

Univerza
v Ljubljani
Fakulteta
*za gradbeništvo
in geodezijo*

*Janova 2
1000 Ljubljana, Slovenija
telefon (01) 47 68 500
faks (01) 42 50 681
fgg@fgg.uni-lj.si*



Univerzitetni program Gradbeništvo,
Konstrukcijska smer

Kandidat:

Nace Remic

**BOČNI PRITISKI V PREKLOPNIH
VIJAČENIH SPOJIH IZ MEHKIH
KONSTRUKCIJSKIH JEKEL**

Diplomska naloga št.: 3164

Mentor:
prof. dr. Darko Beg

Somentor:
asist. dr. Primož Može

Ljubljana, 27. 5. 2011

IZJAVA O AVTORSTVU

Podpisani **NACE REMIC** izjavljam, da sem avtor diplomske naloge z naslovom: »**BOČNI PRITISKI V PREKLOPNIH VIJAČENIH SPOJIH IZ MEHKIH KONSTRUKCIJSKIH JEKEL**«.

Izjavljam, da se odpovedujem vsem materialnim pravicam iz dela za potrebe elektronske separatoteke FGG.

Ljubljana, 27.5.2011

(podpis)

ZAHVALA

Prof. dr. Darkotu Begu in še posebej asist. dr. Primožu Možetu se zahvaljujem za mentorstvo in pomoč pri izdelavi diplomske naloge.

Za vso podporo bi se zahvalil mami in očetu!

IZJAVA O PREGLEDU NALOGE

Nalogo so si ogledali učitelji konstrukcijskih smeri:

BIBLIOGRAFSKO - DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK:	624.014.2(043.2)
Avtor:	Nace Remic
Mentor:	prof. dr. Darko Beg
Somentor:	asist. dr. Primož Može
Naslov:	Bočni pritiski v preklopnih vijačenih spojih iz mehkih konstrukcijskih jekel
Obseg in oprema:	68 strani, 6 preglednic, 55 slik, 3 priloge
Ključne besede:	Vijačeni spoji, enostrizni spoji, dvostrizni spoji, jeklo normalne trdnosti, bočni pritiski, eksperiment, analiza s končnimi elementi, primerjava z evropskim standardom

Izveček

V diplomski nalogi so predstavljeni laboratorijski testi preklopnih vijačenih spojev. Narejeno je bilo 19 laboratorijskih testov spojev z enim in z dvema vijakoma. Testi so ovrednoteni z numeričnimi simulacijami v programu Abaqus. Narejene so primerjave eksperimentalnih nosilnosti s standardom SIST EN 1993-1-8 in z novo formulo za nosilnost na bočni pritisk, ki sta jo razvila Može in Beg (2010).

Predstavljeno je projektiranje spojev v skladu s SIST EN 1993-1-8 in projektiranje spojev v skladu z novo formulo. Predstavljena je tudi zasnova laboratorijskih testov in numerično modeliranje spojev.

Rezultati laboratorijskih testov, numeričnih simulacij in obeh računskih metod so za vseh 19 spojev prikazani v prilogah.

BIBLIOGRAPHIC - DOCUMENTALISTIC INFORMATION

UDC: 624.014.2(043.2)
Author: Nace Remic
Supervisor: Prof. PhD Darko Beg
Co-supervisor: Assist. PhD Primož Može
Title: Bearing resistance of bolted connections made of mild steel grades
Notes: 68p., 6tab., 55fig., 3 app.
Key words: Bolted connectoins, single shear, double shear, normal grade steel, bearing resistance, experiment, finite element analysis, EC standard comparison

Abstract

The graduate thesis presents 19 test results of bolted tension splices. 19 bolted steel connections were tested in a laboratory. The connections with one and two bolts in double shear were tested.

The experimental resistances were compared to the bearing resistances according to the SIST EN 1993-1-8 standard. The test results were compared also to the bearing resistance formula presented by Može and Beg (2010). The design of the tension splices according to the SIST EN 1993-1-8 and according to the Može's and Beg's formula is presented as well. The test set-up the testing programme and the numerical modeling is described.

All experimental results for 19 connections as well as the results of the, numerical simulations and simplified calculation methods are presented in the appendixes.

KAZALO VSEBINE

1	UVOD	1
1.1	PREDSTAVITEV PROBLEMA IN KRATKA VSEBINA	1
1.2	PROJEKTIRANJE VZORCEV V SKLADU S SIST EN 1993-1-8	2
1.2.1	NOSILNOST OSLABLJENEGA IN POLNEGA PREREZA V NATEGU	4
1.2.2	STRIŽNA NOSILNOST VIJAKOV	4
1.2.3	NOSILNOST NA BOČNI PRITISK.....	5
1.2.4	NOSILNOST NA STRIŽNI IZTRG.....	6
1.3	NOVA FORMULACIJA NOSILNOSTI PLOČEVIN – MOŽE, BEG	7
2	LABORATORIJSKI TESTI	8
2.1	ZASNOVA SPOJEV.....	8
2.2	MATERIAL.....	10
2.3	OPREMA IN ZAJEM PODATKOV	13
2.4	POTEK RAZISKAVE	14
3	NUMERIČNO MODELIRANJE SPOJEV	15
3.1	PROGRAMSKA OPREMA ABAQUS.....	15
3.2	MATERIAL.....	15
3.3	NUMERIČNI MODELI.....	18
3.3.1	LUPINASTI MODEL S TOGIM VIJAKOM (A).....	18
3.3.2	PROSTORSKI MODEL S TOGIM VIJAKOM (B)	20
3.3.3	POENOSTAVLJEN PROSTORSKI MODEL (C)	20
3.3.4	CELOTEN PROSTORSKI MODEL (Č).....	22
3.4	KONVERGENČNA ŠTUDIJA.....	23
4	REZULTATI	26
4.1	REZULTATI LABORATORIJSKIH TESTOV IN NUMERIČNIH SIMULACIJ	26
4.1.1	TIPIČNE PORUŠITVE ZA SPOJE Z ENIM VIJAKOM	28
4.1.2	DIAGRAMI SILA – POMIK ZA SPOJE Z ENIM VIJAKOM	30
4.1.3	TIPIČNE PORUŠITVE ZA SPOJE Z DVEMA VIJAKOMA	33
4.1.4	DIAGRAMI SILA – POMIK ZA SPOJE Z DVEMA VIJAKOMA.....	37
4.1.5	NAPETOSTI V VIJAKIH.....	38
4.1.6	NAPETOSTNA POLJA V PLOČEVINAH.....	39
4.1.7	DEJANSKE GEOMETRIJE SPOJEV	41
4.1.8	VPLIV TRENJA.....	44
4.2	PRIMERJAVE REZULTATOV.....	45

5	ZAKLJUČEK	51
6	VIRI.....	53
	PRILOGA A	55
	PRILOGA B.....	58
	PRILOGA C	61

KAZALO SLIK

Slika 1: Robne razdalje.....	3
Slika 2: Porušitve oslabljenega prereza v nategu za tipična vzorca z enim oziroma z dvema vijakoma.....	4
Slika 3: Poenostavljena modela za nosilnost na bočni pritisk.....	5
Slika 4: Poenostavljen model za nosilnost strižni iztrg.....	7
Slika 5: Deformacija vilic, ki jih obravnavam kot toge, v neposrednem naleganju vijaka za vilice M200a.....	8
Slika 6: Prikaz namestitve merilnih naprav in merilnih razdalj e_3 , e_4 in l_m	9
Slika 7: Toge vilice M100a in vzorec M101.....	10
Slika 8: Testna epruveta Vz.-1 z ekstenziometrom tik pred porušitvijo z lepo vidno kontrakcijo prereza.....	11
Slika 9: Testna epruveta Vz.-1 pred pretrgom in po pretrgu.....	11
Slika 10: Nazivna geometrija testne epruvete.....	12
Slika 11: Diagram napetost - deformacija za uporabljen material dobljen iz standardnega nateznega preskusa in diagram za epruveto simulirano v programu Abaqus.....	12
Slika 12: Instron preizkuševalna naprava na levi in kontrolni vmesnik na desni.....	13
Slika 13: Spoj M101 vpet v čeljusti hidravličnega bata z nameščenimi merilnimi.....	14
Slika 14: Dejanski model deformacije in napetosti, ki je uporabljen v Abaqusu.....	16
Slika 15: Idealiziran diagram napetost – deformacija, ki je uporabljen za materialni model visoko vrednih vijakov razreda 10.9.....	17
Slika 16: Primeri numeričnih modelov uporabljenih za izračun nosilnosti spojev.....	18
Slika 17: Diagram sila – pomik za primerjavo modelov spoja M101 in laboratorijskega testa.....	19
Slika 18: Deli spoja M201 uporabljeni za numerični model (c).....	21
Slika 19: Poenostavljen prostorski model s prikazom mreže končnih elementov za tipičen spoj M101 z enim in M201 z dvema vijakoma.....	21
Slika 20: Diagram sila – pomik za primerjavo modelov (c) in (č) spoja M201 in laboratorijskega testa.....	23
Slika 21: Diagram sila – pomik za spoj M101 za primerjavo numeričnih modelov z različno gostoto mreže lupinastih končnih elementov in laboratorijskega testa.....	24
Slika 22: Spoj M101 za numerični model (c) z različnimi gostotami mrež končnih elementov.....	24
Slika 23: Diagrama sila – pomik za spoja M101 za primerjavo numeričnih modelov z različno gostoto mreže prostorskih končnih elementov in laboratorijskega testa.....	25
Slika 24: Deformiran vzorec M104. Strižna porušitev se pojavi v območju pred vijakom. Območje maksimalnih doseženih strižnih napetosti S12 se sklada z mestom strižne porušitve spoja.....	28
Slika 25: Deformiran vzorec M112. Dosežene so velike sile in velika elongacija luknje. Območje maksimalnih Misesovih napetosti se pojavi na velikem območju okrog ovalizacije luknje.....	29
Slika 26: Deformiran vzorec M112. Razpoka je lepo vidna v območju strigov. Lepo je vidna tudi kontrakcija v delu oslabljenega prereza.....	29
Slika 27: Deformiran vzorec M113. Vzorec se nesimetrično poruši v oslabljenem prerezu. Območje maksimalnih Misesovih napetosti nakaže območje pretrga vzorca v oslabljenem prerezu.....	30
Slika 28: Diagrama sila – pomik za vse spoje z enim vijakom.....	31
Slika 29: Diagrama sila – pomik za vse spoje z enim vijakom. Vsaka porušitev ima svojo barvo.....	31
Slika 30: Diagrama sila - pomik za pet vzorcev z vijaki M24 (M104, M105, M106, M107 in M108) - (a) in pet vzorcev z vijaki M16 (M109, M110, M111, M112 in M113) - (b) z enakimi relativnimi razdaljami e_1/d_0 in e_2/d_0	32
Slika 31: Deformiran vzorec M205. Strižni porušitvi se pojavita v območju pred vijakoma.....	33
Slika 32: Deformiran vzorec M205. Območje maksimalnih doseženih strižnih napetosti S12 in Misesovih napetosti se sklada z mestom strižne porušitve spoja.....	33
Slika 33: Deformiran vzorec M201. Območje maksimalnih doseženih Misesovih napetosti S se sklada z mesti porušnih linij strižnega iztrga.....	34

Slika 34: Deformiran vzorec M203. Območje maksimalnih doseženih Misesovih napetosti S se sklada z mesti porušnih linij strižnega iztrga.....	34
Slika 35: Deformiran vzorec M206. Vzorec se nesimetrično poruši v celem oslavljenem prerezu. Območje maksimalnih doseženih Misesovih napetosti S se sklada z poružitvijo spoja v celem oslavljenem prerezu.....	35
Slika 36: Deformirana vzorca M202 in M204. Vzorca sta delno porušena v oslavljenem prerezu.....	36
Slika 37: Deformirana vzorca M202 in M204. Območje maksimalnih doseženih Misesovih napetosti S se sklada z mestoma poružitve spojev v oslavljenem prerezu.	36
Slika 38: Diagrama sila – pomik za vse spoje z dvema vijakoma.....	37
Slika 39: Prereza skozi spoj M113. Območje maksimalnih strižnih napetosti S13 na najbolj obremenjenem mestu v vijaku M16 se pojavi na predvidenem mestu, v strižnih ravninah med ploščo vzorca in ploščama vilic.	38
Slika 40: Prereza skozi spoj M113. Območje maksimalnih doseženih Misesovih napetosti S, Mises in osnih napetosti S33 in v vijaku M16.	39
Slika 41: Deformiran vzorec M112. Velike glavne napetosti so prikazane na prerezu v ravnini, ki je definirana z Z osjo.....	39
Slika 42: Deformiran vzorec M103. Velike glavne napetosti so prikazane na prerezu v ravnini, ki je definirana z X osjo.	40
Slika 43: Deformirani vzorca M206, M202 in M204. Porušne linije sledijo poteku polj glavnih napetosti.....	40
Slika 44: Prikaz napetosti na deformiranem vzorcu M103 in M103_dg ter oblika poružitve za porušen testni vzorec.....	41
Slika 45: Diagrama sila – pomik za spoja M108 in M103 za primerjavo modelov z nazivnimi in dejanskimi geometrijami.....	42
Slika 46: Primerjava nosilnosti izračunanih z numeričnimi analizami in nosilnostmi izmerjenimi na laboratorijskem testu.	43
Slika 47: Diagrama sila – pomik za spoj M206 za prikaz sil, ki se prenašajo preko z vijakom 1, vijakom 2 in s trenjem. Za primerjavo je izrisan tudi diagram sil na vpetju za numerično simulacijo in laboratorijski test.	44
Slika 48: Na vzorcu spoja M206 je viden del prereza pred naleganjem vijaka, kjer pride do tlačnih napetosti v Z smeri in posledično do kontakta s trenjem.	44
Slika 49: Na vzorcu spoja M204 je lep viden del prereza pred naleganjem vijaka, kjer pride do razširitve prereza.	45
Slika 50: Na vzorcu spoja M206 je v numeričnem modelu vidno območje pred naleganjem vijaka, kjer nastanejo tlačne napetosti v Z smeri (S33) ki povzročijo trenje.	45
Slika 51: Diagrama za nosilnost na bočni pritisk v primerjavi z rezultati laboratorijskih testov za vse spoje z enim vijakom.	46
Slika 52: Diagrama za nosilnost na bočni pritisk v primerjavi z rezultati laboratorijskih testov za vse spoje z dvema vijakoma.....	47
Slika 53: Nosilnost normirana z laboratorijsko vrednostjo nosilnosti v povezavi z robno razdaljo e_1/d_0	47
Slika 54: Diagrama primerjave sile dosežene pri pomiku $d_0/6$ oziroma merodajne projektirane sile za SIST EN 1993-1-8 v primerjavi z rezultati laboratorijskih testov pri pomiku $d_0/6$	48
Slika 55: Diagram nosilnosti za tri serije vzorcev z različnimi robnimi razdaljami e_2 , za spoje z enim vijakom.	49

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Osnovna geometrijska razmerja in dimenzije spojev.....	3
Preglednica 2: Geometrija in rezultati standardnega nateznega preskusa z ekstenziometrom za testno epruveto Vz.-1.....	12
Preglednica 3: Tabela nosilnosti spojev s poružitvami in pripadajočimi pomiki.....	27
Preglednica 4: Razmerja maksimalnih doseženih sil na testih za vzorce z enakimi relativnimi geometrijami	33
Preglednica 5: Primerjava nazivnih in dejanskih geometrij za vzorca M103_dg in M108_dg.....	42
Preglednica 6: Sile na vpetju za numerični simulaciji z nazivnimi in dejanskimi geometrijami za spoja M103_dg in M108_dg	42

1 Uvod

1.1 Predstavitev problema in kratka vsebina

Preklonni vijačeni spoji so spoji, kjer se obremenitev med elementi prenese preko stebra vijaka in preko preklonnih pločevin. Zaradi hitrosti izvedbe so takšni spoji hitra in ekonomična rešitev povezovanja konstruktivnih elementov pri gradnji jeklenih konstrukcij.

Preklonni vijačeni spoji služijo prenosu nateznih kot tudi tlačnih obremenitev. Zaradi majhne kontaktne površine pri natezni obremenitvi med stebrom vijaka in pločevino natanejo veliki bočni pritiski, ki v pločevini povzročijo koncentracije napetosti. Duktilnost jekla z elongacijo luknje za vijak omogoči otopitev napetostnih konic in prerazporeditev obremenitve med več vijakov.

Namen diplomske naloge je določiti mejno nosilnost in različne tipe porušitev za preklonpe jeklene vijačene spoje obremenjene v nategu. Vsak spoj je sestavljen iz preizkušanca (v nadaljevanju imenovan vzorec), togega vpetja (v nadaljevanju imenovano toge vilice) in vijaka oziroma dveh vijakov. V diplomski nalogi je predstavljeno projektiranje vijačenih spojev po SIST EN 1993-1-8. Pri projektiranju spojev sem se omejil na porušitve v pločevinah, saj le te omogočajo duktilno porušitev spoja. Porušitve v vijakih sem preprečil z upoštevanjem s faktoja dodatne nosilnosti.

V poglavju 1.3 sem ovrednotil rezultate izračunane z novo formulo za izračun nosilnost preklonnih vijačenih spojev, ki sta jo predstavila Može in Beg, 2010.

Materialne karakteristike jeklenih pločevin S235, ki sem jih uporabil v preklonih vijačenih spojih sem določil s standardnim nateznim preskusom (v nadaljevanju SNP). S podatki dobljenimi iz SNP sem izračunal nosilnosti posameznih spojev s SIST EN 1993-1-8 (glej poglavje 1.2) in z novo formulo (Može in Beg, 2010) (glej poglavje 1.3). V poglavju 3.2 Material sem prikazal tudi določitev materialnih parametrov za uporabo v numeričnih modelih. Materialni model sem preveril z numerično simulacijo SNP.

Najpomembnejši del diplomske naloge so laboratorijski testi preklonnih vijačenih spojev do porušitve. Testi so bili izvedeni v Konstrukcijsko prometnem laboratoriju Fakultete za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani. Rezultati testov so izhodišče za primerjavo z numerično analizo in s standardom SIST EN 1993-1-8. V poglavju Laboratorijski testi sem podrobneje opisal zasnovo spojev, potek testov, zajemanje podatkov, mesta merjenja pomikov, naprave uporabljene za testiranje in ostale posebnosti spojev. Rezultate laboratorijskih testov sem predstavil v obliki grafov sila – pomik, prehlednic in slik.

Vse spoje sem numerično analiziral s programsko opremo Abaqus 6.10, ki ga trži podjetje Dassault Systèmes. Pripravil sem štiri različno obsežne numerične modele, sestavljene iz končnih elementov (v nadaljevanju KE). Uporabil sem lupinaste in prostorske končne elemente. Primerno velikost KE sem ocenil na podlagi konvergenčne analize.

V izračunih nosilnosti spojev po SIST EN 1993-1-8 in po novi formuli (Može, Beg, 2010) sem upošteval dejanske vrednosti materialnih in dejanske vrednosti geometrijskih parametrov, brez upoštevanja varnostnih faktorjev γ_{M0} in γ_{M2} .

V prilogi A so podane tabele z geometrijami spojev:

- Tabela z osnovnimi geometrijskimi razmerji in dimenzijami spojev
- Tabela z nazivnimi in dejanskimi geometrijami spojev
- Tabela z razdaljami za nameščanje merilnih inštrumentov

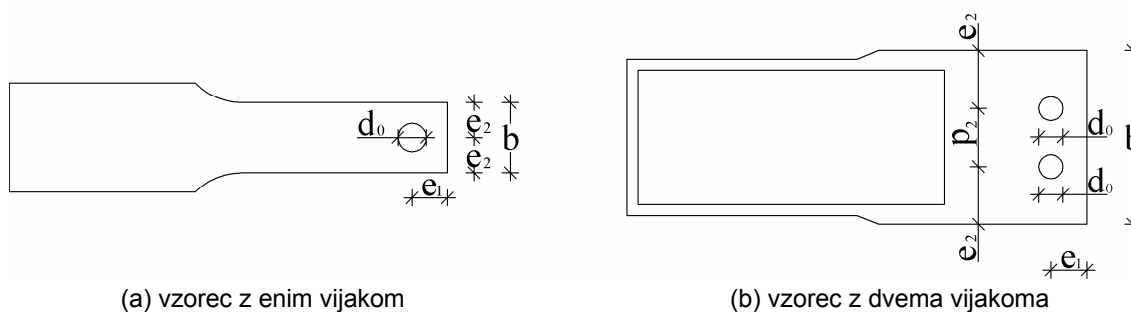
Rezultati za vse spoje so dosledno izpisani v prilogah B in C. V prilogi B so za vsak spoj priložene tri slike: in sicer slika deformiranega numeričnega modela, slika deformiranega laboratorijskega preskušanca in diagram sila – pomik za rezultate laboratorijskega testa in numerične analize. V prilogi C so predstavljeni rezultati, izračunani s SIST EN 1993-1-8, novo formulo (Može, Beg, 2010) in numeričnimi analizami. Prav tako so v prilogi C v tabelah zbrani vsi rezultati laboratorijskih testov.

Izsledki raziskav so podani na koncu diplomske naloge v obliki primerjav:

- nosilnosti, izračunane v skladu s SIST EN 1993-1-8 in nosilnosti dobljene v porušnih testih,
- nosilnosti, izračunane s programsko opremo Abaqus 6.10 in nosilnosti izmerjene v laboratorijskih testih,
- nosilnosti, izračunane po novi formuli za nosilnosti pločevin (Može in Beg, 2010) in nosilnosti izmerjene v laboratorijskih testih,
- pomikov, izračunanih s programsko opremo Abaqus 6.10 pri maksimalni sili in pomikov pri maksimalni sili iz laboratorijskih testov,
- nosilnosti, izračunanih z numerično simulacijo pri elongaciji luknje za $d_0/6$ in nosilnosti iz testov pri deformaciji luknje za $d_0/6$,
- načine porušitve glede na merodajno kontrolo po SIST EN 1993-1-8, kontrakcijo prereza, izračunanega s programsko opremo Abaqus 6.10 in porušenega dela prereza v laboratorijskem testu,
- eksperimentalnega in numeričnega odziva sila – pomik ločenega za vsak vzorec.

1.2 Projektiranje vzorcev v skladu s SIST EN 1993-1-8

Z izbiro ustrezne geometrije vzorca sem želel zajeti različne tipe porušitev z različno stopnjo duktilnosti. Vijake sem izbral tako, da v njih porušitev ni bila možna, saj vijaki niso bili predmet študije. Torej sem za kontrolo nosilnosti preklonih vijačenih spojev preverjal napetosti v oslavljenem in polnem prerezu ter bočne pritiske, pri strižni nosilnosti vijaka pa sem upošteval faktor dodatne nosilnosti.



(a) vzorec z enim vijakom

(b) vzorec z dvema vijakoma

Slika 1: Robne razdalje.

