	455	2,50	255	510	464	402	strižni iztrg
	M205	strižna porušitev	353	1,50	153	306	449	354	bočni pritisk
	M206	oslabiljen prerez	469	2,50	255	510	449	463	oslabiljen prerez

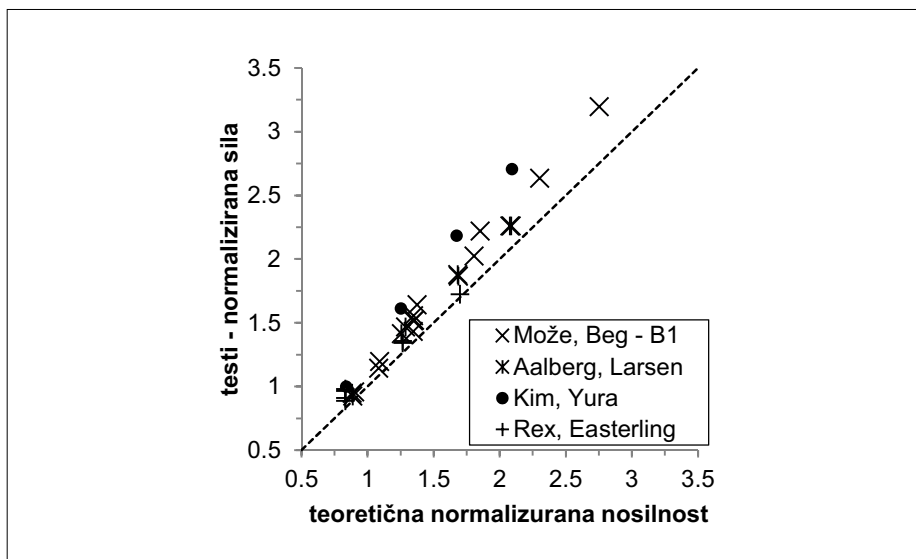
Preglednica 6 • Rezultati testov in spremenjene kontrole nosilnosti



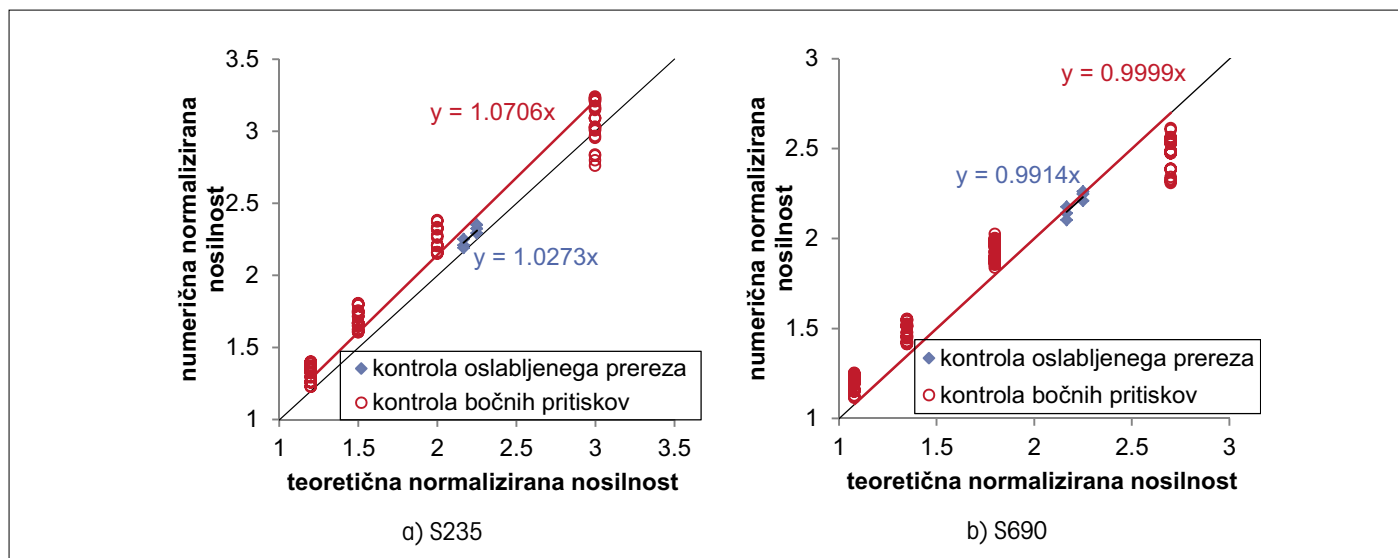
Slika 23 • Spremenjene kontrole nosilnosti v primerjavi z rezultati testov