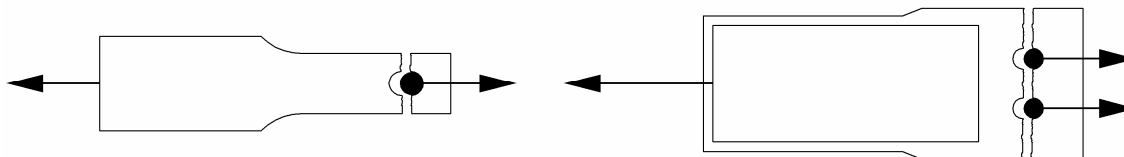
Izhodišče pri projektiranju geometrij vzorcev so bile najmanjše dovoljene razdalje, ki jih predpisuje SIST EN 1993-1-8. Razdalji e_1 in e_2 standard omeji na $1,2d_0$, razdaljo p_2 minimalno pa na $2,4d_0$ (Slika 1). izbrane vrednosti sem zaokrožil na 1 mm, zaradi izdelave vzorcev v delavnici. Nazivna geometrija vzorcev je podana v preglednici (Preglednica 1), dejanska pa v prilogi A. Najmanjše razdalje sem postopoma povečeval in s tem spreminjal razporeditev napetostnega polja v spoju in s tem vplival na načine porušitve. Debelini pločevin t_1 (pločevina vzorca) in t_2 (pločevina vilic) sta bili v obeh primerih 12 mm. Dejanske razdalje b , e_1 , e_2 in p_2 pa se od nazivnih vrednosti razlikujejo zaradi toleranc pri izdelavi. Dejanski razdalji e_2 sta izmerjeni na obeh straneh luknje.

Rezultati projektiranja po SIST EN 1993-1-8 so za vse spoje izračunani v prilogi (Priloga B).

Preglednica 1: Osnovna geometrijska razmerja in dimenzije spojev.

	e_1/d_0	e_2/d_0	p_2/d_0	d_0 [mm]	b [mm]	t_2 [mm]	d [mm]
M101	1,23	1,23		26	64	12	24
M102	1,50	1,23		26	64	12	24
M103	2,00	1,23		26	64	12	24
M104	1,00	1,50		26	78	12	24
M105	1,23	1,50		26	78	12	24
M106	1,50	1,50		26	78	12	24
M107	2,00	1,50		26	78	12	24
M108	2,50	1,50		26	78	12	24
M109	1,00	1,50		18	54	12	16
M110	1,22	1,50		18	54	12	16
M111	1,50	1,50		18	54	12	16
M112	2,00	1,50		18	54	12	16
M113	2,50	1,50		18	54	12	16
M201	1,50	2,41	2,41	22	159	12	20
M202	2,50	2,41	2,41	22	159	12	20
M203	1,50	1,23	3,68	22	135	12	20
M204	2,50	1,23	3,68	22	135	12	20
M205	1,50	1,50	3,00	22	132	12	20
M206	2,50	1,50	3,00	22	132	12	20

1.2.1 Nosilnost oslabljenega in polnega prereza v nategu



Slika 2: Porušitve oslabljenega prereza v nategu za tipična vzorca z enim oziroma z dvema vijakoma

Projektna nosilnost oslabljenega prereza $N_{u,Rd}$ (Slika 2) omeji povprečno napetost v oslabljenem prerezu (A_{net}) na 90% natezne trdnosti pločevine (f_u):

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

Projektna nosilnost polnega prereza $N_{pl,Rd}$ je omejenena z napetostjo tečenja (f_y). S to omejitvijo se v polnem prerezu prepreči prekomerne plastične deformacije:

$$N_{pl,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}}; \quad \gamma_{M0} = 1 \quad (2)$$

Spoji so bili zasnovani tako, da je bila izmed nosilnosti oslabljenega in polnega prereza vedno merodajna nosilnost oslabljenega prereza.

1.2.2 Strižna nosilnost vijakov

Strižno nosilnost vijakov izračunam za dve strižni ravnini za bruto prerez stebra vijaka. V standardu je izraz za projektno strižno nosilnost vijaka ($F_{v,Rd}$) preko ene strižne ravnine definiran kot:

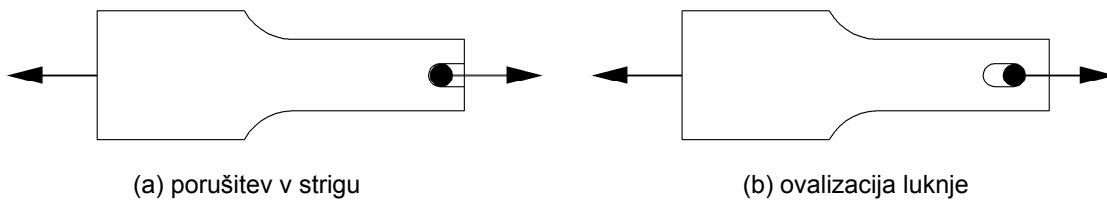
$$F_{v,Rd} = \frac{0,6f_{ub}A}{\gamma_{M2}} \quad (3)$$

Kjer sta:

f_{ub} – natezna trdnost vijaka
 A – površina prereza vijaka

1.2.3 Nosilnost na bočni pritisk

Kontrola nosilnosti na bočni pritisk omejuje porušitve v strigu pred vijakom in veliko ovalizacijo luknje. V primerih vzorcev s krajšo končno razdaljo e_1 so bile merodajne strižne porušitve in v primerih z daljšo robno razdaljo e_1 pa ovalizacija luknje (Slika 3), ki predstavlja predstavlja omejitvev deformacij.



Slika 3: Poenostavljena modela za nosilnost na bočni pritisk

Projektno nosilnost pločevine vzorca sem izračunal po obstoječi formuli za nosilnost na bočni pritisk po SIST EN 1993-1-8, Preglednice 3.4:

$$F_{b,Rd} = \frac{k_1 \alpha_b f_u d t}{\gamma_{M2}} \quad (4)$$

Faktor k_1 je odvisen od položaja vijaka (robni, notranji) v smeri pravokotno na delovanje obtežbe. Torej sta v faktorju k_1 neposredno zajeti relativni razdalji e_2/d_0 in p_2/d_0 . V primerih uporabljenih spojev z enim in z dvema vijakoma se smatra, da so vsi vijaki robni vijaki.

Za robne vijake upoštevam k_1 kot:

$$k_1 = \min \left(2,8 \frac{e_2}{d_0} - 1,7 \leq 2,5; 1,4 \frac{p_2}{d_0} - 1,7 \leq 2,5 \right) \quad (5)$$

Za celostno sliko problema sem opisal tudi formulacijo za notranje vijake, ki jo podaja standard:

$$k_1 = 1,4 \frac{p_2}{d_0} - 1,7 \leq 2,5 \quad (6)$$

Faktor α_b je odvisen od pozicije vijaka, ki se določi glede na smer delovanja obtežbe - notranji, robni, razmerja nateznih trdnosti vijaka (f_{ub}) in pločevine (f_u). Navzgor je omejen z vrednostjo 1,0. Merodajna vrednost je minimalna od naštetih:

$$\alpha_b = \min\left(\alpha_d; \frac{f_{ub}}{f_u}; 1, 0\right) \quad (7)$$

Za robno pozicijo vijaka je upoštevano razmerje:

$$\alpha_d = \frac{e_1}{3d_0} \quad (8)$$

za notranjo pozicijo vijaka pa:

$$\alpha_d = \frac{p_1}{3d_0} - \frac{1}{4} \quad (9)$$

Debelina pločevine je omejena s seštevkom minimalne vsote debelin za vsak del spoja. Vilice so sestavljene iz dveh plošč debeline $2 \cdot t_1$ in vzorec iz plošče z debelino t_2 . Merodajna debelina je torej:

$$t = \min(2t_1; t_2) \quad (10)$$

Nosilnost na bočni pritisk $F_{b,Rd}$ izračunam za vsak vijak posebej. Za projektno nosilnost skupine vijakov se upošteva vsota nosilnosti posameznih vijakov. To lahko naredim ob pogoju, da je projektna strižna nosilnost $F_{v,Rd}$ posameznega vijaka enaka ali večja od projektno nosilnosti na bočni pritisk $F_{b,Rd}$. V nasprotnem se za nosilnost skupine veznih sredstev upošteva produkt števila veznih sredstev z najmanjšo projektno strižno nosilnostjo. Torej lahko v danem primeru seštejem nosilnosti na bočnih pritisk posameznih vijakov v spoju in tako dobim nosilnost skupine vijakov, saj je strižna nosilnost vijaka vedno večja od nosilnosti na bočni pritisk.

1.2.4 Nosilnost na strižni iztrg

Strižni iztrg je kombinirana porušitev, kjer se del prereza poruši v strigu in del prereza v nategu. Nosilnost na strižni iztrg je v primeru testiranih spojev možno kontrolirati samo v spojih z dvema vijakoma. Tipični strižni iztrg (Slika 4) je, kjer se iztrga del pločevine v natezno obremenjenem prerezu med vijakoma (A_{nt}) pravokotno na smer obremenitve in v dveh strižno obremenjenih prerezih (A_{mv}) pred vijakoma vzporedno s smerjo obtežbe.



Slika 4: Poenostavljen model za nosilnost strižni iztrg

Nosilnost je izračunana za simetrično skupino vijakov, obremenjenih s koncentrirano obtežbo, zato se nosilnost na strižni iztrg $V_{eff,1,Rd}$ izračuna po naslednjem izrazu:

$$V_{eff,1,Rd} = \frac{A_{nt}f_u}{\gamma_{M2}} + \frac{A_{nv}f_y}{\sqrt{3}\gamma_{M0}} \quad (11)$$

1.3 Nova formulacija nosilnosti pločevin – Može, Beg

Može in Beg (2010) sta izpeljala formulacijo, ki za spoje iz jekel visoke trdnosti bistveno bolje oceni dejanske nosilnosti.

Njuna formula (12) za izračun nosilnosti na bočni pritisk je primerna za spoje z enim in za spoje z več vijaki. V nadaljevanju bom podal le formulo za nosilnost na bočni pritisk za primer spojev, ki jih obravnavam:

$$P_{b,Rd} = \frac{k_1 k_2 d t f_u}{\gamma_{M2}} \quad (12)$$

$$k_1 = \min \left(2,6 \frac{m e_1}{b_{eff}}; 1,9 \right) \quad (13)$$

$$k_2 = \frac{0,9 b_{eff}}{2 d_0 m} - \frac{1}{4} \quad (14)$$

$$b_{eff} = 2 e_2 + (m - 1)(p_2 - d_0) \quad (15)$$

kjer so:

- m – število vijakov v ravnini pravokotno na smer delovanja obtežbe
- b_{eff} – efektivna širina vzorca z upoštevanjem oslabitev zaradi lukenj vijakov
- e_1 , e_2 in p_2 so definirane v poglavju 1.2 Projektiranje vzorcev v skladu s SIST EN 1993-1-8

2 Laboratorijski testi

2.1 Zasnova spojev

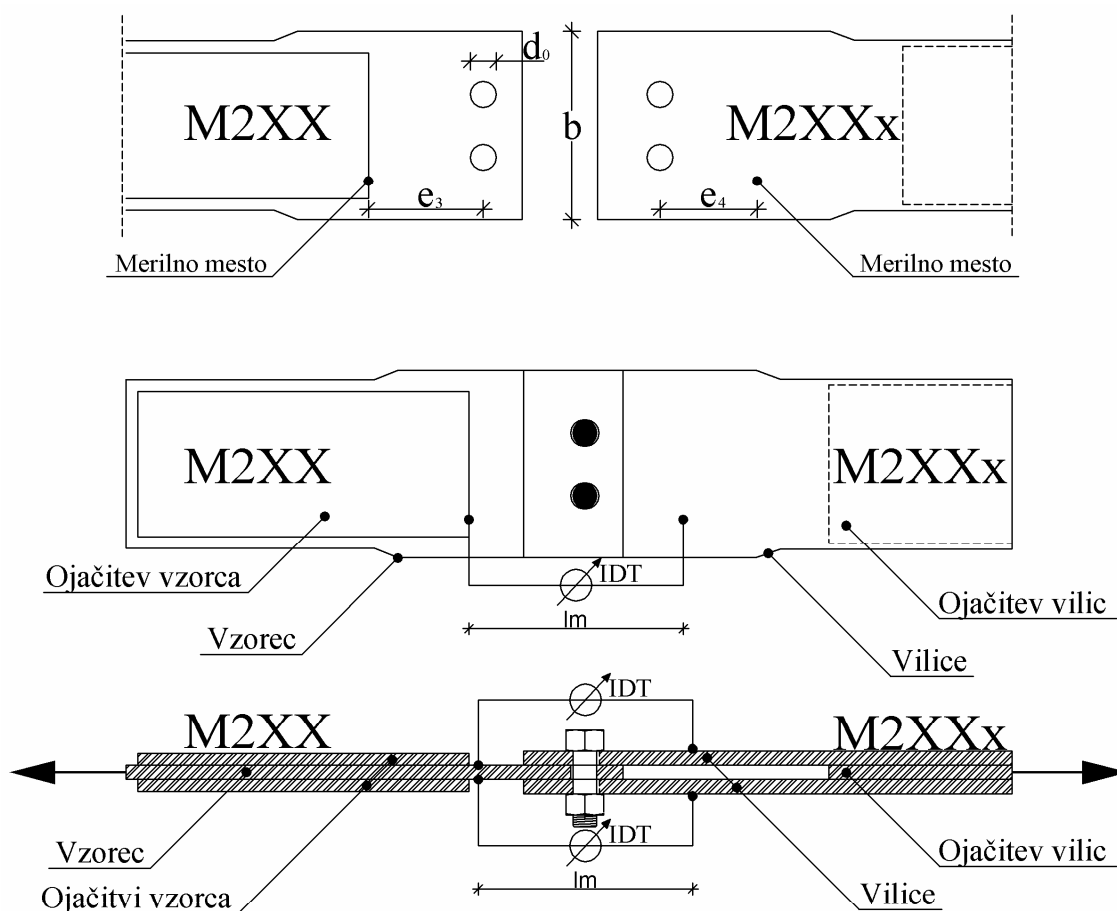
Geometrije spojev so bile zasnovane na podlagi standarda SIST EN 1993-1-8 in numeričnih simulacij izvedenih v programu Abaqus. Nosilnosti, izračunane po standardu, so se v večini primerov v primerjavi z numeričnimi simulacijami izkazale za konservativne. V zaključni fazi sem zato določil geometrije spojev dimenzionirane na podlagi rezultatov numeričnih simulacij. Ta odločitev se je izkazala za pravilno. To potrjujejo tudi primerjave rezultatov, ki so prikazane v nadaljevanju.

Posamezen spoj je bil sestavljen iz vilic, vzorca ter vijaka oziroma dveh vijakov (Slika 6). Debeline vseh pločevin, ki so sestavljale spoj (vzorca, togih vilic in ojačitev) so znašale 12 mm. Ojačitve, privarjene na vzorce in vilice so omejile plastifikacijo polnega prereza pri vpenjanju le teh v vpenjalno glavo hidravličnega bata. Za vse spoje z enim in z dvema vijakoma so torej vilice lahko obravnavane kot toge, ker so imele dvakratno debelino v primerjavi z vzorcem. Predmet raziskave je bil cel spoj, vendar sem velike plastične deformacije pričakovali v vzorcu. Vilice so se sicer na zelo omejenem območju naleganja vijaka plastično deformirale (Slika 5). Plastične deformacije iz vrednotene iz numeričnega modela so bile omejene na ozko območje tik pred naleganjem vijaka. Ker so se vilice deformirale samo v območju naleganja vijaka, sem jih lahko obravnaval kot toge.

Vpenjalna glava preizkuševalne naprave je omogočala vpenjanje vzorcev in togih vilic do širine 150 mm. Če pa so vzorci in toge vilice presegle to širino, sem jih ojačal s privarjenimi ojačitvenimi pločevinami (Slika 6).



Slika 5: Deformacija vilic, ki jih obravnavam kot toge, v neposrednem naleganju vijaka za vilice M200a



Meritve:

1. u - pomik na hidravličnem batu
2. F - sila na hidravličnem batu
3. u - pomik v območju vijaka na vzorcu z IDT

Slika 6: Prikaz namestitve merilnih naprav in merilnih razdalj e_3 , e_4 in l_m .

Geometrije spojev sem določil s spreminjanjem razmerij e_1/d_0 , e_2/d_0 in v spojih z dvema vijakoma še s spreminjanjem p_2/d_0 . Razmerje e_1/d_0 sem spreminjal od vrednosti 1,00 do vrednosti 2,50 za vzorce z enim vijakom. Za vzorce z dvema vijakoma sem uporabil vrednosti 1,5 ali 2,5. Za razmerje e_2/d_0 sem za spoje z enim vijakom izbral dve vrednosti: 1,23 in 1,5. Za spoje z dvema vijakoma pa sem izbral tri vrednosti: 1,23, 1,50 in 2,41. Razmerje p_2/d_0 pri spojih z dvema vijakoma sem upošteval z vrednostmi 2,41, 3,00 in 3,68.

Kombiniranje teh razmerij je na koncu rezultiralo v končnem številu 19 spojev (Preglednica 1). Uporabil sem vijake treh različnih dimenzij (M16, M20 in M24). Osem spojev z enim vijakom je bilo zvižčenih z vijakom M24, pet spojev z enim vijakom M16 in šest spojev z dvema vijakoma M20.

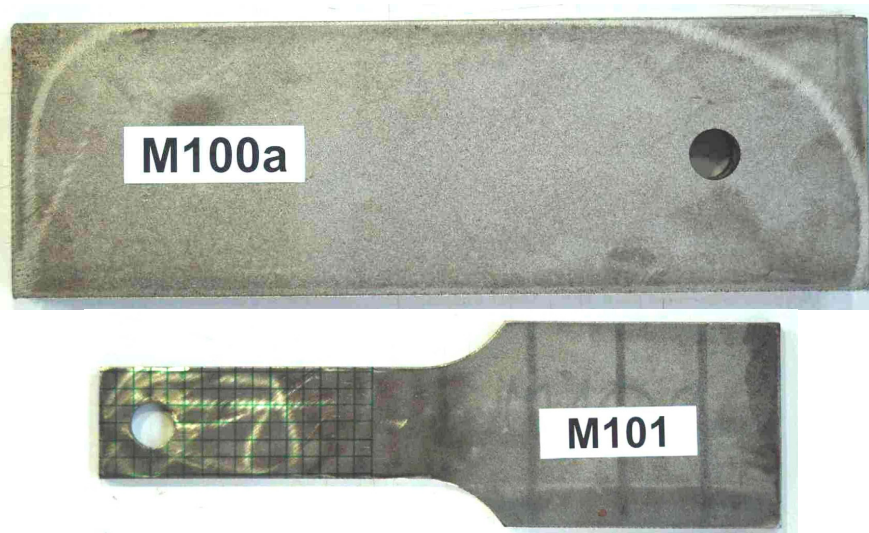
Geometrija spojev M109 do M113 in M104 do M108 je bila enaka v relativnem smislu e_1/d_0 in e_2/d_0 . V skupini M109 do M113 je bil uporabljen vijak M16 z luknjo vijaka $d_0 = 18$ mm, v

skupini M104 do M108 pa vijak M24 z $d_0 = 26$ mm. vijaki M24. Zanimiva primerjava teh spojev je podana v poglavju 4.2.

Dolžina vpenjanja spojev v preskuševalno napravo je bila odvisna od debeline elementa. Znašala je 65 mm za vpenjalno glavo do debeline $t = 20$ mm in 125 mm za vpenjalno glavo za debeline $t = 20 - 40$ mm.

Upoštevati je bilo potrebno tudi določen prostor za nameščanje merilnih naprav (Slika 6). Za nameščanje merilnih naprav sem na vzorcu in na vilicah namenil 50 mm. Na vzorcu sem razdaljo, na kateri sem pritržil merilec pomika, označil z e_3 in na vilicah z e_4 (Slika 6). Razdalja med merilnimi mesti je znašala l_m (Priloga A- Tabela z razdaljami za nameščanje merilnih inštrumentov).

Posamezen spoj je bil torej sestavljen iz vilic, vzorca (Slika 7) ter vijaka.



Slika 7: Toge vilice M100a in vzorec M101.

2.2 Material

Materialne karakteristike pločevin so bile izmerjene na Inštitutu za kovinske materiale in konstrukcije v Ljubljani. Inštitut ima akreditiran laboratorij za mehanske preiskave s strani Slovenske akreditacije po standardu SIST EN ISO/IEC 17025. Standardni natezni preskus (v nadaljevanju SNP) z ekstenziometrom do pretrga ja bil narejen v skladu s standardom SIST EN ISO 6892-1.

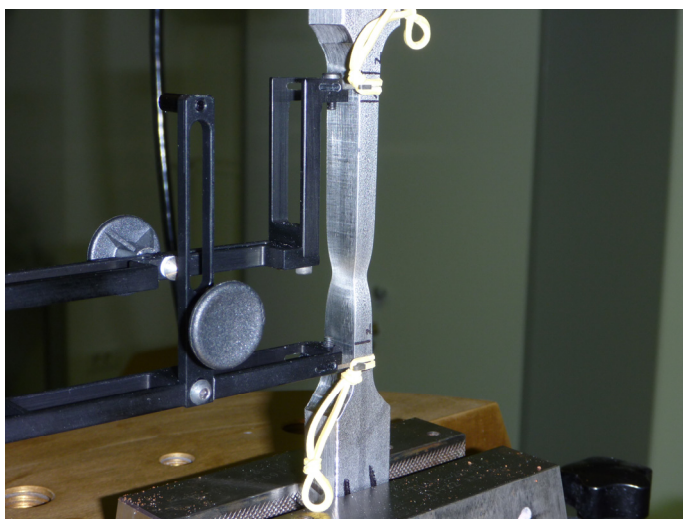
Pri projektiranju spojev sem izbral jeklo S235, ki ima minimalno zagotovljeno napetost tečenja $f_y = 235$ MPa, natezno trdnost $f_u = 360 - 510$ MPa in deformacije pri porušitvi, večje od 26 %.

SNP je bil izveden po točno določenemu protokolu, ki je opisan v standardu SIST EN ISO 6892-1 in predpisuje obremenjevanje do napetosti tečenja z določeno hitrostjo naraščanja napetosti v MPa/s. Obremenjevanje od napetosti tečenja dalje pa je vodeno s hitrostjo

naraščanja deformacije. Deformacije so bile merjene z ekstenziometrom (Slika 8). Na isti sliki je tudi vidna očitna kontrakcija prereza tik pred poružitvijo. Napetost tečenja in trdnost materiala sta za testno epruveto Vz.-1 znašali:

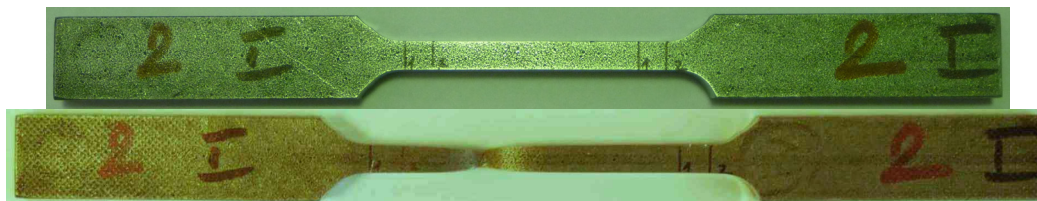
$$f_y = 313 \text{ MPa}$$

$$f_u = 425 \text{ MPa}$$



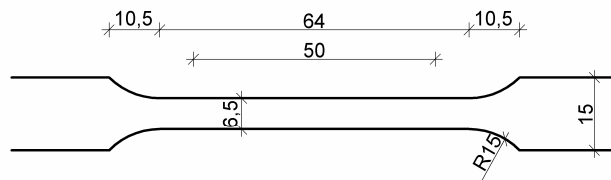
Slika 8: Testna epruveta Vz.-1 z ekstenziometrom tik pred poružitvijo z lepo vidno kontrakcijo prereza.

Epruveta je zasnovana po standardu SIST EN 10002-1. Iz enake pločevine kot za izdelavo spojev je bila izrezana testna epruveta (Slika 9 in Slika 10) debeline 12 mm in naslednjih dimenzij v milimetrih:



Slika 9: Testna epruveta Vz.-1 pred pretrgom in po pretrgu.

Testna epruveta pred pretrgom in po pretrgu je izrisana na sliki (Slika 9). Iz slike je vidna velik raztezek epruvete in kontrakcija prereza na mestu pretrga.

Epruveta $d = 12 \text{ mm}$, $L_0 = 50 \text{ mm}$ 

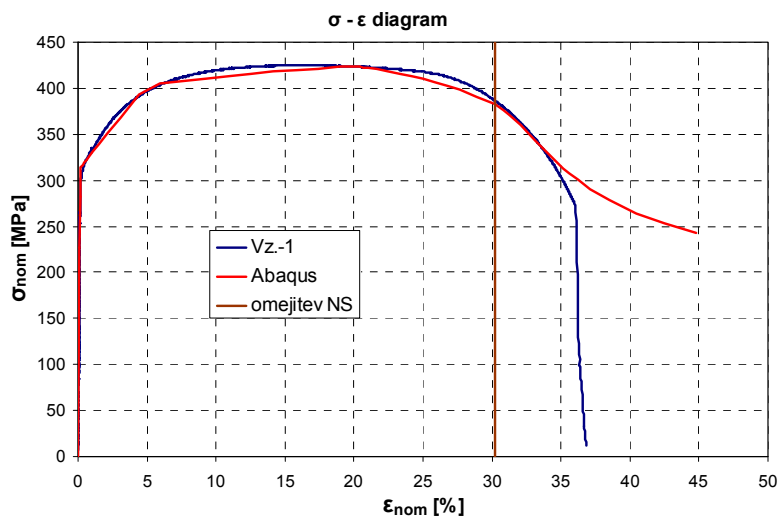
Slika 10: Nazivna geometrija testne epruvete.

Dejanska izmerjena geometrija in rezultati nateznega preskusa so podani v preglednici (Preglednica 2). Na diagramu napetost – deformacija je prikazano razmerje med napetostmi in deformacijami (Slika 11). Iz diagrama je razvidna velika zmožnost plastičnega deformiranja materiala.

Na inženirskem diagramu (Slika 11) je krivulja numerične simulacije omejena (omejitev NS) z nivojem dejanskih deformacij, pri katerih rezultati numerične simulacije niso več veljavni (glej poglavje 3.2).

Preglednica 2: Geometrija in rezultati standardnega nateznega preskusa z ekstenziometrom za testno epruveto Vz.-1.

Debelina a_0 [mm]	Širina b_0 [mm]	Dolžina L_0 [mm]	Napetost tečenja $R_{p0,2}$ [MPa]	Natezna trdnost R_m [MPa]	Razteznost A [%]	Razteznost A_e [%]	Kontrakcija Z [%]
11,85	6,56	50,00	313	425	38,2	36,8	73



Slika 11: Diagram napetost - deformacija za uporabljen material dobljen iz standardnega nateznega preskusa in diagram za epruveto simulirano v programu Abaqus.

2.3 Oprema in zajem podatkov

Naprave za izvedbo testov so zajemale hidravlično napravo Instron, merilne naprave, priklop merilnih naprav z računalnikom in računalnik s pripadajočo programsko opremo za zajem podatkov. Vsi testi so bili izvedeni januarja in februarja 2011 v laboratoriju Fakultete za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani.



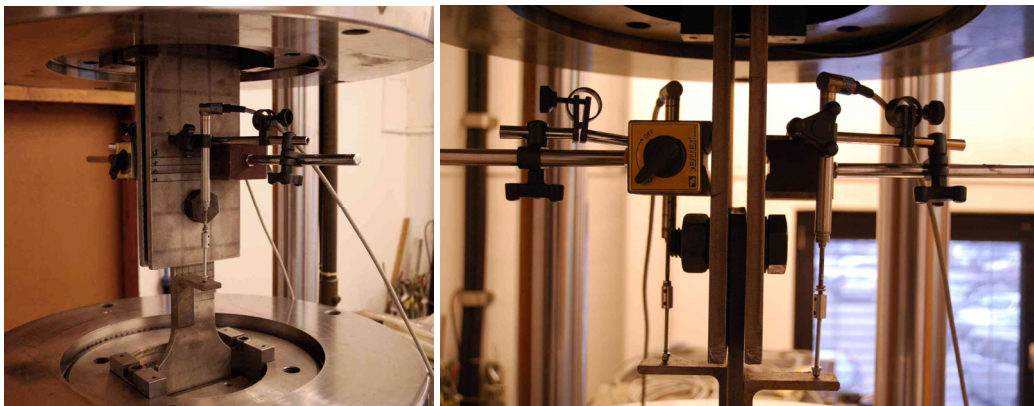
Slika 12: Instron preizkuševalna naprava na levi in kontrolni vmesnik na desni.

Preizkuševalna naprava Instron je imela hod bata 100 mm (Slika 12). Kapaciteta naprave je bila 1000 kN. Celotni potek raziskav sem krmilil elektronsko preko vmesnika na napravi Instron. Preiskave so bile vodene preko hidravličnega bata s hitrostjo 1,5 mm/min. Takšna hitrost predstavlja statične razmere pri obremenjevanju. Preko Instron hidravličnega bata sem meril podatke o sili in pomike bata.

Merilna oprema je torej merila pomike in silo v hidravličnem batu. Pomiki, uporabljeni v rezultatih raziskave, so bili izmerjeni s pomočjo dveh indukcijskih merilcev pomikov (v nadaljevanju IDT) – z enim IDT-jem na vsaki strani spoja. IDT-ja, sta imela možnost merjenja pomikov do 50 mm, kar je zadostovalo za vse laboratorijske teste. Iz vrednosti pomikov, izmerjenih z obema IDT-jema, sem izračunal povprečni pomik. Razlika v pomiku med IDT-jem 1 in IDT-jem 2 je bila eden izmed pokazateljev centričnosti namestitve testiranih delov spoja. Razlika v pomikih med merilcema je bila v vseh primerih manj kot 0,30 mm.

Vrednosti pomika na hidravličnem batu je bila vedno večja od pomika izmerjenega z IDT-ji. Razlika je nastala zaradi podajnosti sistema.

Vsi podatki so se beležili s frekvenco 2 Hz. V rezultatih raziskave so bili uporabljeni naslednji podatki: oba pomika IDT 1 in IDT 2 ter sila izmerjena na hidravličnem batu.



Slika 13: Spoj M101 vpet v čeljusti hidravličnega bata z nameščenimi merilnimi napravami (IDT 1 in IDT 2).

2.4 Potek raziskave

Potek raziskave je zajemal pripravljalna dela, porušni test in beleženje podatkov.

Pripravljalna dela so obsegala čiščenje vzorcev, merjenje dejanskih geometrij in merilnih mest ter risanje mreže na vzorce. Merjenje dejanskih geometrij je omogočilo kasnejšo razlago odstopanj rezultatov v primerjavi z numeričnimi simulacijami. Iz mreže, narisane na nedeformiranih vzorcih, so bila kasneje vidna deformirana območja in porušne linije.

Test do porušitve je bil izveden po točno določeni proceduri. Na začetku sem na kontrolni enoti hidravličnega bata nastavil hitrost in smer pomika bata. Sledilo je vpenjanje spoja v vpenjalni glavi. Spoj sem z vijakom izbrane dimenzije privijačil do te mere, da med vilicami in vzorcem ni bilo zračnosti. Sledilo je nameščanje IDT-jev na že vnaprej določena in izmerjena merilna mesta.

Ostal je samo še ključni del raziskave – porušitev vzorca. Pred natezno porušitvijo sem na računalniku izničil vse vrednosti na IDT-jih, tako da sem začel z merjenjem pomikov iz vrednosti 0,0 mm. Vrednost sile pa je bila na začetku porušnega testa vedno minimalno različna od nič, zaradi vpenjanja spoja v čeljusti.

Sama izvedba porušnega testa je trajala od 10 do 15 minut. Med testiranjem ni bilo zapletov ali napak.

3 Numerično modeliranje spojev

3.1 Programska oprema Abaqus

Vsi numerični modeli so bili postavljeni in izračunani s programskim orodjem Abaqus v6.10. Programsko orodje Abaqus trži podjetje Dassault Systèmes.

Abaqus/CAE (Complete Abaqus Environment – Polno Abaqus Okolje) je interaktivno, grafično okolje v Abaqusu. Omogoča učinkovito modeliranje, predvsem zaradi možnosti enostavne definicije geometrij modelov, določanja regij, pripisovanja materialnih karakteristik, mreže končnih elementov, itn.

V okviru numeričnih simulacij sem naredil štiri različne modele. Najenostavnejši model je bil ravninski numerični model – model (a), kjer sem vijak modeliral kot togo telo, vzorec pa z lupinastimi končnimi elementi. Pri modelu (b) sem za razliko od modela (a) za pločevino vzorca uporabil prostorske končne 3D elemente. Model (c) je obsegal spoje modelirane s prostorskimi končnimi 3D elementi vendar brez ojačitve na mestu vpetja v čeljusti bata. Ta model je uporabljen tudi kot končna oblika modela, s katerim so izračunani končni rezultati numeričnih simulacij ter je uporabljen za primerjavo z rezultati laboratorijskih testov. Najkompleksnejši model - model (č) - je obsegal cel spoj, to je spoj z ojačitvami in njihovimi zvari.

Za konvergenčno študijo gostote mreže sem zmodeliral dve različni gosti mreži za lupinasti model (a) in tri različni gostote mreže za prostorski model (c).

Na začetku numeričnega modeliranja sem se v programu Abaqus odločil za konsistenten sistem enot (mm, MPa, ...), ki sem ga konsistentno uporabljal v vseh analizah.

Numerične analize spojev sem izvedel v načinu analize Abaqus/Standard. Abaqus/Standard analiza je primerna za reševanje nelinearnega statičnega problema z Newtonovo metodo. Ker obtežba narašča postopoma do polne vrednosti, je bilo potrebno definirati "čas". To je psevdo čas, ki v mojem primeru sovпада s podanim pomikom spoja. Pomik je kot robni pogoj vsiljen enemu delu spoja. S pomikom torej usmerjam potek numerične simulacije.

3.2 Material

Eden ključnih elementov numeričnega simuliranja spojev je dobro umerjena materialna zveza napetost – deformacija. Zato sem materialni model definirala na podlagi primerjave diagrama napetost – deformacija med SNP epruvete Vz.1 in numerične simulacije SNP. Iz SNP sem določil zvezo za $\sigma_{nom} - \varepsilon_{nom}$. Podatke iz SNP sem uporabil za izračun ε_{dej} in σ_{dej} po enačbah (16) in (17). Ti vrednosti sem potem vnesel v materialni model za numerično analizo. Že v prvi iteraciji sta se inženirska diagrama $\sigma_{nom} - \varepsilon_{nom}$ iz numerične simulacije in iz SNP dobro pokrila. Z minimalnimi korekcijami ε_{dej} in σ_{dej} , ki so razložene v nadaljevanju sem v iteracijah

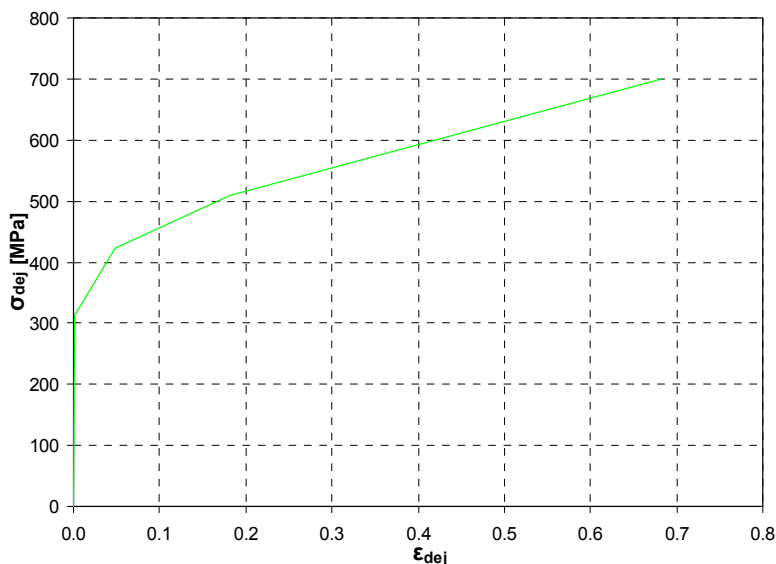
2, 3 in 4 dosegel, da sta diagrama (Slika 11) $\sigma_{nom} - \varepsilon_{nom}$ za SNP in numerično simulacijo dobro usklajena.

Do napetosti tečenja ($f_y = 313,0$ MPa) sem material modeliral po Hookevem zakonu o elastičnosti materiala. Upošteval sem elastični modul $E = 210000$ MPa in Poissonov količnik $\nu = 0,3$. Od točke plastificiranja do trdnosti materiala sem iz rezultatov SNP določil še eno vmesno vrednost deformacije ε_{dej} , da bi se čim bolj približal dejanski krivulji napetost – deformacija. Ti dve vrednosti sem v iteracijah izboljševal v tej smeri, da sem na inženirskem diagramu dobil dobro sovpadanje krivulj in stabilen numerični model. V določenih primerih so se zaradi pojavljanja ravnega/horizontalnega platoja napetosti pojavili problemi pri konvergenci računa.

$$\varepsilon_{dej} = \ln(1 + \varepsilon_{nom}) \quad (16)$$

$$\sigma_{dej} = \sigma_{nom}(1 + \varepsilon_{nom}) \quad (17)$$

Zadnja točka v materialnem modelu se nahaja v postkritičnem delu diagrama, kot točka porušitve. Določim jo iz enostavne zveze med silo tik pred porušitvijo in prerezom epruvete v na mestu porušitve. Deformacijo v območju kontrakcije prereza pa zgolj ocenim. Tudi to točko sem iteriral štirikrat. Ta vrednost se vnese kot zadnja točka na dejanski graf napetost – deformacija.



Slika 14: Dejanski model deformacije in napetosti, ki je uporabljen v Abaqusu.

Materialni model, ki predstavlja dejansko obnašanje materiala, to je z upoštevanjem kontrakcije prereza, je izrisan na diagramu (Slika 14). To je hkrati tudi materialni model, ki sem ga vnesel v modul za definiranje materialnih karakteristik.

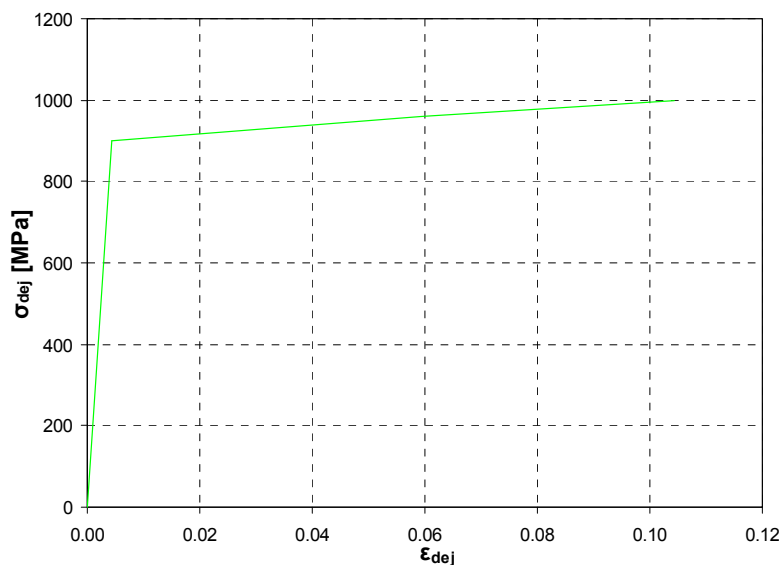
Numerična simulacija SNP služi za definicijo deformacije, ki na lokalnem območju predstavlja pretrg. Od točke, kjer se pojavi ta deformacija, so rezultati numeričnih analiz neveljavni (omejitev numeričnih simulacij - omejitev NS). Razlika med postkritičnima deloma diagrama z nominalnimi vrednostimi (Slika 11) je nakazala očiten padec napetosti pri porušitvi epruvete iz SNP in ohranjanje določenih napetosti pri numerični simulaciji epruvete. Te točke sem na vseh diagramih sila - pomik v diplomski nalogi in v prilogi C omejil z rjavo vertikalno linijo (Slika 11).

Materialni model vijakov sem poenostavil, ker vijaki niso bili predmet raziskovanja v diplomski nalogi. Za visokovredne vijake razreda 10.9 sem upošteval nominalne materialne karakteristike:

$$f_{yb} = 900 \text{ MPa}$$

$$f_{ub} = 1000 \text{ MPa} \quad \text{pri } \varepsilon_{nom} = 10 \%$$

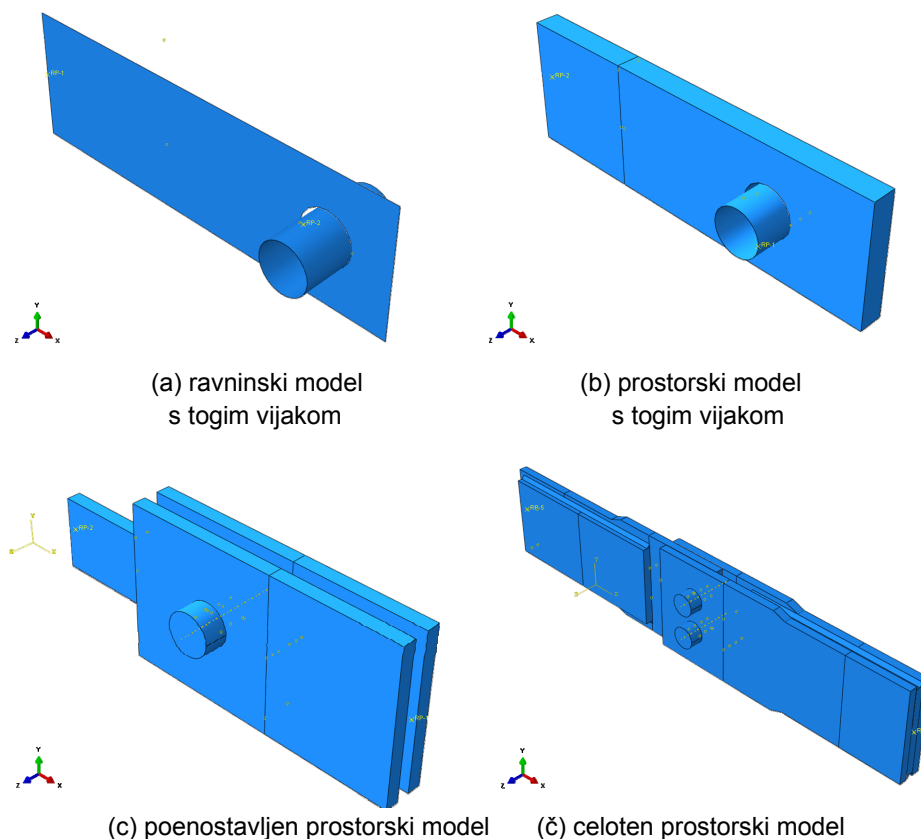
Zveza σ_{dej} in ε_{dej} za materialni model vijakov je prikazana na diagramu (Slika 15).



Slika 15: Idealiziran diagram napetost – deformacija, ki je uporabljen za materialni model visoko vrednih vijakov razreda 10.9.

3.3 Numerični modeli

V programskem okolju Abaqus sem zasnoval štiri različne numerične modele, ki so opisani v poglavjih 3.3.1 do 3.3.4 in prikazani na sliki (Slika 16). Pravilnost oziroma natančnost rezultatov sem ocenil s konvergenčno študijo, opisano v poglavju 3.4. Pri odločitvi, kateri računski model in kakšno gostoto MKE izbrati za numerično simulacijo testov, sem moral sprejeti kompromis med računskim časom in pravilnostjo rezultatov. Izkazalo se je, da je optimalen računski model (c) (glej poglavje 3.3.3). Na tem modelu sem tudi izvedel konvergenčno študijo.



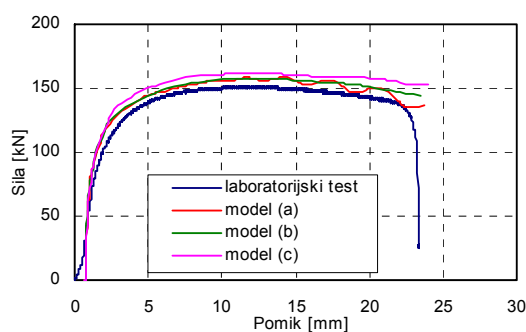
Slika 16: Primeri numeričnih modelov uporabljenih za izračun nosilnosti spojev.

3.3.1 Lupinasti model s togim vijakom (a)

Prvi in najosnovnejši model spojev (a) – lupinasti model s togim vijakom - je bil sestavljen iz dveh delov, in sicer iz vzorca in vijaka. Ta dva dela sta bila povezana skupaj s kontaktom v normalni smeri na površino, s karakteristikami t.i.: »hard contact«. Vijak sem upošteval kot

togo telo. Vzorec sem modeliral z lupinastimi (shell) KE tipa S4R. To so štiri vozliščni KE z linearno interpolacijo pomikov in reducirano integracijo. Reducirana integracija štiri integracijske točke nadomesti z eno integracijsko točko. S tem se občutno zmanjša računski čas, elementi pa so tudi manj občutljivi na »shear locking« (v elementih, ki so obremenjeni upogibno, se pojavijo prevelike strižne togosti elementov), ki nastane v polno integriranih elementih. Lahko pa se pojavi problem imenovan »hourglassing«, kjer se pojavijo nične vrednosti napetosti pri obremenitvi s čistim upogibom. Abaqus ima vgrajene določene kontrole, ki skušajo preprečiti nastanek tega pojava. Velikost stranice končnih elementov v tem modelu je bila približno 1 mm. Primerno velikost mreže sem za ta model ocenil iz konvergenčne študije.