sliki 24 ne prikazujemo. Vsi rezultati so nad simetralo (»varna stran«). Na diagramu so zabeležene normirane nosilnosti, z najvišjo nosilnostjo $3,2 f_{lv}$ doseženo pri porušitvi z razkolom.

Na sliki 25 so prikazani rezultati parametrične analize, ločeno za S235 in S690. Krogi označujejo rezultate, kjer je kritična kontrola nosilnost v bočnem pritisku. Vsi ležijo nad simetralo, razen rezultatov, kjer je robna razdalja $e_1 = 3 d_0$. Za te spoje smo zaključili, da niso pomembni, saj numerični model pri daljših robnih razdaljah e_1 ne ustreza dejanskemu odzivu pločevin.



Slika 24 • Spremenjene kontrole nosilnosti v primerjavi z rezultati testov za JVT iz literature



Slika 25 • Spremenjeni kontroli nosilnosti v odvisnosti od numeričnih nosilnosti za jekli S235 in S690

6 • DISKUSIJA

V preklonih spojih z vijaki v strigu se razvijejo visoke napetosti zaradi bočnega pritiska vijaka na pločevino. Pri obravnavi vijaka predpostavimo, da upogib ni pomemben in da celotno obremenitev prevzamejo strižne napetosti v strižni ravnini. Tak model poenostavi obravnavo vijaka, saj je strižna nosilnost vijaka s kontrolo nosilnosti dobro ovrednotena. Nosilnost pločevine pa je odvisna od njene geometrije in trdnosti materiala. V dobro zasnovanem spoju vijaki ne predstav-

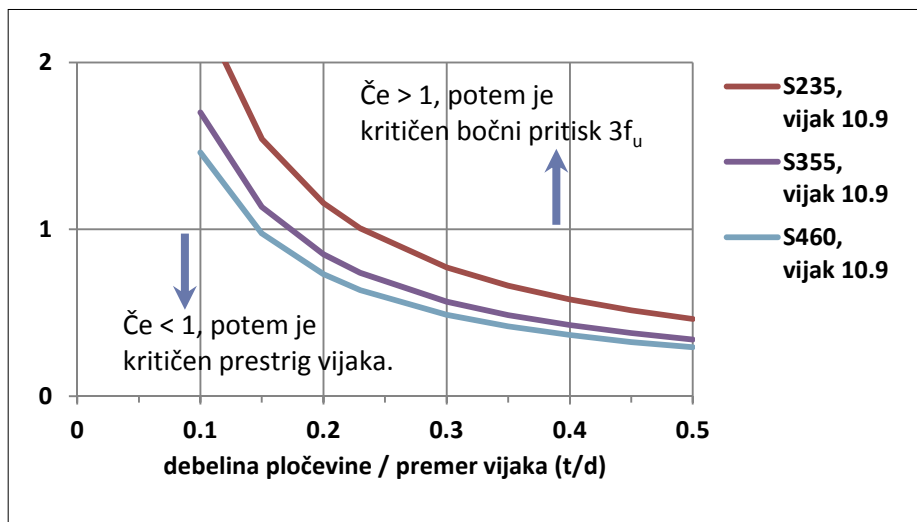
ljajo šibkega člena. Če je dejanska nosilnost pločevine v bočnem pritisku višja, kot jo upoštevamo v izračunu, potem se dejanski odziv spoja razlikuje od predpostavljenega. Zato moramo pravilno razumeti nosilnost v bočnem pritisku. Pomembno je razumeti, da bočni pritisk povzroči lokalno porušitev, saj plastično deformira material pred vijakom. Nosilnost v bočnem pritisku pa je odvisna od natezne trdnosti pločevine in robne razdalje e_1 oziroma od razdalje med vijaki v smeri

obtežbe p_1 in je praktično neodvisna od razdalj pravokotno na smer obtežbe. V spojih z več vijaki lahko porušitev zaradi bočnih pritiskov nastane pred enim vijakom ali pred več vijaki hkrati (Može, 2011).