Krivulja laboratorijskega testa na diagramu (Slika 17) ne prikaže odziva primerljivega z modeli (a), (b) in (c), ker so bile numerične simulacije modelirane z nazivnimi geometrijami, dejanska geometrija vzorca pa je precej različna (Priloga A -Tabela z nazivnimi in dejanskimi geometrijami spojev).



Slika 17: Diagram sila – pomik za primerjavo modelov spoja M101 in laboratorijskega testa.

Potek analize sem usmerjal z robnimi pogoji. Vzorcju sem na eni strani predpostavil popolno vpetje, togemu vijaku pa sem predpisal pomik. Pomik sem izbral v taki smeri, da sem dobil natezni spoj. Premiki vijaka so bili v ostalih smereh preprečeni.

Rezultati modela so nenatančni predvsem zaradi uporabe ravninskih elementov, kar sugerirajo tudi v priročniku za uporabo programske opreme. Priročnik svetuje uporabo ravninskih elementov tam, kjer je debelina manjša od 1/10 ostalih dveh dimenzij delov. K manjši natančnosti modela je dodatno prispevalo tudi neupoštevanje vilic, ki omejujejo deformiranje pločevine, ki so definirane v modelu (c). Dodatna nekonsistentnost se je pojavila še pri merilni razdalji. Definirana je v poglavju Zasnova spojev (str. 8). Na tem modelu so bili pomiki izmerjeni med pomikom togega vijaka in merilnim mestom na vzorcju. Torej v tem modelu nisem zajel deformacije, ki se je pojavila v togih vilicah. Analiza je pokazala, da je ta poenostavitev povzročila napako v pomiku reda velikosti 10^{-2} mm, kar ni bistvenega pomena. Poenostavitev deformabilnega vijaka v togi vijak ni bistveno zmanjšala natančnosti rezultatov, kar je vidno iz primerjave med delom (b) in (c). Rezultati poenostavljene analize s

primerno velikimi (majhnimi) elementi so, kot je vidno na diagramu (Slika 17), povsem uporabni za praktično uporabo.

3.3.2 Prostorski model s togim vijakom (b)

Prostorski model s togim vijakom - model (b) je nadgradnja modela (a). Spoj je bil prav tako sestavljen iz dveh delov. Iz vzorca in iz togega vijaka, ki sta bila povezana z normalnim kontaktom. Za vzorec sem v tem modelu za razliko od modela (a) kot končne elemente uporabil osem vozliščne poliedre z linearno interpolacijo pomikov in z reducirano integracijo C3D8R. Velikosti stranic elementov so bile približno 3 mm. To velikost elementov sem ocenil na podlagi konvergenčne študije (glej poglavje 3.4). Robni pogoji so bili enaki, kot pri prejšnjem modelu. Vzorec je bil vpet na eni strani in vijaku je bil vsiljen pomik v smeri X. Model je v primerjavi z modelom (a) vrnil bolj realne vrednosti iskanih rezultatov (Slika 17). Vendar so bili rezultati za maksimalno silo na vpetju boljši samo za 0,2 %. Še vedno pa je ostalo za dobre vrednosti rezultatov nekaj pomanjkljivosti. Nisem upošteval strižnega in normalnega kontakta med vilicami in vzorcem, ki je definiran pri modelu (c). Celotna sila v spoju je bila zaradi tega manjša. Zaradi večje razsežnosti modela se je podaljšal računski čas, ki je bil še vedno kratek v absolutnem smislu (5 minut), vendar 320 % daljši kot za model (a). Ta model ni izkazal bistvene prednosti, saj so bili rezultati do največje nosilnosti skoraj enaki kot za model (a), računski čas pa občutno daljši.

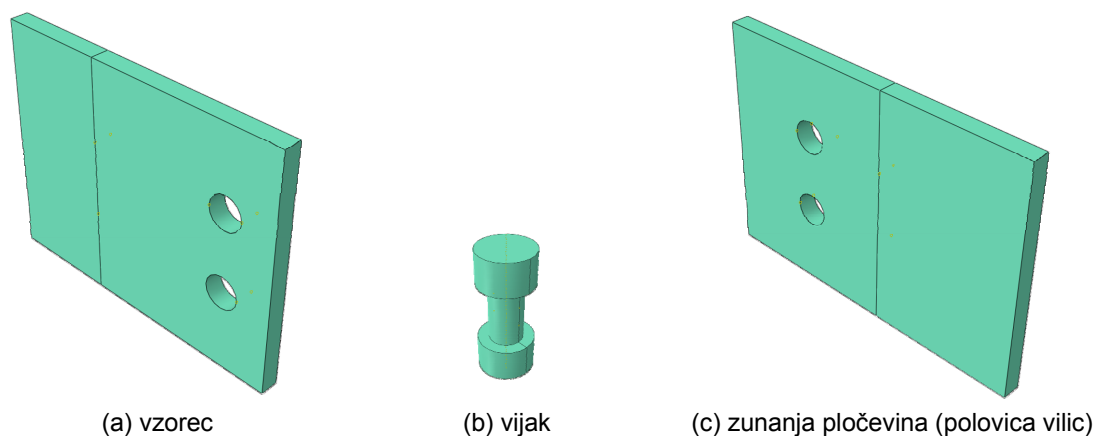
3.3.3 Poenostavljen prostorski model (c)

Poenostavljen prostorski model (c) je v primerjavi z modelom (b) nadgrajen z modeliranjem deformabilnega vijaka in deformabilnih vilic. Vilice sicer poimenujem toge vilice, ker so v primerjavi z vzorcem toge. Model torej sestavljajo: vzorec, vijak(a) in zunanji pločevini (vilice) (Slika 18).

Simulacije spojev s tem modelom so zelo dobro zajele odziv sila - pomik v primerjavi z laboratorijskimi testi. Namesto enega kontakta v normalni smeri, kot pri modelu (a) in modelu (b), sem v tem modelu za vsak vijak predpisal 3 kontakte v normalni smeri; za kontakte vijaka z vsakim krakom vilic in za kontakt vijaka z vzorcem. Za vsak vijak sem opredelil tudi kontakt v normalni smeri med glavo in matico vijaka in med zunanjo ploskvijo vilic. Ta dva kontakta sta preprečevala odmik krakov vilic v smeri Z, zaradi razrivanja pločevine. Razrivanje pločevine vilic se je pojavilo zaradi povečanja debeline preizkušanca na mestu kontakta vzorca in vijakov. Dodatno je bil med vilicami in vzorcem definiran kontakt v tangencialni smeri ploskev. Ker je bil pomik med krakoma vilic v smeri Z omejen s togostjo vijaka, se je pločevina vzorca predvsem v območju pred vijakom zaklinila med pločevini vilic in povzročila trenjske sile. Ta pojav je viden tudi na slikah (Slika 48 in Slika 49), ki so nastale

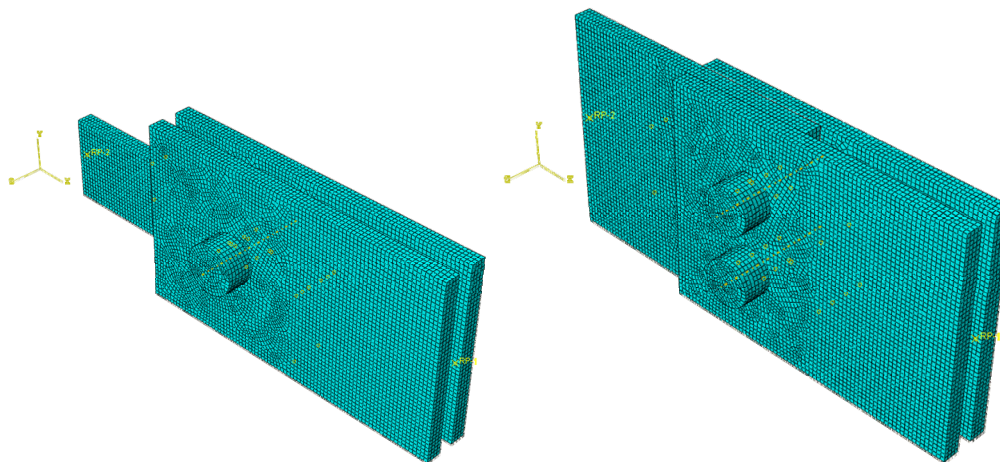
na laboratorijskih testiranjih. Vrednost za koeficient trenja sem prevzel $c = 0,25$ (Vasarhelyi, DD. et al., 1967).

V tem modelu sem uporabil dva različna materialna modela, in sicer materialni model za vijake in materialni model za pločevine. Materialna modela pločevin in vijakov sem opisal v poglavju 3.2.



Slika 18: Deli spoja M201 uporabljeni za numerični model (c).

Tipična spoja M101 in M201 z mrežo končnih elementov sta predstavljena na sliki (Slika 19). Pri definiranju mreže sem ustvaril točke KE na mestih pripenjanja merilnih naprav na laboratorijskih testih za neposredno primerjavo z laboratorijskimi testi.



Slika 19: Poenostavljen prostorski model s prikazom mreže končnih elementov za tipičen spoj M101 z enim in M201 z dvema vijakoma.

Obremenitev sem vnašal preko robnih pogojev v obliki vsiljenih pomikov. Na območjih, kjer sem predpostavil vpetje vzorca in vilic, sem ustvaril togo oporo. Toga opora je povezala celotno ploskev in prostostne stopnje vseh točk na ploskvi v eno referenčno točko. V referenčni točki sem podprl vse prostostne stopnje (toga podpora) in izpisal sile. V referenčni

točki na vzorcu pa sem kot robni pogoj predpisal pomik v smeri X, v ostalih petih smereh pa sem preprečil pomike in zasuke. V izogib singularnosti sem v smeri pomika Y dodatno podprl vijake.

Izhodne podatke sem definiral v meniju »History Output«. Izpisal sem sile v kontaktih in reakcijske sile v podporah. Pomike sem izpisal v točkah, kjer sem v laboratorijskih testih pripel merilne naprave. Sile sem izpisal za kontakt v normalni smeri med vijakom in vzorcem, za sile v kontaktu v tangencialni smeri med vilicami in vzorcem in za sile na podporah.

Analize modelov sem izračunal v enem koraku, kjer je izračun potekal v večih prirastkih. Korak sem omejil s petimi parametri. Osnovni parameter, s katerim sem kontroliral potek analize koraka, je Time period – časovna perioda. Če je časovna perioda enaka vrednosti končnega vsiljenega pomika je inkrement enak prirastku pomikov. Inkrementacija – prirastek je bila določena s štirimi parametri. Maksimalno število inkrementov sem omejil s številom 1000. Vrednost te omejitve je v preprečevanju računanja problemov s slabo konvergenco, zaradi česar se računski časi lahko zelo podaljšajo, rezultati pa se vseeno ne izračunajo do konca koraka. V program sem vnesel še začetno vrednost inkrementa, in sicer 0,0001. Za to vrednost sem se odločil na podlagi izračuna testnih analiz in pregleda velikostnih razredov začetnih inkrementov. Za minimalno vrednost inkrementa sem določil vrednost 1×10^{-7} . Minimalna vrednost je omejila najmanjšo velikost inkrementa. Minimalna vrednost je zagotovila nadaljevanje računa tudi pri simulacijah, pri katerih se je inkrementacija zgostila okrog določene vrednosti pomika. Za vrednost 1 sem določil velikost maksimalnega inkrementa. smisel te omejitve je v izrisu gladkih krivulj grafov. Poenostavljen prostorski model - (c) sem zaradi primernega računskega časa in dobrih rezultatov uporabil za primerjavo z rezultati laboratorijskih testov.

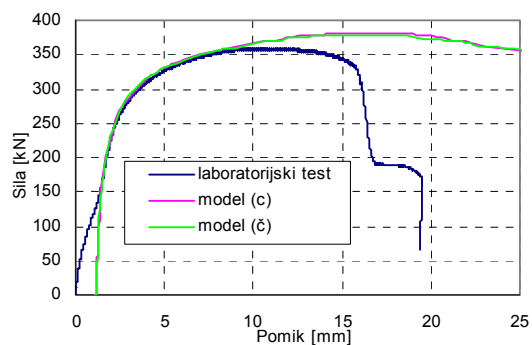
Računski čas modelov je na hitrejšem računalniku znašal od 20 do 40 minut (Intel Core i5, RAM 8 GB).

3.3.4 Celoten prostorski model (č)

Celoten prostorski model (č) sem zmodeliral za primerjavo s poenostavljenim prostorskim modelom (c). V modelu (č) sem določil takšno vpetje, kot je bilo na laboratorijskih testih. Torej sem na območju ojačitve vzorca določil togo vpetje. Iz ojačitev se celotna sila na vpetju preko zvarov prenese na vzorec. Od tu naprej pa model deluje enako kot model (c).

Debeline zvarov sem z numeričnimi simulacijami preveril za spoje, kjer sem izračunal največje sile glede na dolžino zvarov, in sicer na spojih M201, M202 in M206.

S celotnim modelom sem želel preskusiti, kako delujejo poenostavljeni pogoji vpetja na modelu (c) in kako se obnaša bruto prerez. Primerjava med modeloma je podana v obliki diagrama sila – pomik (Slika 20). Diagrama za numerična modela (c) in (č) sta skoraj identična. To je očitna posledica enakosti modelov (c) in (č) na območjih, na katerih izpisujem rezultate. To pomeni, da sem pri modelu (c) pravilno ocenil robne pogoje.



Slika 20: Diagram sila – pomik za primerjavo modelov (c) in (č) spoja M201 in laboratorijskega testa.

Pri modeliranju spojev sem preučeval dogajanje v spoju med mestoma merjenja pomika na laboratorijskem testu in konice napetosti v zvarih med vzorcem in ojačitvijo. Zato je model (č) narejen samo za tri primere spojev: M201, M202 in M206. To so hkrati tudi spoji, pri katerih se lahko pojavijo največje napetosti v zvarih. Ker sila s katero čeljusti stisnejo vzorec ni znana, sem ta vpliv v numeričnem modelu zanemaril. Posledično sem v numeričnem modelu izračunal v zvarih plastične deformacije, ki pa v zelo lokaliziranem območju niso presegale 1% plastičnih deformacij. Pri numeričnem modelu (c) in (č) za spoj M201 se maksimalna sila v spoju razvije pri pomiku, ki je precej večji od pomika izmerjenega pri maksimalni sili na testu. Do velike razlike v pomiku in maksimalni sili pride zaradi območja velikih deformacij, ki se pojavi na delu prereza pri numeričnem modelu. Na testu pa se je v istem območju že pojavil pretrg, ki v numeričnih simulacijah ni zajet. Ta problem je rešen z omejitvijo NS (glej poglavje 3.2).

Računski časi za modele (č) so bili dolgi od 12,75h do 34,17h. Več kot očitno so ti računski časi predolgi za izračun vseh numeričnih modelov spojev. Rezultati pa se ne razlikujejo niti za 0,5 %.

3.4 Konvergenčna študija

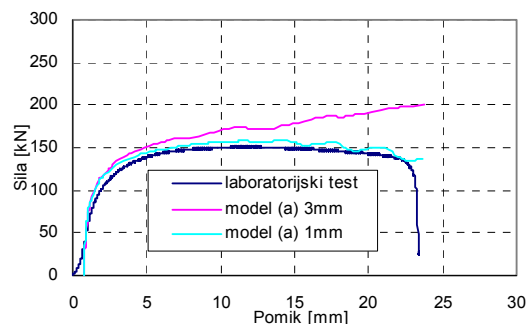
Konvergenčna študija pokaže kako rezultati konvergirajo k neki vrednosti v odvisnosti od gostote mreže KE. Ker večja gostota mreže pomeni daljši računski čas, je bil moj namen poiskati kompromis med zadovoljivo točnimi rezultati in ustreznim računskim časom.

Opravil sem dve konvergenčni študiji za model spoja M101. Eno za študijo model (a) z lupinastimi »shell« elementi in eno za model (c) s prostorskimi elementi »block«.

Za model (a) sem naredil dve različni mreži končnih elementov s povprečno velikostjo stranice KE 1 mm in 3 mm. Rezultati so podani v diagramu (Slika 21).

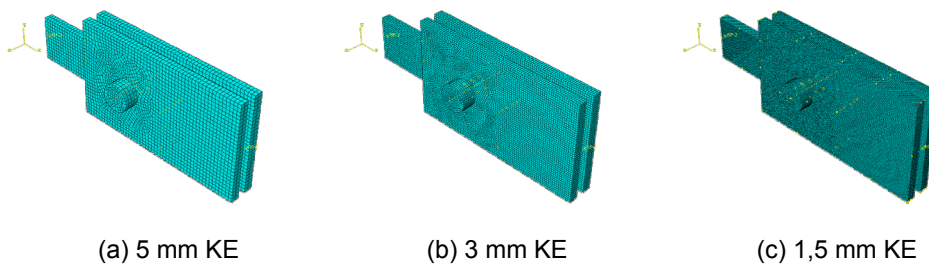
Model s 3 mm končnimi elementi se je od dejanskega diagrama kar precej oddaljil. Sila je v tem modelu s pomikom še kar naraščala, kar ni odraz dejanskega obnašanja spoja. Tak model torej ni primeren za numerično modeliranje in je podan samo za primerjavo. Model z

milimetrskimi elementi se je dobro približal dejanskemu diagramu. Kljub dobrem sledenju dejanskemu diagramu iz laboratorijskega preskusa, je diagram modela "začel nihati".



Slika 21: Diagram sila – pomik za spoj M101 za primerjavo numeričnih modelov z različno gostoto mreže lupinastih končnih elementov in laboratorijskega testa.

Numerično študijo za oceno primerne velikosti končnih elementov za prostorske elemente sem izvedel na numeričnem modelu (c). Za tri različne gostote mrež – 1,5 mm; 3 mm; 5 mm – sem uporabil končne elemente C3D8R. Lastnosti teh elementov so bile predstavljene v poglavju 3.3.3. Pri računu modelov (c) so se računski časi z zgoščevanjem mreže končnih elementov občutno podaljšali. Za analizo modela (c) in vzorca M101 s 5 mm velikimi končnimi elementi je računalnik potreboval 3,4 min, s 3 mm končnimi elementi 24,2 min in s 1,5 mm končnimi elementi 8640 min.



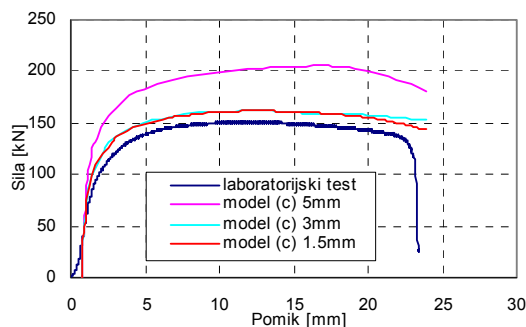
Slika 22: Spoj M101 za numerični model (c) z različnimi gostotami mrež končnih elementov.

Natančnost modela s 5 mm je za primerjavo z rezultati laboratorijskih testov premajhna. Maksimalna sila za spoj M101 je bila v tem numeričnem modelu različna od laboratorijskega testa za 35,6 %. Ta natančnost ni primerna za konkretno uporabo in je podana samo za primerjavo.

Model s 3 mm velikimi končnimi elementi sem ocenil kot model, ki se je izkazal za ustreznega tako v natančnosti, kot v ugodnih/sprejemljivih računskih časih. Rezultat numerične analize za maksimalno doseženo silo se za to gostoto mreže za spoj M101 se približa na 7,0 % vrednosti, ki je bila izmerjena na laboratorijskem testu. Vpliv na razliko med numeričnim modelom in testom so imele različne dejanske geometrije vzorca na

laboratorijskem testu v primerjavi z nazivnimi geometrijami numeričnega modela (glej poglavje 4.1.7).

Natančnost za 1,5 mm gosto mrežo se je za spoj M101 približala na 7,0 % za maksimalno doseženo silo v vpetju v primerjavi z laboratorijskim testom. To je enaka natančnost, kot pri modelih iz 3 mm vlelikih KE. Zaradi dolžine računskega časa se je ta model izkazal kot neprimeren za uporabo na vseh spojih.



Slika 23: Diagrama sila – pomik za spoja M101 za primerjavo numeričnih modelov z različno gostoto mreže prostorskih končnih elementov in laboratorijskega testa.

4 Rezultati

4.1 Rezultati laboratorijskih testov in numeričnih simulacij

Reprezentativni rezultati laboratorijskih testov in numeričnih simulacij so za vsak spoj posebej podani v prilogi B in v prilogi C.

Rezultate v obliki tabel sem podal v prilogi B. V tabelah so zbrani ključni rezultati laboratorijskih testov. V prilogi so zbrani z razlogom, da so vsi rezultati (to je rezultati izračunov po SIST EN 1993-1-8, novi formuli (Može, Beg, 2010), numeričnih analiz in laboratorijskih testov) zbrani na enem mestu in zato enostavno primerljivi. Za nosilnosti spojev po SIST EN 1993-1-8 in po novi formuli (Može, Beg, 2010) sem izračunal karakteristične vrednosti ($F_{b,k}$ in $P_{b,k}$), torej brez upoštevanja varnostnih faktorjev γ_{M0} in γ_{M2} .

Rezultati laboratorijskih testov v tabelah zajemajo:

- način porušitve,
- maksimalno silo,
- pomik pri maksimalni sili,
- silo doseženo pri pomiku $d_0/6$.

Za vsak spoj posebej sem v prilogi C izrisal deformiran numerični model vzorca, deformiran vzorec iz laboratorijskega testa in diagram sil na vpetju v odvisnosti od pomika za numerično simulacijo in laboratorijski test. Reprezentativni rezultati numeričnih simulacij so bili izračunani na numeričnemu modelu (c).

Pravilnost rezultatov laboratorijskih testov je omejena z lastnostmi materiala, ki se spreminjajo po pločevini in tudi glede na smer valjanja pločevine ter glede na natančnost izvedbe spojev, ki je bolj ali manj izmerljiva. Vsi preizkušanci so bili odrezani v smeri valjnja pločevine, zato je razlika v materialnih parametrih minimalna. Večjo vlogo pri nosilnostih oziroma pomikih pa odigrajo geometrijska odstopanja, ki so zabeležena v tabeli (Tabela z nazivnimi in dejanskimi geometrijami spojev) v prilogi A.

Pravilnost rezultatov numeričnih analiz je omejena s pomikom, pri katerem je bila dosežena vrednost plastičnih deformacij, ki na SNP povzroči pretrg. Rezultati, kjer plastične deformacije v modelu presegajo predpisano vrednost deformacije (v mojem primeru 0,68), so zato zgolj ocena. Na diagramih sila pomik sem z rjavo vertikalno linijo (omejitev NS – omejitev numeričnih simulacij) označil pomik, pri katerem se prvič pojavi plastična deformacija 0,68. Na testih se v trenutku porušitve sila na vpetju občutno zmanjša. Pri numeričnih modelih pa tega padca sil ni. Maksimalne sile na vpetju sem za numerične simulacije, v primerih, kjer je bila maksimalna vrednost sile dosežena pri pomiku večjem od omejenega pomika, odčital pri omejenem pomiku.

V numeričnih simulacijah, s katerimi sem računal odzive spojev, so upoštewane nazivne geometrije (Priloga A - Tabela z nazivnimi in dejanskimi geometrijami spojev). Dejanske geometrije odstopajo od idealnih tudi za 2 mm. Za spoja M103 in M108 sem zmodeliral

numerični simulaciji z upoštevanjem dejanskih geometrij in jih poimenoval M103_dg in M108_dg. Pri teh dveh numeričnih simulacijah sta diagrama sila - pomik za model z upoštevanjem dejanske geometrije in za idealiziran model različna (glej poglavje 4.1.7).

Ugotovil sem dva osnovna mehanizma porušitev: porušitev v strigu in porušitev oslabiljenega prereza v nategu. Posebej sem opredelil še porušitev z veliko ovalizacijo luknje. Tipičnih porušitev z razkolom ni bilo (Može, Beg, 2010). Pri spojih z dvema vijakoma so se pojavile tudi različne mešane porušitve: strižni iztrg, porušitev oslabiljenega prereza med vijakoma in porušitev oslabiljenega prereza samo na delu med luknjo in robom vzorca. Načine porušitev sem ovrednotil na podlagi porušnih linij, ki so nastale na vzorcu.

Vse nosilnosti (F_{max}), izmerjene na laboratorijskem testu, so podane v tabeli (Preglednica 3). V isti tabeli so podani načini porušitev in pomiki pri nosilnosti spoja (D_u). V tabeli so podani tudi rezultati za nosilnosti izračunane z numerično analizo s pripadajočimi pomiki in porušitvami. Rezultati za nosilnost izračunani po SIST EN 1993-1-8 so podani glede na merodajno kontrolo. V vseh primerih razen v primeru spoja M206 je merodajna kontrola za nosilnost na bočne pritiske $F_{b,k}$. V primeru spoja M206 pa je merodajna kontrola za nosilnost v oslabiljenem prerezu. Za primerjavo so izračunane še nosilnosti po novi formuli za nosilnost na bočne pritiske (Može, Beg, 2010). Pri obeh izračunih nosilnosti na bočni pritisk sem pri spojih z dvema vijakoma upošteval dvojno nosilnost za bočni pritisk enega vijaka, zaradi primerljivosti rezultatov s testi in numeričnimi simulacijami.

Preglednica 3: Tabela nosilnosti spojev s porušitvami in pripadajočimi pomiki

Vzorec	Laboratorijski test			Numerična analiza - Abaqus			SIST EN 1993-1-8		$P_{b,k}$ (Može, Beg) [kN]
	Način porušitve	F_{max} [kN]	D_u [mm]	Način porušitve	F_{max} [kN]	D_u [mm]	Merodajna kontrola	F_{min} [kN]	
M101	a	151,4	11,4	a	162,1	12,1	c	80,8	131,2
M102	b	192,2	13,7	b	205,3	17,0	c	98,0	163,9
M103	b	202,2	9,0	b	210,1	9,0	c	133,5	179,5
M104	a	125,0	9,2	a	134,9	11,6	c	99,6	117,5
M105	a	163,8	12,2	a	168,2	13,2	c	128,1	147,1
M106	a	197,4	13,7	a	206,4	13,7	c	150,2	173,8
M107	c	282,5	20,5	c	281,8	18,6	c	201,1	234,5
M108	b	279,0	13,4	b	286,2	14,4	c	235,6	243,7
M109	a	83,5	7,7	a	95,4	10,4	c	66,1	76,1
M110	a	103,6	8,1	a	118,5	8,9	c	78,3	90,6
M111	a	129,3	9,4	a	138,4	10,1	c	99,4	114,0
M112	c	181,6	14,7	b/c	194,1	19,9	c	134,1	153,7
M113	b	187,6	10,3	b	196,5	11,4	c	164,6	168,2
M201	d	359,2	11,6	d	372,4	11,6	c	176,6	301,7
M202	b*	492,9	13,4	b*	477,6	11,7	c	292,1	447,0
M203	d	348,3	15,6	d	368,9	14,7	c	163,7	274,2
M204	b**	455,2	14,9	b**	464,8	11,3	c	275,0	343,9
M205	a	352,5	14,7	a	367,4	13,3	c	236,0	274,8
M206	b	469,3	16,3	b	488,7	13,4	b	403,9	335,6

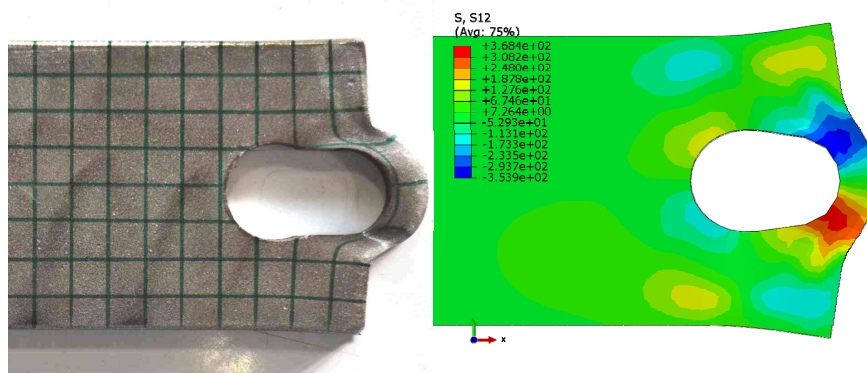
Legenda porušitev:

a	strižni prerez
b	oslabljeni prerez
b*	oslabljeni prerez med vijakoma
b**	oslabljeni prerez od vijakov do roba
c	bočni pritiski
d	strižni iztrg

4.1.1 Tipične porušitve za spoje z enim vijakom

Strižna porušitev spoja se je v vzorcu M104 pojavila v območju pred vijakom (Slika 24). V območju vzorca pred vijakom so se pojavile tudi natezne napetosti v smeri Y. To je evidentno iz velike elongacije mreže v smeri prečno na obremenitev vzorca. Porušitev v vzorcu se je torej pojavila zaradi delovanja strižnih in nateznih napetosti na območju porušitve. Idealizirano bi se porušitev morala pojaviti v dveh porušnih linijah.

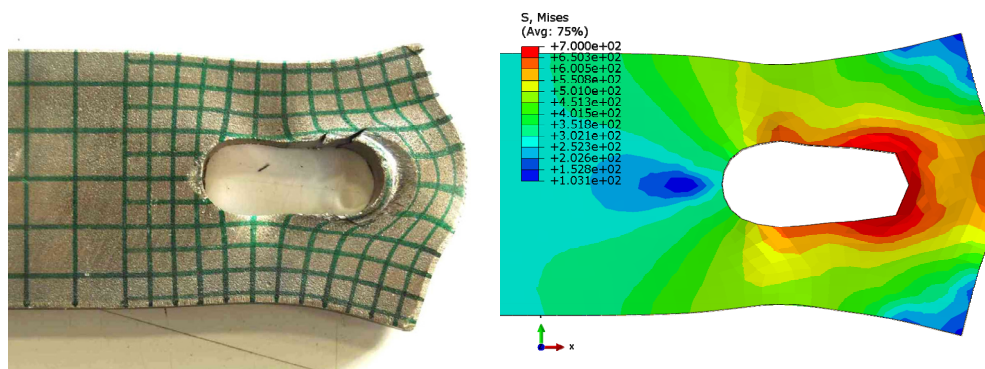
Rezultati numerične simulacije spoja M104 so nakazali strižno porušitev oziroma pretrg. V delu vzorca pred narivanjem vijaka, se pojavi lok nateznih napetosti in kontrakcija prereza na mestu največjih deformacij. Vendar se največje deformacije pojavijo v območju velikih strižnih napetosti (Slika 24), kjer vijak porine in strižno iztrga del vzorca.



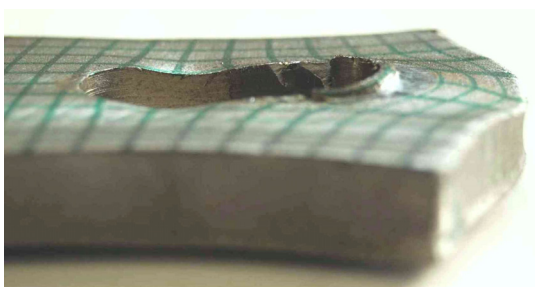
Slika 24: Deformiran vzorec M104. Strižna porušitev se pojavi v območju pred vijakom. Območje maksimalnih doseženih strižnih napetosti S12 se sklada z mestom strižne porušitve spoja.

Primer spoja M112 je tipičen primer spoja, ki se je porušil z veliko ovalizacijo luknje (Slika 25 in Slika 26). Porušitev z veliko ovalizacijo luknje nastane v primerih, ko sta nosilnosti za oslabljeni prerez in nosilnost v strigu približno izenačeni. V takem spoju se pojavi tudi velika elongacija luknje, kar je ugodna porušitev, ker se spoj obnaša duktilno. V primerjavi z vzorcem M113 (Slika 27), kjer so dosežene največje sile na vpetju, so bile sile dosežene pri M112 skoraj enake. Pri vzorcu M112 je bila dosežena $F_{max} = 181,6$ kN in pri vzorcu M113 $F_{max} = 187,6$ kN. Pri vzorcu M113 so bile dosežene največje sile od vseh spojev z M16

vijakom. Enako velja tudi za vzorec M107, ki se je prav tako porušil z veliko ovalizacijo luknje. Potek odvisnosti sila – pomik je izrisan na diagramu (Slika 28.). Pri obeh vzorcih M107 in M112 se je pojavila velika kontrakcija prereza v delu oslabljenega prereza in delu prereza pred naleganjem vijaka (Slika 26).

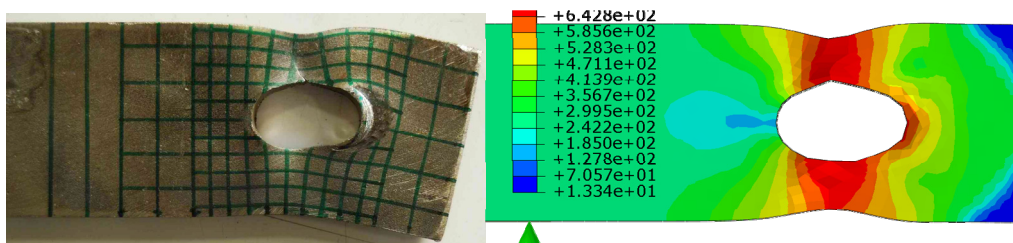


Slika 25: Deformiran vzorec M112. Dosežene so velike sile in velika elongacija luknje. Območje maksimalnih Misesovih napetosti se pojavi na velikem območju okrog ovalizacije luknje.



Slika 26: Deformiran vzorec M112. Razpoka je lepo vidna v območju strigov. Lepo je vidna tudi kontrakcija v delu oslabljenega prereza.

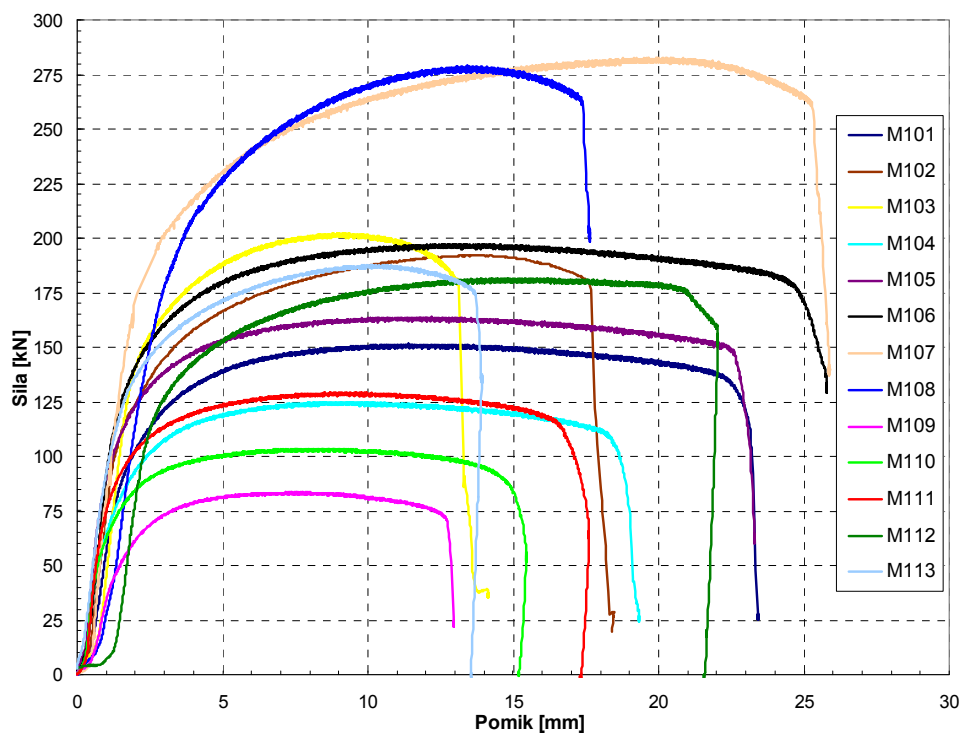
Vzorec v spoju M113 z veliko relativno razdaljo e_1/d_0 je tipičen vzorec, ki se je porušil v oslabljenem prerezu v nategu. Velika relativna razdalja e_1/d_0 je hkrati onemogočala porušitev v strigu ali porušitev z veliko ovalizacijo luknje zaradi bočnih pritiskov. Vzorec se je zaradi take geometrije porušil v oslabljenem prerezu. Nosilnost spoja je dobro ocenjena s formulo (1) za izračun nosilnosti v oslabljenem prerezu. Pri porušitvah v oslabljenem prerezu so dosežene največje sile na vpetju. Ta način porušitve pa kljub veliki nosilnosti ne nudi velike duktilnosti, saj porušitev nastopi že pri tretjino manjšem pomiku, kot porušitev z veliko ovalizacijo luknje.



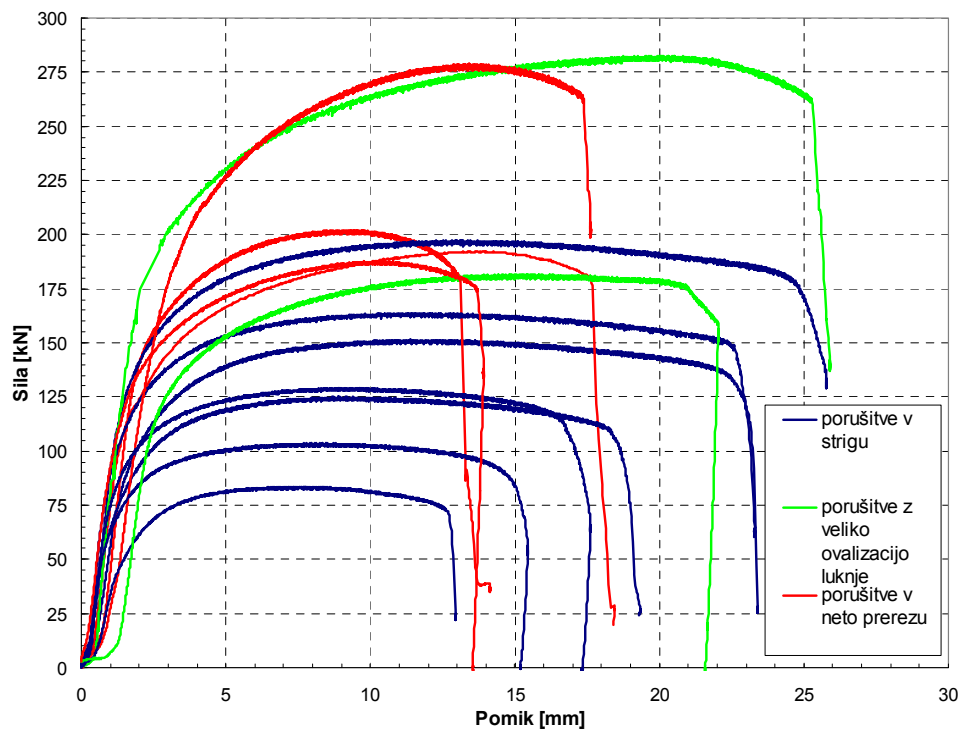
Slika 27: Deformiran vzorec M113. Vzorec se nesimetrično poruši v oslabljenem prerezu. Območje maksimalnih Misesovih napetosti nakaže območje pretrga vzorca v oslabljenem prerezu.

4.1.2 Diagrami sila – pomik za spoje z enim vijakom

Z diagramom zajamemo ključno povezavo med silo in pomikom. Iz diagrama lahko razberemo vse ključne podatke o spoju, kot so nosilnost spoja, nosilnost pri porušitvi in pripadajoče pomike. Duktilnost spoja se oceni glede na pomik pri največji nosilnosti. Prvi del diagrama je položen in kratek. Pri nekaterih spojih je ta del bolj, pri drugih manj izražen. Ta učinek nastane zaradi naleganja vijaka na rob luknje vzorca. Vsi vijaki so bili brez prednapenjanja privijačeni do te mere, da med vilicami in vzorcem ni bilo zračnosti. Začetni pomiki nastanejo pri majhnih silah in so manjši od 1,5 mm. To vrednost lahko primerjam z razliko premera luknje vijaka in dimenzije vijaka. V vseh primerih spojev je razlika $d_0 - d = 2$ mm. Torej so vsi začetni pomiki manjši od možnih pomikov v velikosti 2 mm. Del diagrama, kjer prevladujejo elastične napetosti, je najbolj tog. Z začetkom pojavljanja plastičnih napetosti v vzorcu spoja se začnejo pojavljati velike deformacije. Oblika in dolžina plastičnega platoja je odvisna od oblike spoja in posledično od načina porušitve. Diagrami sila - pomik za vse spoje z enim vijakom so izrisani na sliki (Slika 28).



Slika 28: Diagrama sila – pomik za vse spoje z enim vijakom.

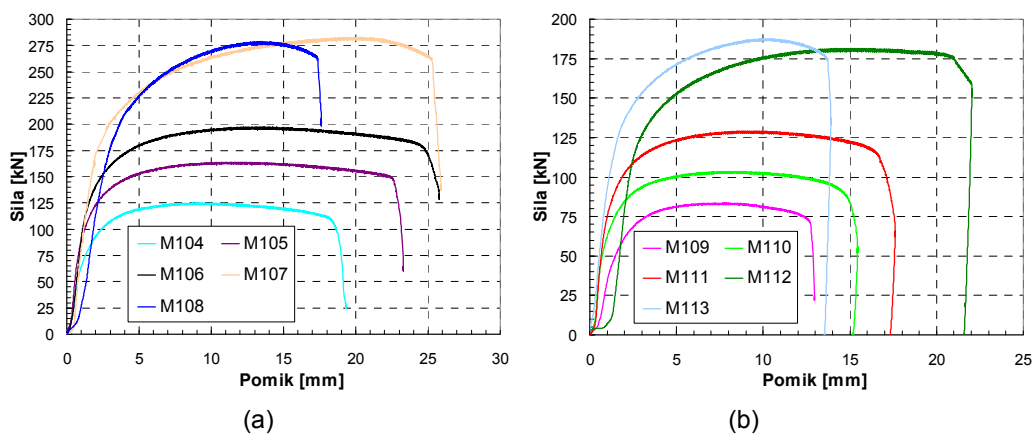


Slika 29: Diagrama sila – pomik za vse spoje z enim vijakom. Vsaka porušitev ima svojo barvo.

Za vsak način porušitve dobimo tipično obliko diagrama (Slika 29). Tip porušitve je obarvan s svojo barvo.

Porušitev v strigu ima nosilnost odvisno od relativne razdalje e_1/d_0 . Oblika diagrama ima dolg plastičen plato, ki v zadnjih dveh tretjinah rahlo pada in se v točki porušitve močno zalomi navzdol, ko nastane pretrg.

Porušitev v oslabiljenem prerezu ima slabo izražen plastični plato. Takoj, ko sila na vpetju doseže maksimalno vrednost že začne opazno padati do točke preloma, kjer sila občutno pade. Porušitev z veliko ovalizacijo luknje izkazuje največjo duktilnost. Dosežene so velike sile in veliki pomiki. Sila narašča še v skoraj celem plastičnem platuju. Tipičen diagram za to porušitev je diagram spoja M112, čeprav na koncu nastane porušna linija v strižni ravnini. Podobno velja tudi za spoj M107. Ta spoj ima razmerja razdalj enaka kot M112 ($d_0 = 18$ mm), vendar skalirana na velikost luknje vijaka ($d_0 = 26$ mm). Za razliko od spoja M112 je pri spoju M107 na koncu nastane porušna linija v oslabiljenem prerezu v nategu.



Slika 30: Diagrama sila - pomik za pet vzorcev z vijaki M24 (M104, M105, M106, M107 in M108) - (a) in pet vzorcev z vijaki M16 (M109, M110, M111, M112 in M113) - (b) z enakimi relativnimi razdaljami e_1/d_0 in e_2/d_0 .