Pokazali smo, da spremenjeni model nosilnosti v bočnem pritisku zelo dobro ustreza testnim rezultatom tako za MKJ kot za JVT. Kontrola nosilnosti je definirana v smislu, da je porušitev v bočnem pritisku lokalna, kar pomeni, da je neposredno odvisna le od volumna in kvalitete materiala pred vijakom. Parametrična študija je pokazala, da je nosilnost pri kratkih robnih razdaljah (ozke pločevine) vedno zajeta s kontrolo nosilnosti

oslabljenega oziroma polnega prereza in da pri širokih pločevinah nosilnost v bočnem pritisku konvergira k zgornji vrednosti. Zato smo se osredotočili na robne razdalje, ki povzročijo mešano porušitev, kjer je nosilnost oslabljenega prereza približno enaka nosilnosti v bočnem pritisku. Temu tipu porušitve ustreza porušitev z razkolom, ki predstavlja spodnjo mejo nosilnosti v bočnem pritisku. Zgornja meja je le približno 10 % višje od spodnje, zato spremenjena kontrola nosilnosti ni preveč konservativna.

V spremenjenem modelu nosilnosti nismo definirali zgornje meje za bočni pritisk, ki je pomembna pri pločevinah z dolgimi razdaljami med vijaki p_1 ali dolgo robno razdaljo e_1 . Vprašajmo se, ali je omejitev bočnih pritiskov potrebna. V odgovoru na to vprašanje moramo upoštevati vse možne porušne mehanizme. Če zgornjo mejo postavimo prenizko, potem lahko najprej odpove vijak, vendar šele pri preobremenitvi spoja. Ta situacija zato ni skrb vzbujajoča, saj se pred porušitvijo luknje dovolj podaljšajo, da se obtežba prerazporedi med skupino vijakov. To je seveda res, če meja ni postavljena v nominalno elastičnem odzivu spoja. Če zgornja meja ni podana, potem jo definira strižna nosilnost vijaka. Primerna zgornja meja bi bila $3 f_u$, pa čeprav smo izmerili tudi višjo nosilnost. Iz predlagane kontrole za nosilnost v bočnem pritisku sledi, da povprečni bočni pritisk, enak $3 f_u$, nastane, če je $p_1 = 3,75 a_0$ ali $e_1 = 3 a_0$. V tem primeru je nosilnost v bočnem pritisku v primerjavi s strižno nosilnostjo vijaka le redko kritična. Na sliki 26 prikazujemo, da je nosilnost v bočnem pritisku kritična le v primeru tankih pločevin, ko je debelina pločevine manjša od približno četrtine premera vijaka za jeklo S235. Pri jeklu



Slika 26 • Strižna nosilnost vijaka kot zgornja omejitev nosilnosti v bočnem pritisku za dve strižni ravnini

boljše kvalitete morajo biti pločevine še tanjše. Krivulje na sliki 26 izvirajo iz pogoja, da je strižna nosilnost vijaka preko dveh strižnih ravnin ($m = 2$) manjša ali enaka nosilnosti pločevine v bočnem pritisku:

$$mF_v \leq F_b$$

$$m \cdot \alpha_v \cdot f_{ub} \frac{d^2}{4} \leq 3 \cdot d \cdot t \cdot f_u$$

$$\frac{m \cdot \alpha_v \cdot f_{ub}}{12 \cdot f_u} \cdot \frac{d}{t} \leq 1$$

Omejitev bočnih pritiskov je smiselna le v primerih, ko podaljšanje luknje za vijak vpliva na deformacije elementa v mejnem stanju uporabnosti (MSU). Primerno omejitev bočnega pritiska pri delovni obtežbi bi lahko predstavljala napetost, enaka 80 % mejnega