Zanimiva je primerjava desetih diagramov sila – pomik. Pet spojev z vijaki M16 je neposredno primerljivih s petimi spoji z vijaki M24 z enakimi razmerji e_1/d_0 in e_2/d_0 . Za primerjavo sta podana dva diagrama (Slika 30). Prvi diagram za pet spojev (M104, M105, M106, M107 in M108) z vijakom M24 in drugi diagram za preostalih pet spojev (M109, M110, M111, M112 in M113) z vijakom M16. Krivulje na levem in desnem diagramu so neposredno primerljive po obliki. Razlika se pojavi v velikosti doseženih sil in pomikov. Logično je, da so spoji z večjim vijakom in z večjimi absolutnimi dolžinami e_1 in e_2 sposobni prevzeti večje sile in večje pomike. Razmerje velikosti sil (Preglednica 4) in velikosti pomikov za prvi in drugi diagram je enako razmerju med dimenzijami vijaka:

$$k = \frac{d(M24)}{d(M16)} = \frac{24 \text{ mm}}{16 \text{ mm}} = 1,5 \quad (18)$$

Preglednica 4: Razmerja maksimalnih doseženih sil na testih za vzorce z enakimi relativnimi geometrijami

	$\frac{F_{\max}(M104)}{F_{\max}(M109)}$	$\frac{F_{\max}(M105)}{F_{\max}(M110)}$	$\frac{F_{\max}(M106)}{F_{\max}(M111)}$	$\frac{F_{\max}(M107)}{F_{\max}(M112)}$	$\frac{F_{\max}(M108)}{F_{\max}(M113)}$
<i>k</i>	1,50	1,58	1,53	1,56	1,49

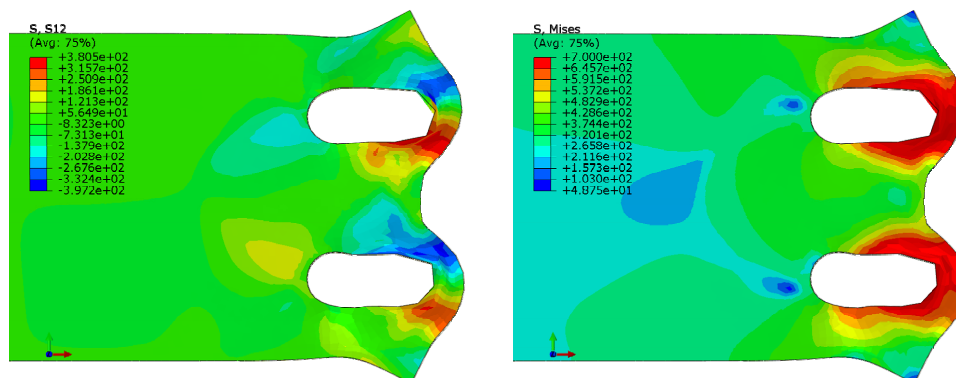
Vrednost razmerja variira okrog 1,5 predvsem zaradi netočnosti izdelave spojev in posledično netočnih geometrij. Svoj prispevek ima tudi triono napetostno stanje in razmerje med dimenzijo vijaka in premerom luknje vijaka, ki je različno v obeh primerih.

4.1.3 Tipične porušitve za spoje z dvema vijakoma

Strižna porušitev se je podobno, kot pri spojih z enim vijakom, pojavila samo pri vzorcu s kratko relativno razdaljo e_1/d_0 – vzorcu M205 (Slika 31 in Slika 32). Pretrg se je pojavil na notranji strani obeh vijakov. Tudi iz rezultatov numerične simulacije lahko razberemo, da se na notranji strani vijakov pojavijo približno 4% višje napetosti, kot na zunanji. Porušitev se na tem mestu pojavi zaradi sodelovanja obeh vijakov pri prenosu obremenitve.

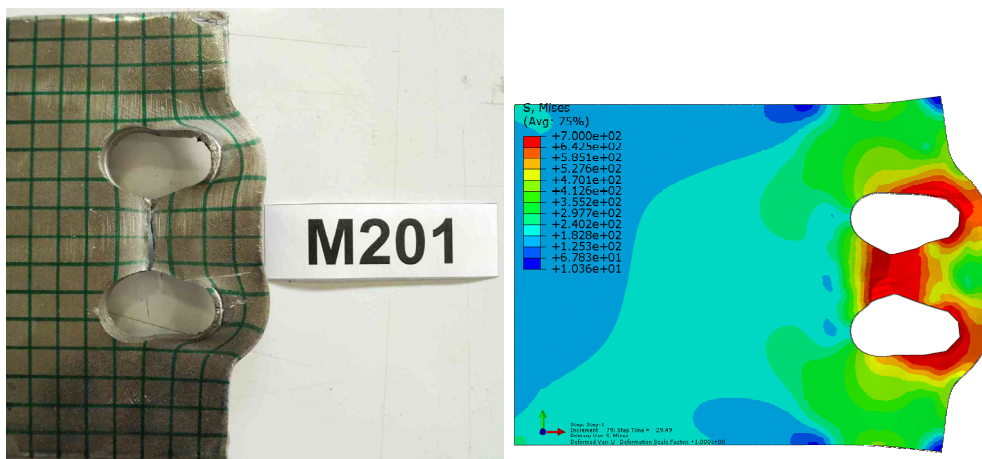


Slika 31: Deformiran vzorec M205. Strižni porušitvi se pojavita v območju pred vijakoma.

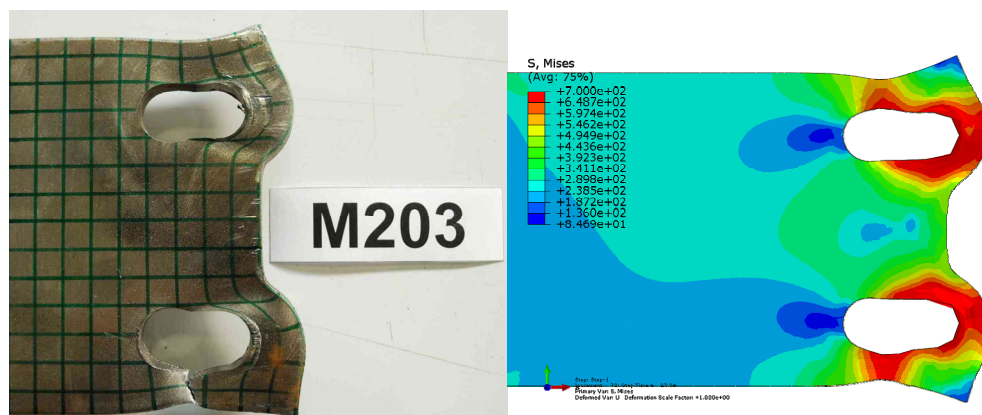


Slika 32: Deformiran vzorec M205. Območje maksimalnih doseženih strižnih napetosti S12 in Misesovih napetosti se sklada z mestom strižne porušitve spoja.

Strižni iztrg pločevine se je pojavil v spojih M201 in M203. Vendar sta obliki strižnih iztrgov za navedena primera različni. Pri vzorcu M201 (Slika 33) je nastala tipična porušitev s strižnim iztrgom pločevine. Med vijakoma se je vzorec porušil v nategu, pred vijakoma pa je sledila še porušitev v strigu. Iz širine razpoke med vijakoma je vidno, da je spoj ohranil del nosilnosti tudi po pretrgu pločevine med vijaki. Pri vzorcu M201 dosežemo 72,9 % nosilnosti v primerjavi z nosilnostjo doseženo pri vzorcu M202, ki ima daljšo razdaljo e_2 in se delno poruši v oslabiljenem prerezu.



Slika 33: Deformiran vzorec M201. Območje maksimalnih doseženih Misesovih napetosti S se sklada z mesti porušnih linij strižnega iztrga.

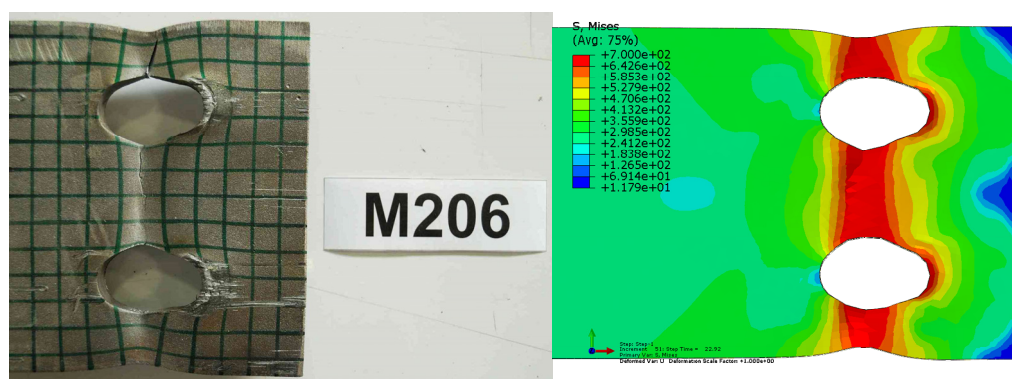


Slika 34: Deformiran vzorec M203. Območje maksimalnih doseženih Misesovih napetosti S se sklada z mesti porušnih linij strižnega iztrga.

Pri vzorcu M203 (Slika 34) sta se strižno iztrgala dva dela pločevine – vogala vzorca. Iztrg robnega vijaka v smislu strižnega iztrga v SIST EN 1993-1-8 ni eksplicitno podan. Na razdalji e_2 na obeh straneh vzorca se je del prereza porušil v nategu. Drugi del prereza se je strižno porušil na obeh razdaljah e_1 pred vijakoma. Pri vzorcu M203 dosežemo 76,5 % nosilnosti v primerjavi z nosilnostjo doseženo pri vzorcu M204, ki ima daljšo razdaljo e_2 in se delno poruši v oslabiljenem prerezu.

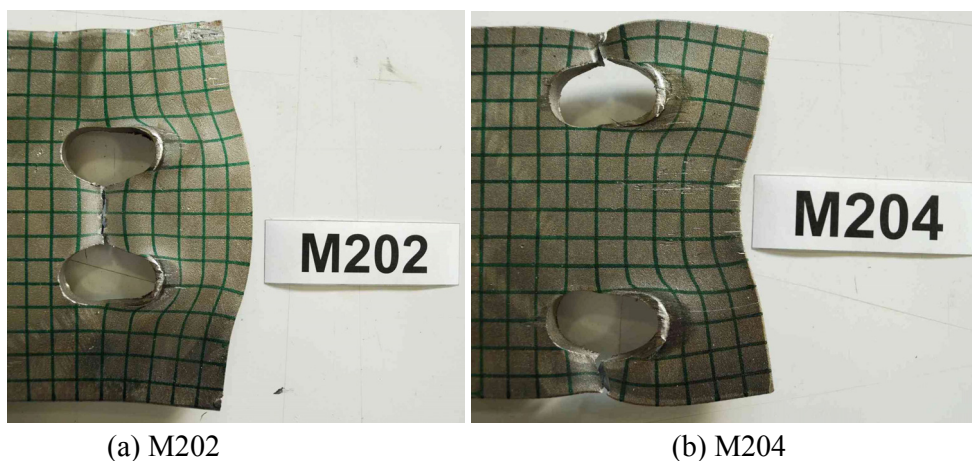
Pri tem vzorcu je nastalo različno sosledje porušitev pri obeh vijakih. Na sliki (Slika 34) se je zgornji del prereza najprej porušil v strigu pred vijakom in potem še v nategu. Spodnji del prereza pa najprej v nategu in potem v strigu pred vijakom. Razlog za to odstopanje je bila nenatančna izdelava vzorca (Priloga A - Tabela z nazivnimi in dejanskimi geometrijami spojev).

Spoj M206 se je porušil v oslabiljenem prerezu v nategu (Slika 35 in Slika 36), zaradi velike relativne razdalje e_1/d_0 v primerjavi s širino pločevine. Nosilnost spoja je bila dobro ocenjena s formulo za izračun nosilnosti v oslabiljenem prerezu v nategu (Enačba (1)), ki je bila tudi merodajna kontrola. Na območju pretrga se je tipično za to porušitev pojavila velika kontrakcija prereza z velikimi deformacijami. Elongacija luknenj je bila pri tej porušitvi majhna v primerjavi z drugimi porušitvami.

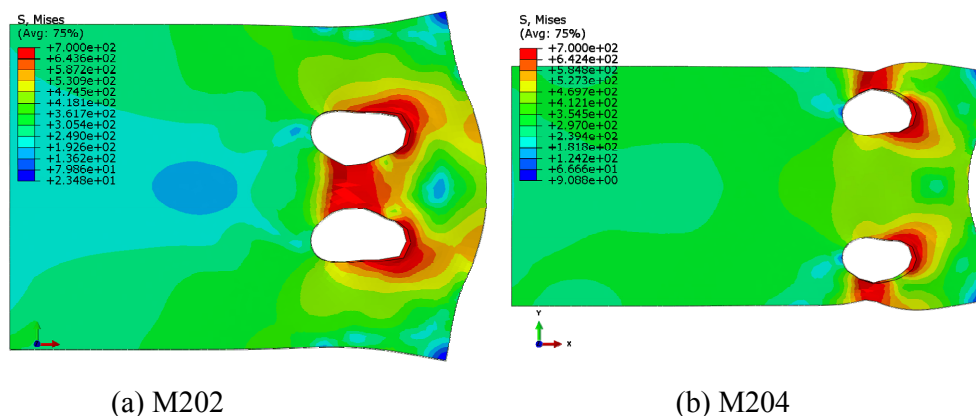


Slika 35: Deformiran vzorec M206. Vzorec se nesimetrično poruši v celem oslabiljenem prerezu. Območje maksimalnih doseženih Misesovih napetosti S se sklada z porušitvijo spoja v celem oslabiljenem prerezu.

Delna porušitev oslabiljenega prereza je nastala pri vzorcih M202 in M204 (Slika 36 in Slika 37). Pri obeh vzorcih je bilo razmerje $e_1/d_0 = 2,5$. Razlika med vzorcema je bila v razmerju dolžin prečno na smer obremenjevanja e_2/d_0 in p_2/d_0 . Oba vzorca sta se porušila na delu prereza. Ohranil pa se je del nosilnosti v strigu, ki se je prenašal preko neporušenega dela prereza.



Slika 36: Deformirana vzorca M202 in M204. Vzorca sta delno porušena v oslabljenem prerezu.

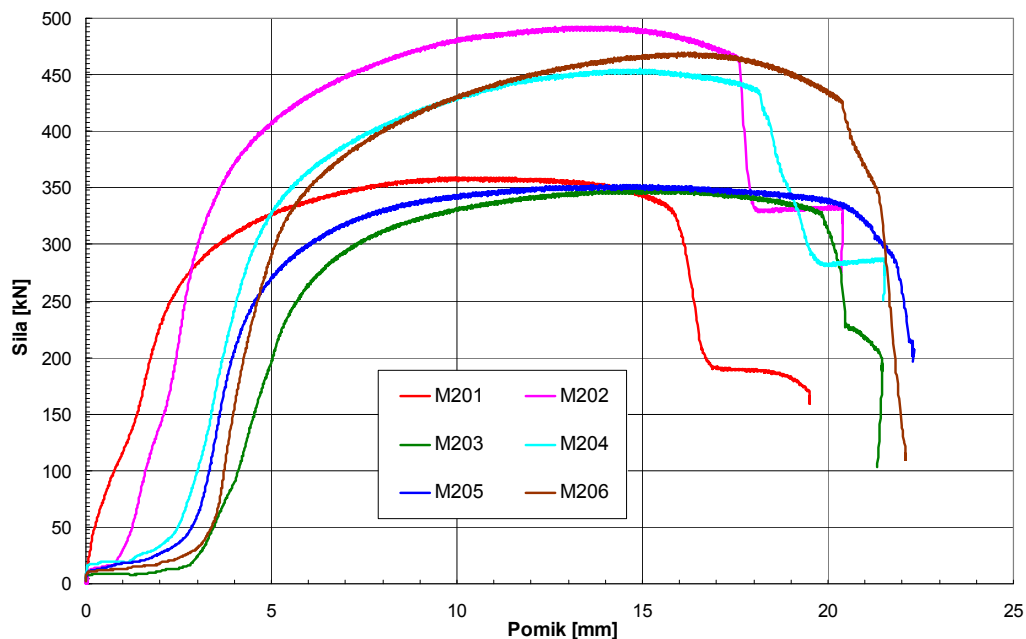


Slika 37: Deformirana vzorca M202 in M204. Območje maksimalnih doseženih Misesovih napetosti S se sklada z mestoma porušitve spojev v oslabljenem prerezu.

4.1.4 Diagrami sila – pomik za spoje z dvema vijakoma

Na diagramu sila – pomik (Slika 38) so prikazane krivulje za vse spoje z dvema vijakoma. Za vsak način porušitve dobimo tipično obliko diagrama.

Pri vseh vzorcih razen M201, se je na začetnem delu diagrama pojavil raven plato pomikov pri majhnih silah. Vse sile so bile manjše od 25 kN. Ta raven plato lahko pripišem zamiku plošč vzorca in vilic in nenaleganju vijaka na stične površine. Največji možni zamik plošč bi lahko znašal 4 mm. Za luknjo na vzorcu 2 mm in za luknjo na vilicah 2 mm. Vsi začetni zdrsi in naleganja vijakov so torej manjši od 4 mm. Na primer: pri vzorcu M203 je prehod iz začetnega zdrsa v elastični del krivulje postopen in se zgodi na področju pomika od 2 do 3 mm. Ta postopen prehod je mogoče pripisati nenatančni izdelavi vzorcev in različnima razdaljama p_2 med vzorcem in togimi vilicami.

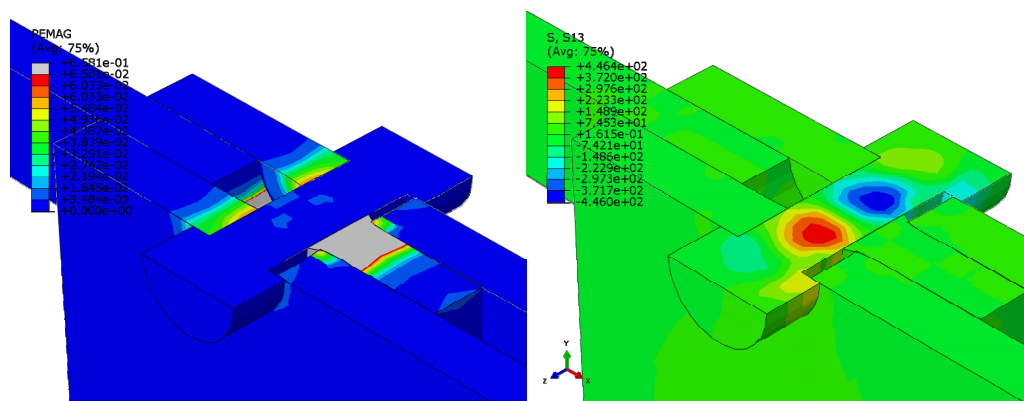


Slika 38: Diagrama sila – pomik za vse spoje z dvema vijakoma.

Na diagramu je za spoje M201, M202, M203 in M204 prikazana nosilnosti, ki se ohrani tudi po delni porušitvi prereza preko dela prereza ohranjajo tudi po porušitvi. Opisi porušitev so podani v prejšnjem poglavju o tipičnih načinih porušitev (glej poglavje 4.1.4).

4.1.5 Napetosti v vijakih

Z numeričnimi simulacijami sem ocenil tudi napetosti, ki so se pojavile v vijakih. Največje napetosti so se pojavile pri spoju M113 v vijaku dimenzije M16. Vijak se je kljub plastifikaciji minimalno deformiral. Plastične deformacije niso dosegle 1 %.



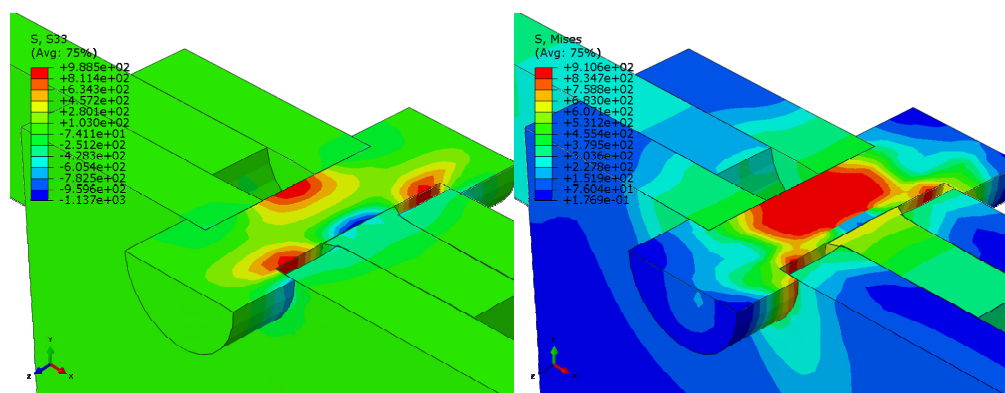
Slika 39: Prereza skozi spoj M113. Območje maksimalnih strižnih napetosti S13 na najbolj obremenjenem mestu v vijaku M16 se pojavi na predvidenem mestu, v strižnih ravninah med ploščo vzorca in ploščama vilic.

V vijaku sta se poleg strižnih napetosti (Slika 39) pojavila še natezna in tlačna napetost (Slika 40) zaradi upogiba vijaka.

Strižne napetosti v vijaku so se pojavile na predvidenih mestih v strižnih ravninah med ploščo vzorca in ploščama vilic. Strižne napetosti so bile v območju elastičnih napetosti materiala in so bile v skladu s projektnimi vrednostmi, izračunanimi v skladu s standardom.

V vijakih nisem pričakoval plastifikacije, tako da ima upogib in razrivanje plošč na napetosti v vijaku občuten vpliv. Glede na projektirano nosilnost vzorca $F_{\min} = 164,6$ kN po SIST EN 1993-1-8 in izmerjeno nosilnostjo na testu $F_{\max} = 187,6$ kN bi vijaki morali ostati v elastičnem območju. Nosilnost vijaka $F_{v,k,dej} = 241$ kN je bila izračunana v skladu s SIST EN 1993-1-8.

Vijaki so bili dimenzionirani brez upoštevanja varnostnega faktorja γ_{M2} , vendar je bilo kontrolirano razmerje med nosilnostjo vzorca in nosilnostjo vijakov po SIST EN 1993-1-8. Zaradi neugodnega prostorskega napetostnega stanja se je vijak plastificiral, kar v pripravi laboratorijskih testov ni bilo predvideno.

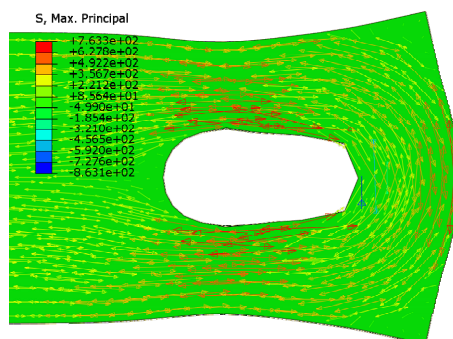


Slika 40: Prereza skozi spoj M113. Območje maksimalnih doseženih Misesovih napetosti S, Mises in osnih napetosti S33 in v vijaku M16.

4.1.6 Napetostna polja v pločevinah

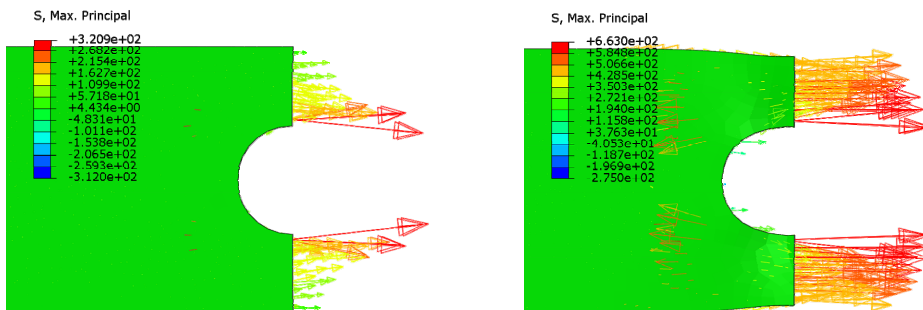
Za vsak tip porušitve se je v vzorcih pojavilo različno napetostno stanje. Programski komplet Abaqus/CAE vsebuje opcijo izrisa glavnih napetosti. Ta opcija omogoča vektorski prikaz komponent tenzorja glavnih napetosti. Vsi prikazi z izrisom komponent tenzorja glavnih napetosti so izrisani pri največji nosilnosti spojev.

Napetostno polje v oslabilnem prerezu za spoje z enim vijakom:



Slika 41: Deformiran vzorec M112. Velike glavne napetosti so prikazane na prerezu v ravnini, ki je definirana z Z osjo.

Vzorec M112 (Slika 41) je na meji med porušitvijo v strigu in porušitvijo v oslabilnem prerezu, zato so se napetosti zelo enakomerno pojavile na obeh kritičnih delih prereza. V tem prerezu je lepo vidno napetostno stanje silnic, ki se formirajo v obliki loka.



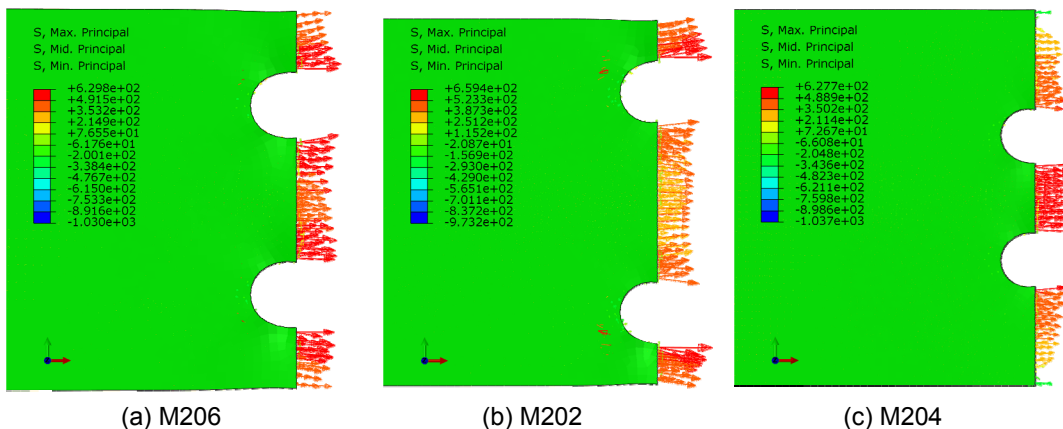
(a) pri 31,8 % največje nosilnosti

(b) pri največji nosilnosti

Slika 42: Deformiran vzorec M103. Velike glavne napetosti so prikazane na prerezu v ravnini, ki je definirana z X osjo.

Vzorec M103 se je porušil v oslabiljenem prerezu. Zanimiva je primerjava razporeda tenzorjev glavnih napetosti za elastične in plastične napetosti. V obeh primerih prevladujejo natezne napetosti na odseku e_2 od roba vijaka proti robu vzporednemu smeri obtežbe. Na prikazu razporeditve tenzorja elastičnih napetosti (Slika 42(a)) so vidne velike konice napetosti. Medtem ko se je pri največji nosilnosti spoja v plastificiranemu prerezu ustvarilo bolj enakomerno polje nateznih napetosti (Slika 42(b)).

Napetostno polje v oslabiljenem prerezu za spoje z dvema vijakoma:



(a) M206

(b) M202

(c) M204

Slika 43: Deformirani vzorca M206, M202 in M204. Porušne linije sledijo poteku polj glavnih napetosti.

Porušitev v oslabiljenem prerezu je idealna za prikaz napetostnih polj, ki se pojavijo v spojih z dvema vijakoma. Vzorec M206, ki se je porušil v celem oslabiljenem prerezu sočasno ni imel bolj izrazitih napetostnih polj na različnih delih oslabiljenega prereza. Prenos napetosti je bil enakomeren po celem oslabiljenem prerezu. Enakomernost raznosa napetostnih polj mu zagotavlja razmerje $p_2/e_2 = 2$. Enakomernost nepetostnih polj povečuje nosilnost spoja glede na površino oslabiljenega prereza. V spoju M206 je bila povprečna napetost v prerezu:

$$f = \frac{F_{\max}}{A_{\text{net}}} = \frac{496,3 \text{ kN}}{10,6 \text{ cm}^2} = 444,0 \text{ MPa} \quad (19)$$

Za preostala dva spoja, ki sta se delno porušila v oslabiljenem prerezu, pa je bilo razmerje sledeče:

$$f(\text{M202}) = 354,7 \text{ MPa}$$

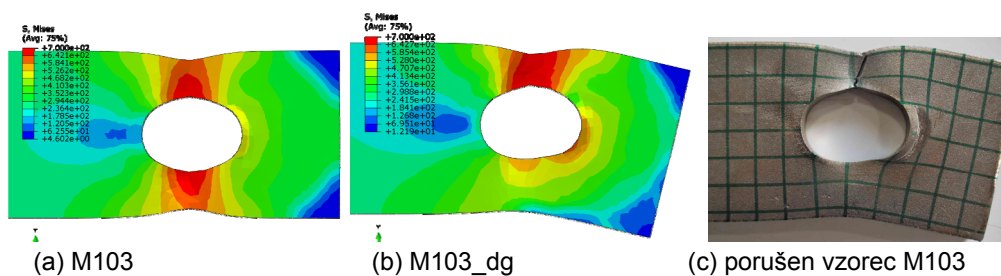
$$f(\text{M204}) = 417,2 \text{ MPa}$$

Napetost f ne predstavlja trdnosti materiala ampak povprečno vrednost napetosti po celem oslabiljenem prerezu. V primeru spoja M206 je to razmerje celo višje, kot je trdnost materiala ($f_u = 425 \text{ MPa}$). Povprečne napetosti so v spoju M206 višje od trdnosti materiala zaradi:

- različnega razporeda napetosti, ki se lahko pojavi pri ploščatih elementih v primerjavi z epruveto iz SNP-ja,
- možnosti odstopanja mehanskih karakteristik materiala, ki se spreminjajo po plošči,
- zaradi napake merilnih inštrumentov.

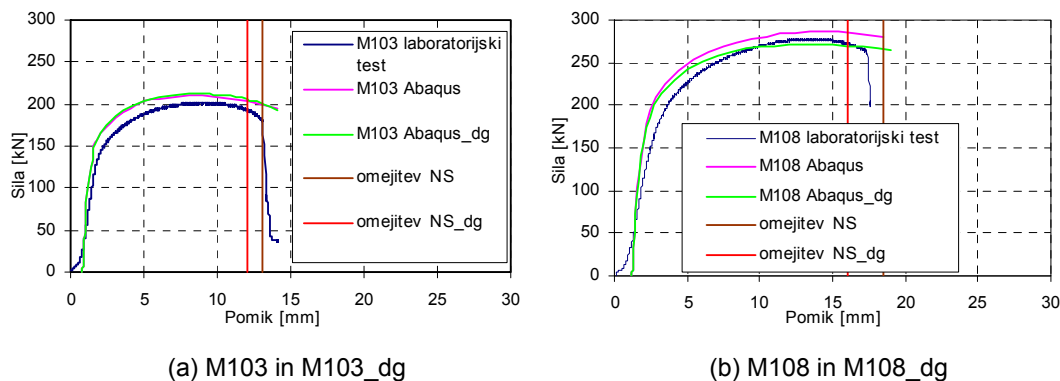
4.1.7 Dejanske geometrije spojev

V numeričnih analizah sem upošteval nazivne geometrije spojev. Le pri spojih M103 in M108 sem upošteval dejanski geometriji spojev. Ugotovil sem, da lahko imajo odstopanja med dejansko in nazivno geometrijo vpliv na nosilnost spoja. V primeru različne razdalje e_1 za spoj M101 bi lahko ocenil razliko, ki bi se morala pojaviti med numeričnim modelom in laboratorijskim testom. Debelina vzorca, upoštevanega v numerični simulaciji, je bila 12 mm. Dejanska debelina vzorca, testiranega v laboratoriju, pa je znašala 11,8 do 11,9 mm. Iz razlike debelin plošče vzorca lahko sklepam o razliki sile na vpetju za 1,3 %. Ob upoštevanju razlike med dejansko razdaljo $e_1 - d_0/2 = 18,00 \text{ mm}$ in nazivno uporabljeno v numerični simulaciji, ki je znašala 19,00 mm, lahko sklepam o napaki v velikosti 5,6 %. Neugoden vpliv na nosilnost imata tudi različni razdalji e_2 na vzorcu. Zaradi razlike med $e_{2,1}$ (od luknje proti vrhnjem robu) in med $e_{2,2}$ (od luknje proti spodnjem robu) se pojavijo večje napetosti na razdalji e_2 z manjšo razdaljo. S tem pa se zmanjša tudi nosilnost.



Slika 44: Prikaz napetosti na deformiranem vzorcu M103 in M103_dg ter oblika porušitve za porušen testni vzorec.

Spoja M103 in M108 (Slika 44) sem numerično simuliral tudi v dejanskih geometrijah spojev (Preglednica 5) in jih primerjal s simulacijama spojev z nazivnima geometrijama (Slika 45). Nosilnosti izračunane z obema numeričnima simulacijama so v tabeli (Preglednica 6) in so se razlikovale za 5,2 % pri numeričnih simulacijah M108 in M108_dg. Pri simulacijah M103 in M103_dg pa za manj kot 1 %.



Slika 45: Diagrama sila – pomik za spoja M108 in M103 za primerjavo modelov z nazivnimi in dejanskimi geometrijami

Pri primerih numeričnih simulacij z dejanskimi geometrijami so nosilnosti spojev v razmerju za maksimalno silo v spoju izračunano z numerično simulacijo deljeno z z maksimalno silo izmerjeno na testu:

- 1,05 za spoj M103.
- 0,97 za spoj M108.

Različen je bil tudi pomik pri maksimalni sili, ki je bil pri spojih z dejansko geometrijo manjši. Pri spoju M108 je tako pomik pri maksimalni doseženi sili 14,4 mm pri spoju M108_dg pa le 13,1 mm. Zaradi ekscentričnosti prenosa obremenitve je tudi pretrg nastal samo na eni strani vzorca (Slika 44).

Preglednica 5: Primerjava nazivnih in dejanskih geometrij za vzorca M103_dg in M108_dg

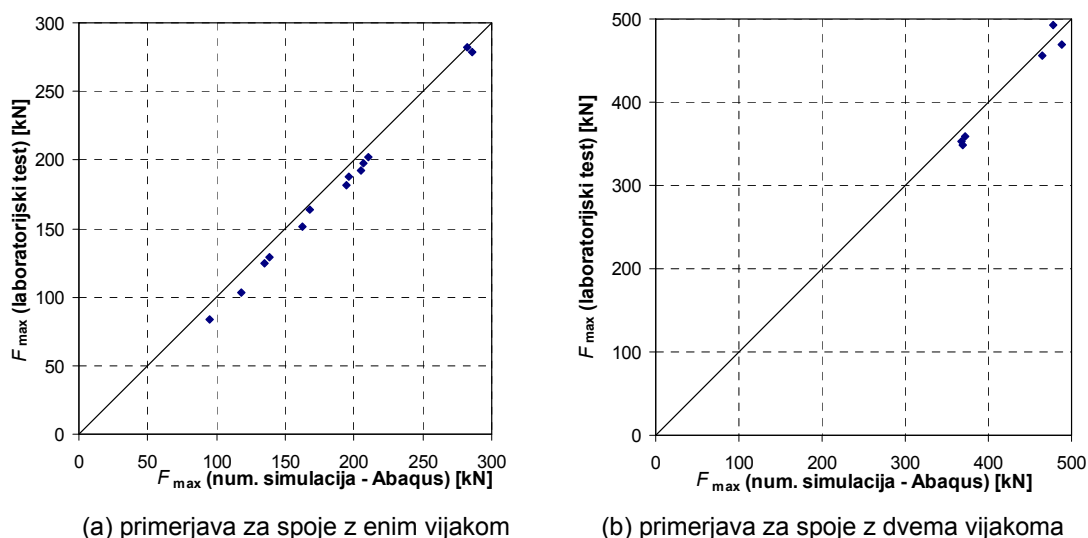
Vzorec	Nazivne mere			Dejanske mere			
	$e_1 - d_0/2$	$e_2 - d_0/2$	b	$e_1 - d_0/2$	$e_{2.1} - d_0/2$	$e_{2.2} - d_0/2$	b
M103_dg	39,00	19,00	64,0	37,9	18,3	21,2	65,1
M108_dg	52,00	26,00	78,0	51,2	24,5	27,9	78,5

Preglednica 6: Sile na vpetju za numerični simulaciji z nazivnimi in dejanskimi geometrijami za spoja M103_dg in M108_dg

Vzorec	Nazivne mere		Dejanske mere		Laboratorijski test
	F_{max} [kN]	Du [mm]	F_{max} [kN]	Du [mm]	F_{max} [kN]
M103_dg	210,1	9,0	212,1	9,0	202,2
M108_dg	286,2	14,4	272,0	13,1	279,0

Primerjava nosilnosti izračunanih z numeričnimi analizami in nosilnosti izmerjenimi na laboratorijskem testu je podana na diagramu (Slika 46). Vsi rezultati numeričnih analiz so izračunani z upoštevanjem nazivnih geometrij. Od tu izhaja razlika v rezultatih. Večina rezultatov izračunanih z nazivnimi geometrijami je na nevarni strani to je na spodnji strani simetrale. To je v večini primerov posledica razlik med dejanskimi in nazivnimi geometrijami (Priloga A - Tabela z nazivnimi in dejanskimi geometrijami spojev).

Vse maksimalne sile izračunane z numeričnimi simulacijami (razen za spoja M109 in M110) so v območju med 90,0 % in 110,0 % v primerjavi z silami doseženimi na laboratorijskih testih.



(a) primerjava za spoje z enim vijakom

(b) primerjava za spoje z dvema vijakoma

Slika 46: Primerjava nosilnosti izračunanih z numeričnimi analizami in nosilnostmi izmerjenimi na laboratorijskem testu.

Za spoja M109 in M110 pa lahko v prilogi (Priloga A - Tabela z nazivnimi in dejanskimi geometrijami spojev) vidim, da je razlika v nazivni in dejanski razdalji e_1 večja, kot pri ostalih spojih. Zato so tudi nosilnosti v razmerju za maksimalno silo v spoju izračunano z numerično simulacijo deljeno z maksimalno silo izmerjeno na testu:

- 1,14 za spoj M109.
- 1,14 za spoj M110.

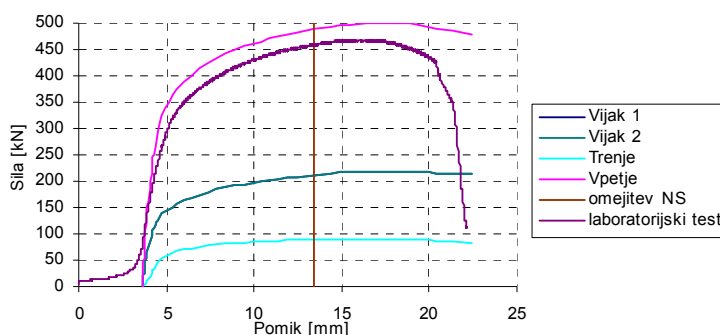
Nazivne in dejanske geometrije za vse vzorce so podane v prilogi A. Diagrami sila – pomik so izrisani v prilogi C.

4.1.8 Vpliv trenja

Nosilnost spojev je v glavnem določena z nosilnostjo pločevine v okolici luknje vijaka. Dodaten vpliv na nosilnost pa predstavlja trenje, ki se pojavi v stičnih ploskvah vzorca (Slika 48, Slika 49 in Slika 50) in vilic. Trenje je odvisno od normalnih napetosti, ki se pojavijo v stičnih ploskvah vzorca in vilic. Vzorec se na mestu naleganja vijaka razširi in razriva vilici (Slika 48 in Slika 49). Predpostavljen koeficient trenja (Vasarhelyi, DD. et al., 1967) znaša:

$$c = 0,25$$

Faktor trenja je v programu podan kot delež normalnih napetosti, zato moram kontaktu v tangencialni smeri koeficient trenja. Primer odvisnosti sile trenja od pomika v primerjavi z nosilnostjo spoja je podan za primer M206 (Slika 47), kjer se tudi pojavi največji delež nosilnosti s trenjem.



Slika 47: Diagrama sila – pomik za spoj M206 za prikaz sil, ki se prenašajo preko z vijakom 1, vijakom 2 in s trenjem. Za primerjavo je izrisan tudi diagram sil na vpetju za numerično simulacijo in laboratorijski test.

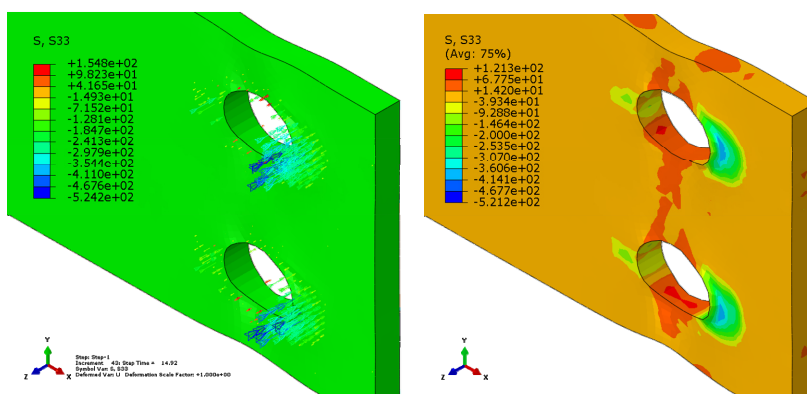


Slika 48: Na vzorcu spoja M206 je viden del prereza pred naleganjem vijaka, kjer pride do tlačnih napetosti v Z smeri in posledično do kontakta s trenjem.



Slika 49: Na vzorcu spoja M204 je lepo viden del prereza pred naleganjem vijaka, kjer pride do razširitve prereza.

Za spoje z enim vijakom trenja nisem posebej izpostavljajal, ker je bil delež nosilnosti s trenjem za velikostni razred 2 – 3 krat manjši v primerjavi z deležem nosilnosti pri spojih z dvema vijakoma. Pri spojih z dvema vijakoma se pločevina vzorca v delu prereza pred vijakom zaradi velikih tlačnih napetosti v X in Y smeri deformira in razširi v Z smeri. Razširjanje krakov vilic, zaradi te deformacije preprečujeta vijaka, ki sta natezno obremenjena. Zato se v kontaktu med vilicami in vzorcem pojavi tlačna napetost. Tlačna napetost pa aktivira prenos sil s trenjem. Največji delež nosilnosti s trenjem se pojavi v spoju M206 in znaša 18,15% celotne nosilnosti spoja.



Slika 50: Na vzorcu spoja M206 je v numeričnem modelu vidno območje pred naleganjem vijaka, kjer nastanejo tlačne napetosti v Z smeri (S33) ki povzročijo trenje.

4.2 Primerjave rezultatov

Primerjave rezultatov so podane v obliki diagramov. Nosilnosti izračunane z računskimi metodami primerjam z nosilnostmi izmerjenimi v testih. Za izračun nosilnosti tako po SIST EN 1993-1-8 in po novi formuli (Može, Beg, 2010) uporabim dejanske geometrije (Priloga A - Tabela z nazivnimi in dejanskimi geometrijami spojev).

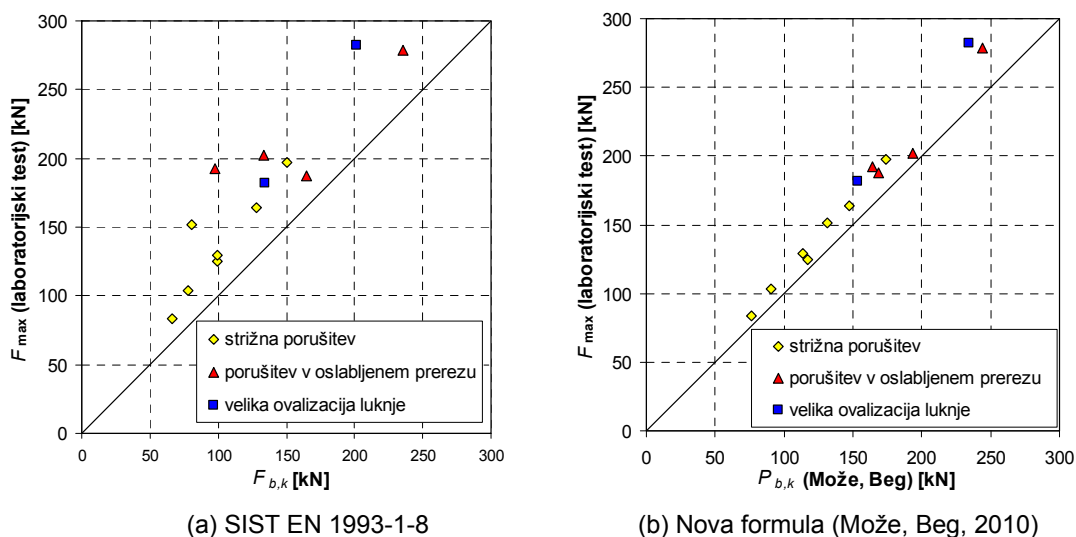
Na abscisi so nanešene teoretične vrednosti, na ordinati pa eksperimentalno določene vrednosti. Točke, ki ležijo nad simetralo so na varni strani. To pomeni, da so nosilnosti izračunane z računsko metodo, manjše od izmerjene nosilnosti spoja. Oddaljenost od

simetrale pa predstavlja ujemanje rezultatov računskih metod z izmerjenimi vrednostmi. Točke ki ležijo pod simetralo, pa so na nevarni strani. Takih rezultatov poenostaljenih računskih metod v primeru nosilnosti spoja ne zabeležim.