bočnega pritiska, vendar ne več kot $2 f_u$. Ker so krivulje odziva za kratke robne razdalje e_1 izrazito bilinearne, bi v primeru kratkih razdalj meja 80 % mejnega bočnega pritiska ležala v nominalno elastičnem delu krivulje. V primeru daljših robnih razdalj e_1 pa se pri bočni napetosti $2 f_u$ izvrši podaljšanje luknje, enako približno šestini premera vijaka $d / 6$. Takšno podaljšanje luknje pa predstavlja primerno omejitev za MSU (glej sliki 8, 9). Pri tem ne smemo pozabiti dejstva, da so obremenitve pri karakteristični kombinaciji MSU okvirno 1,4-krat nižje kot v mejnem stanju nosilnosti, v primeru pogoste kombinacije MSU pa so obremenitve še nižje. Zato kontrola podaljšanja luknje za vijak oziroma kontrola bočnih pritiskov v MSU običajno ni potrebna, s tem pa tudi omejitev bočnih pritiskov ni potrebna.

7 • SKLEP

Prispevek obravnava nosilnost pločevine ob pritisku vijaka na pločevino. Predstavljeni so rezultati testov spojev iz običajnega konstrukcijskega jekla z enim in dvema vijakoma. Rezultate testov smo primerjali s testi spojev iz jekel visoke trdnosti, ki so podani v literaturi ((Kim, 1999), (Aalberg, 2001), (Aalberg, 2002), (Rex, 2003), (Može, 2010)). Podana je tudi deformacijska kapaciteta običajnih jekel in jekel visoke trdnosti v smislu podaljšanja luknje za vijake pri doseženi nosilnosti spoja. Predstavljena je tudi parametrična numerična

študija spojev z enim vijakom. Narejena je primerjava numeričnih rezultatov in rezultatov testov s kontrolami nosilnosti, ki so definirane v Evrokodu 3. Ugotovili smo, da se kritična kontrola nosilnosti v več primerih ne ujema z dejansko porušitvijo. Izstopala je kontrola nosilnosti v bočnem pritisku, ki se je mnogokrat pokazala kot zelo konservativna. Glavni razlog je v tem, da ta kontrola upošteva vpliv robne razdalje in razdalje med vijaki pravokotno na smer obtežbe. Sistematično smo pokazali, da je nosilnost v bočnem pritisku linearno odvisna

od razdalj pred vijakom in od natezne trdnosti materiala in je praktično neodvisna od razdalj pravokotno na smer obtežbe. Drugi razlog je skrit v tem, da Evrokod podaja enako relativno nosilnost ne glede na kvaliteto pločevine. Pokazali smo, da je nosilnost pločevin iz jekla visoke trdnosti, relativno gledano, malenkost nižja. Zato smo podali spremenjeni model nosilnosti v bočnem pritisku in ga ovrednotili glede na eksperimentalne in numerične rezultate. Kontrola, ki smo jo podali, je enostavnejša kot tista v Evrokodu 3, podaja enolično interpretacijo nosilnosti v bočnem pritisku in dobro pokriva rezultate testov. Zavedati se je treba, da je porušitev v bočnem pritisku lokalna porušitev materiala pred vijakom zaradi pritiska enega

vijaka in se v spojih z več vijaki izrazi kot iztrg robnega vijaka ali kot strižna porušitev med vijaki (Može, 2011). Porušitve, kot so pretrg oslabiljenega prereza in strižni iztrg vijakov, so globalnega tipa, kjer nosilnost v bočnem pritisku enega vijaka ni dosežena. Pri strižnem iztrgu vijakov nastane interakcija

bočnih pritiskov več vijakov, kjer je kritično mesto oslabiljeni prerez med vrstama vijakov. Pokazali smo tudi, da je kontrola nosilnosti strižnega iztrga skupine vijakov, kot jo definira Evrokod 3, zelo konservativna. Spremenjena kontrola, ki temelji na ameriškem AISC-standardu (AISC, 2010), se bolj približa testnim

rezultatom. Pokazali smo tudi, da v različnih primerih, tako pri mehkih konstrukcijskih jeklih kot pri jeklih visoke trdnosti, oslabiljen prerez lahko razvije polno natezno trdnost $A_{net} f_u$, torej velja razmisliti, pri kakšnih pogojih lahko koeficient 0,9 v kontroli nosilnosti oslabiljenega prereza po Evrokodu 3 povečamo na 1.

8 • ZAHVALA

Zahvaljujemo se Agenciji za raziskovalno dejavnost RS, ki je financirala raziskavo v okviru podoktorskega projekta Z2-4172.

9 • LITERATURA

- Aalberg, A., Larsen, P. K., Bearing strength of bolted connections in high strength steel, V: P. Mäkeläinen, J. Kesti, A. Jutila, O. Kaitila, (ur). Nordic Steel Construction Conference 2001 – NSCC 2001: proceedings. Helsinki, NSCC: str. 859–866, 2001.
- Aalberg, A., Larsen, P. K., The effect of steel strength and ductility on bearing failure of bolted connections, V: A. Lamas, L. S. d. Silva, (ur). The Third European Conference on Steel Structures: Proceedings of the 3rd European conference on steel structures. Coimbra, Universidade de Coimbra: str. 869–878, 2002.
- ANS/AISC 360-05, Specifications for Structural Steel Buildings, Chicago, American Institute of Steel Construction, Inc, 2010.
- EN 1993-1-1, Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings, Brussels, European Committee for Standardisation, 2005a.
- EN 1993-1-8, Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-8: Design of joints, Brussels, European Committee for Standardisation, 2005b.
- Kim, H. J., Yura, J. A., The effect of ultimate-to-yield ratio on the bearing strength of bolted connections, J Construct Steel Res, 49, 3: 255–270, 1999.
- Kouhi, J., Kortessmaa, M., Strength tests on bolted connections using high-strength steels (HSS steels) as a base material. Research notes 1185, 1185, Espoo, Technical Research Centre of Finland, 1990.
- Kulak, G. L., Fisher, J. W., Struik, J. H. A., Guide to Design Criteria for Bolted and Riveted Joints, Chicago, American Institute Of Steel Construction, Inc.str, 2001.
- Može, P., Beg, D., High strength steel tension splices with one or two bolts, Journal of Constructional Steel Research, 66, 8-9: 1000-1010, 2010.
- Može, P., Beg, D., Investigation of high strength steel connections with several bolts in double shear, Journal of Constructional Steel Research, 67, 3: 333–347, 2011.
- Može, P., Beg, D., Lopatič, J., Net cross-section design resistance and local ductility of elements made of high strength steel, Journal of Constructional Steel Research, 63, 11: 1431–1441, 2007.
- Puthli, R., Fleischer, O., Investigations on bolted connections for high strength steel members, Journal of Constructional Steel Research, 57, 3: 313–326, 2001.
- Rex, C. O., Easterling, W. S., Behavior and modeling of a bolt bearing on a single plate, Journal of Structural Engineering-Asce, 129, 6: 792–800, 2003.
- Snijder, H. H., Ungermann, D., Stark, J. W. B., Sedlacek, G., Bijlaard, F. S. K., Hemmert-Halswick, A., Evaluation of test results on bolted connections in order to obtain strength functions and suitable model factors – Part A: Results. V: Eurocode No.3 - Part 1 - Background documentation, Chapter 6, Document 6.01, Brussels, Commission of the European Communities, 1988a.
- Snijder, H. H., Ungermann, D., Stark, J. W. B., Sedlacek, G., Bijlaard, F. S. K., Hemmert-Halswick, A., Evaluation of test results on bolted connections in order to obtain strength functions and suitable model factors – Part B: Evaluations. V: Eurocode No.3 – Part 1 – Background documentation, Chapter 6, Document 6.02, Brussels, Commission of the European Communities, 1988b.