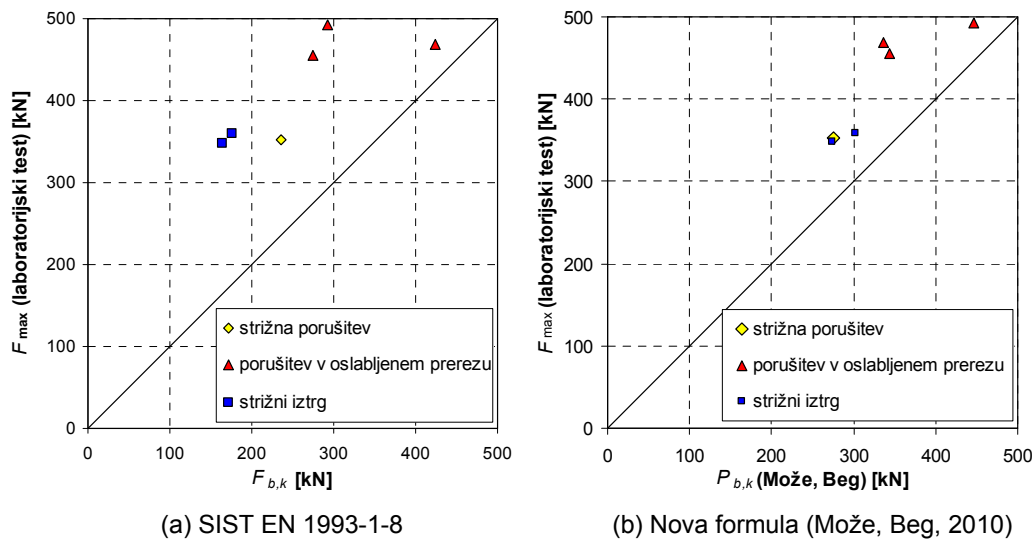
Za spoje z enim vijakom sem določil zvezo med normirano silo f_{norm} in relativno razdaljo e_1/d_0 (Slika 53). Normirano silo definiram kot:

$$f_{norm} = \frac{F_{max}(laboratorijski\ test)}{P_{b,k}(računske\ kontrole)} \quad (20)$$

Rezultati izračunani po SIST EN 1993-1-8 imajo veliko odstopanje od simetrale. To je vidno za spoje z enim vijakom (Slika 51 (a)), kot tudi za spoje z dvema vijakoma (Slika 52 (a)). Za račun po SIST EN 1993-1-8 se izkaže, da rezultati za nosilnost v primeru spoja M201 odstopajo od izmerjene vrednosti za faktor (enačba 20 in Slika 52 (a)) 2,13. Vse nosilnosti izračunane s to metodo so na varni strani in sicer najmanj za faktor 1,14. Nova formula, ki sta jo razvila Može in Beg, pa precej bolje izračuna dejanske nosilnosti spoja za spoje z enim in dvema vijakoma (Slika 51 (b) in Slika 52 (b)). Rezultati odstopajo od izmerjene vrednosti maksimalno za faktor 1,40 in minimalno 1,06.



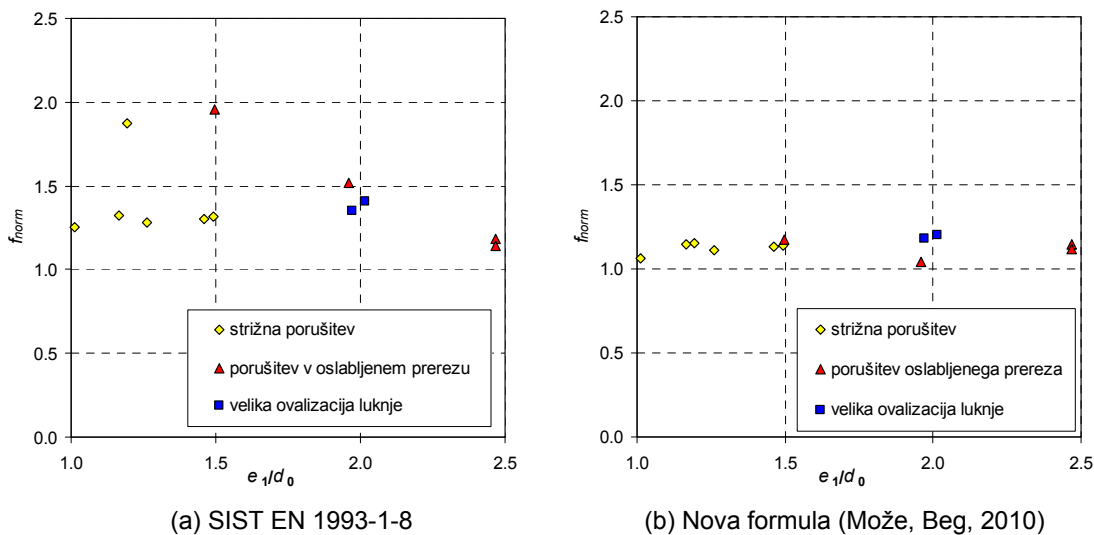
Slika 51: Diagrama za nosilnost na bočni pritisk v primerjavi z rezultati laboratorijskih testov za vse spoje z enim vijakom.



Slika 52: Diagrama za nosilnost na bočni pritisk v primerjavi z rezultati laboratorijskih testov za vse spoje z dvema vijakoma

Formula SIST EN 1993-1-8 za izračun nosilnosti na bočne pritiske še posebej slabo oceni nosilnosti (Slika 53) za spoje z enim vijakom, ki imajo kratko relativno razdaljo e_1/d_0 med 1,0 in 1,5.

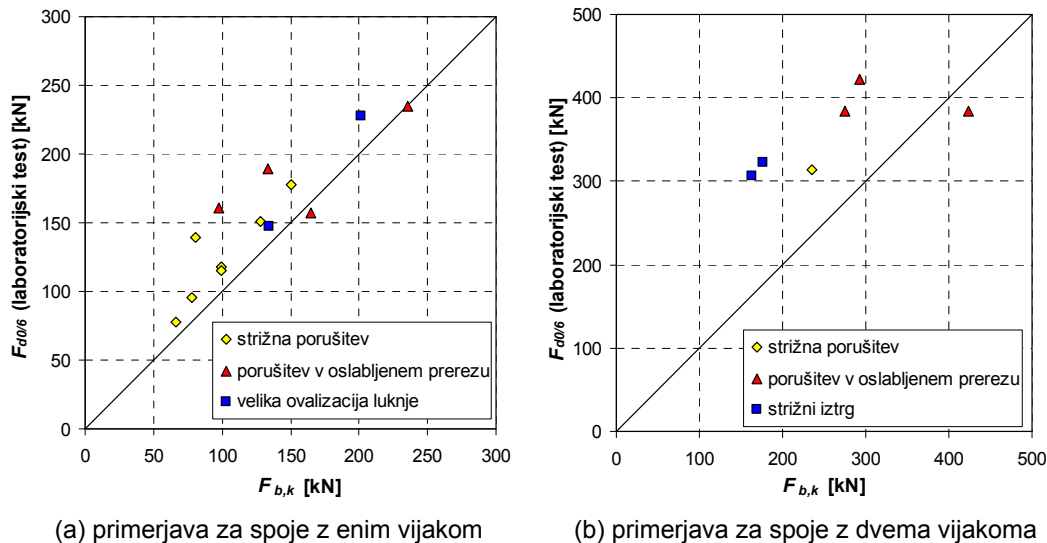
Tudi iz te primerjave je razvidno da je izračun z novo formulo (Može, Beg, 2010) bolje ocenil dejanske nosilnosti spojev, kot SIST EN 1993-1-8.



Slika 53: Nosilnost normirana z laboratorijsko vrednostjo nosilnosti v povezavi z robno razdaljo e_1/d_0 .

Po definiciji naj bi formula za izračun $F_{b,k}$ iz SIST EN 1993-1-8 omejila elongacijo luknje. Vrednost elongacije v standardu ni definirana. Iz literature (Može, Beg, 2010) ugotovim da je primerna omejitev za elongacijo luknje $d_0/6$.

Primerjava pri elongaciji luknje $d_0/6$ je narejena z vrednostjo sile izmerjene na laboratorijskem testu.



Slika 54: Diagrama primerjave sile dosežene pri pomiku $d_0/6$ oziroma merodajne projektirane sile za SIST EN 1993-1-8 v primerjavi z rezultati laboratorijskih testov pri pomiku $d_0/6$.

Formula SIST EN 1993-1-8 za nosilnost na bočne pritiske naj bi omejevala deformacije pri spojih, kjer se pojavi porušitev z veliko ovalizacijo luknje. Na diagramu (Slika 51) je podana primerjava porušitev za spoje z enim vijakom. Za tipične porušitve glej poglavje 4.1.1. V primeru velike ovalizacije luknje formula za nosilnost na bočne pritiske res vrne manjše nosilnosti od dejanskih. Vendar so zaradi te omejitve po SIST EN 1993-1-8 omejene tudi nosilnosti spojev, kjer sicer ne pride do velike ovalizacije luknje. To je za porušitvi v strigu in v oslajljenem prerezu.

Za spoje z enim vijakom je smislen prikaz normiranega bočnega pritiska F_{pr} v odvisnosti od relativne razdalje e_1/d_0 (Slika 55), ki je definirana kot:

$$F_{pr} = \frac{F_{max}}{d t f_u} \quad (21)$$

kjer so :

F_{max} – maksimalna dosežena sila v vpetju na laboratorijskem testu

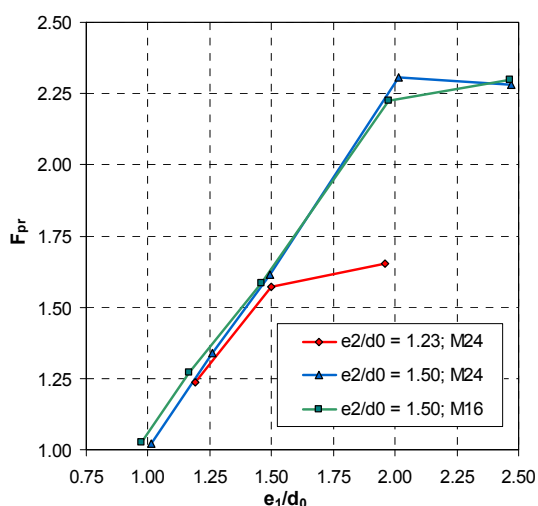
d – dimenzija vijaka

t – debelina pločevine

f_u – natezna trdnost materiala

Normirano vrednost je smiselno uvesti zaradi neposredne primerljivosti rezultatov za različne dimenzije vijakov, debeline in natezne trdnosti pločevine. Torej lahko neposredno primerjam odvisnost ene same spremenljivke – relativne razdalje luknje vijaka od sprednjega roba vzorca - e_1/d_0 .

Normirana vrednost sile se povečuje od minimalne relativne robne razdalje ($e_1/d_0(M104) = 1,01$ in $e_1/d_0(M109) = 0,97$) in znaša $F_{pr}(M104) = 1,02$ in $F_{pr}(M109) = 1,02$, do maksimalne relativne robne razdalje ($e_1/d_0(M108) = 2,47$ in $e_1/d_0(M113) = 2,47$), kjer pri znaša $F_{pr}(M108) = 2,28$ in $F_{pr}(M113) = 2,30$. Vzorca M107 in M108 ter M112 in M113 imata kljub različnim relativnim razdaljam in različnim načinom porušitve zelo podobne nosilnosti. Več o tem je napisano v poglavju 4.1.1 – Porušitev z veliko ovalizacijo luknje.



Slika 55: Diagram nosilnosti za tri serije vzorcev z različnimi robnimi razdaljami e_2 , za spoje z enim vijakom.

5 Zaključek

V diplomski nalogi sem na podlagi laboratorijskih testov in numeričnih simulacij ovrednotil nosilnosti preklonih vijachenih spojev iz mehkih konstrukcijskih jekel.

Vsi laboratorijski testi so bili uspešni. Zabeležil sem različne porušitve za različne geometrije spojev. Pri spojih z enim vijakom sem zabeležil porušitve v strigu, v oslavljenem prerezu in porušitvi z veliko ovalizacijo luknje. Pri spojih z dvema vijakoma sem zabeležil še porušitev s strižnim iztrgom. Za različne tipe porušitev sem izmeril različne pomike. Najbolj je izstopala porušitev z veliko ovalizacijo luknje, kjer so se pojavili največji pomiki in največje sile v spoju. Pri strižnih porušitvah sem sicer dosegal velike pomike, vendar pri manjših silah. Pri porušitvah v oslavljenem prerezu pa so se pojavile največje sile, vendar so bili pomiki manjši. Numerične simulacije s programom Abaqus so bile prav tako uspešne. S programom sem za vse spoje izračunal zveze sila – pomik (Priloga C). Razlika med rezultati, izračunanimi s programom in vrednosti izmerjenimi na testih odstopajo za določeno vrednost. Odstopanja so v veliki meri povezana z upoštevanjem nazivnih geometrij v numeričnih modelih (glej poglavje 4.1.7). Prav tako rezultati niso zadovoljivi v območju velikih plastičnih deformacij ($\epsilon_{dej} > 60\%$).

Izračun nosilnosti spojev na bočni pritisk $F_{b,k}$ po SIST EN 1993-1-8 dobro oceni nosilnosti spojev pri elongaciji luknje za $d_0/6$. V primeru nosilnosti pri ovalizaciji luknje za $d_0/6$ so rezultati v treh primerih spojev na nevarni strani. Spoji M108, M113 in M206 se porušijo v oslavljenem prerezu. Za spoj M206 je merodajna kontrola nosilnosti v oslavljenem prerezu, kar pa ne velja za spoja M108 in M113. Formulacija v standardu za maksimalno nosilnost spoja sicer oceni manjšo vrednost od dejanske in je na varni strani, ampak je v primerih M101 in M102 zelo konzervativna.

Nosilnosti spojev precej bolje oceni nova formula (Može, Beg, 2010). Rezultati so v primerjavi z nosilnostjo na bočni pritisk $F_{b,k}$ po SIST EN 1993-1-8 precej bližje dejanskim nosilnostim spojev z bistveno manjšo variacijo rezultatov.

Predmet diplomske naloge je bila raziskava nosilnosti na bočni pritisk dvostržnih preklonih vijachenih spojev. Zanimiva primerjava bi bila z enostržnimi spoji v katerih se razvijejo drugačni porušni mehanizmi. Predvsem bi bilo zanimivo spremljati odziv enostržnih spojev z enakimi geometrijami, kot pri dvostržnih spojih.

Posebej bi izpostavil probleme, ki se lahko pojavijo pri konstrukcijah, pri katerih izračun s SIST EN 1993-1-8 konzervativno oceni maksimalno nosilnost spoja. Konstrukcije niso projektirane optimalno. Glede na to, da so pločevine sposobne prenesti precej večje sile (tudi za faktor 2,13), kot sile za katere so bile projektirane, bi lahko pri preobremenitvi nastale neduktilne porušitve po vijakih.

6 Viri

Aalberg, A., Larsen, P.K. 2002. The effect of steel strength and ductility on bearing failure of bolted connections. V: A. Lamas, L. S. Sd. Silva, (eds.). The Third European Conference on Steel Structures: Proceedings of the 3rd European conference on steel structures. Coimbra, Universidade de Coimbra: str. 869-878.

Aalberg, A., Larsen, P. K. 1999. Strength and ductility of bolted connections in normal and high strength steels. V: Norwegian University of Science and Technology.

Aalberg, A., Larsen, P. K. 2002. The effect of steel strength and ductility on bearing failure of bolted connections. Eurosteel Coimbra 2002: 869-878

Citipitioglu, A.M., Haj-Ali, R.M., White, D.W. 2002. Refined 3D finite element modeling of partially-restrained connections including slip. Journal of Constructional Steel Research 58: 995-1013.

EUROCODE 3. 1989. Design of steel structures – Part 1-1 – General Rules and Rules for Buildings. Background documentation – Chapter 6 – Document 6.01, Issued to Liaison Engineers, March.

EUROCODE 3. 2005. Design of steel structures – Part 1-8 – Design of joints. SIST EN 1993-1-8.

EUROPEAN STANDARD. 2002. Metallic materials – Tensile testing – Part 1: Method of test at ambient temperature. SIST EN 10002-1:2002.

Gresnigt, A. M., Steenhuis, C. M. 1997. High strength steels. Progress in Structural Engineering and Materials 1, 1: 31-41.

Hyeong, J. Kin, Joseph, A. Yura. 1999. The effect of ultimate-to-yield ratio on the bearing strength of bolted connections. Journal of Constructional Steel Research 49: 255-269.

Kouhi, J., Kortessmä, M. 1990. Strength test on bolted connections using high-strength steels (HSS steels) as a base material. Research notes 1185, Espoo, Technical Research Centre of Finland: ločena paginacija

Može, P. 2008. Duktilnost in nosilnost vijačenih spojev v konstrukcijah, narejenih iz jekel visoke trdnosti. Doktorska disertacija. Univerza v Ljubljani, FGG: str. 260

Može, P., Beg, D. 2010. High strength tension splices with one or two bolts. *Journal of Constructional Steel Research*, letn. 66, št. 8-9 (2010): 1000-1010

Može, P., Beg, D. 2010. Investigation of high strength steel connections with several bolts in double shear. *Journal of Constructional Steel Research*, letn. 67, št. 3 (2011): 333-347

Orbison, G. J., Wagner, E. M., Fritz, P.W. 1999. Tension plane behavior in single-row bolted connections subjected to block shear. *Journal of Constructional Steel Research* 49: 225-239.

Puthli, R., Fleischer, O. 2001. Investigation on bolted connections for high strength steel members. *Journal of Constructional Steel Research*, 57: 313-326.

SIMULIA, Abaqus Online Documentation: Version 6.10. Dassault Systèmes: dokumentacija je dosegljiva samo za uporabnike licenčnega programa.

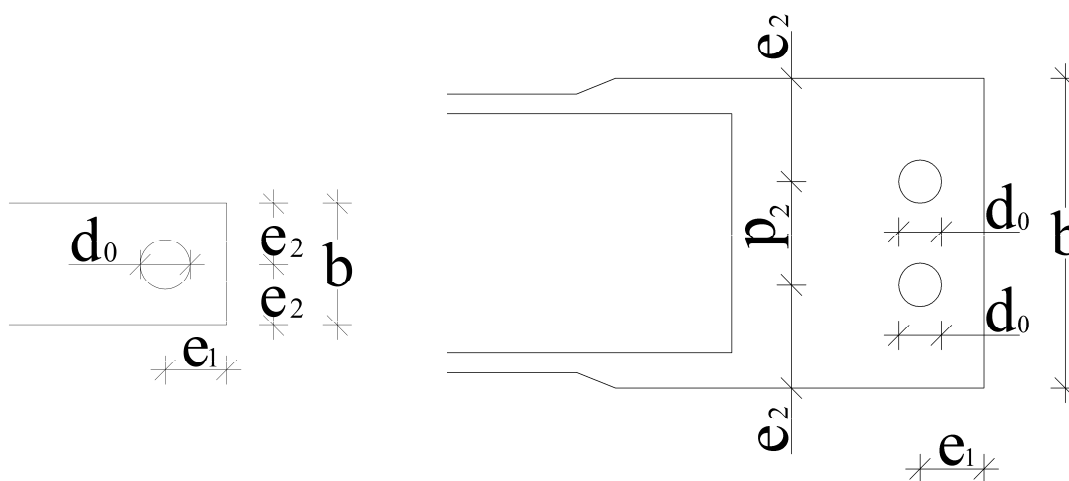
Tokyo Sokki Kenkyujo Co., Ltd. 2010. BTM series Bolt strain gauge.
http://www.tml.jp/e/product/strain_gauge/catalog_pdf/BTMseries.pdf

Vasarhelyi, D.D., Chiang, K.C. 1967. Coefficient of friction in joints of various steel. *J Struct Div, ASCE*, 93(ST4): 227-43.

Priloga A

Tabela z osnovnimi geometrijskimi razmerji in dimenzijami spojev

Vzorec	e_1/d_0	e_2/d_0	p_2/d_0	d_0 [mm]	b [mm]	t_2 [mm]	d	A_{net} [mm ²]
M101	1,19	1,20		26	65,0	12	M24	468
M102	1,50	1,18		26	64,0	12	M24	456
M103	1,96	1,20		26	65,1	12	M24	469
M104	1,01	1,47		26	79,0	12	M24	636
M105	1,26	1,50		26	79,0	12	M24	636
M106	1,49	1,49		26	79,0	12	M24	636
M107	2,02	1,48		26	78,0	12	M24	624
M108	2,47	1,44		26	78,5	12	M24	630
M109	0,97	1,54		18	55,0	12	M16	444
M110	1,17	1,49		18	54,6	12	M16	439
M111	1,46	1,52		18	54,6	12	M16	439
M112	1,97	1,51		18	54,7	12	M16	440
M113	2,47	1,48		18	55,0	12	M16	444
M201	1,54	2,38	2,42	22	159,0	12	M20	1380
M202	2,57	2,41	2,41	22	159,8	12	M20	1390
M203	1,47	1,19	3,67	22	134,9	12	M20	1091
M204	2,51	1,18	3,69	22	134,9	12	M20	1091
M205	1,49	1,44	3,05	22	132,0	12	M20	1056
M206	2,52	1,49	2,98	22	132,1	12	M20	1057



Prikaz geometrijskih karakteristik za spoj z enim in za spoj z dvema vijakoma.

Tabela z nazivnimi in dejanskimi geometrijami spojev

Vzorec	Nazivne mere [mm]				Dejanske mere [mm]				
	$e_1 - d_0/2$	$e_2 - d_0/2$	$p_2 - d_0$	b	$e_1 - d_0/2$	$e_{2,1} - d_0/2$	$e_{2,2} - d_0/2$	$p_2 - d_0$	b
M101	19,0	19,0		64,0	18,0	18,2	20,9		65,0
M102	26,0	19,0		64,0	25,9	17,7	19,3		64,0
M103	39,0	19,0		64,0	37,9	18,3	21,2		65,1
M104	13,0	26,0		78,0	13,3	25,2	28,0		79,0
M105	19,0	26,0		78,0	19,8	25,9	27,4		79,0
M106	26,0	26,0		78,0	25,8	25,7	27,5		79,0
M107	39,0	26,0		78,0	39,4	25,5	26,7		78,0
M108	52,0	26,0		78,0	51,2	24,5	27,9		78,5
M109	9,0	18,0		54,0	8,5	18,7	18,7		55,0
M110	13,0	18,0		54,0	12,0	17,8	19,2		54,6
M111	18,0	18,0		54,0	17,3	18,5	18,4		54,6
M112	27,0	18,0		54,0	26,5	18,2	19,4		54,7
M113	36,0	18,0		54,0	35,4	17,7	19,6		55,0
M201	22,0	42,0	31,0	159,0	22,9	42,2	41,4	31,2	159,0
M202	44,0	42,0	31,0	159,0	45,5	42,4	42,1	31,0	159,8
M203	22,0	16,0	59,0	135,0	21,4	17,2	15,2	58,7	134,9
M204	44,0	16,0	59,0	135,0	44,3	15,0	17,0	59,2	134,9
M205	22,0	22,0	44,0	132,0	21,7	20,7	22,7	45,1	132,0
M206	44,0	22,0	44,0	132,0	44,5	23,0	21,8	43,5	132,1

Tabela z razdaljami za nameščanje merilnih inštrumentov

Vzorec	$e_3 - d_0/2$ [mm]	$e_4 - d_0/2$ [mm]	l_m [mm]
M101	75	45	149
M102	80	45	154
M103	77	45	149
M104	81	45	156
M105	74	45	148
M106	78	45	152
M107	76	45	150
M108	73	45	146
M109	54	45	119
M110	61	45	123
M111	56	45	121
M112	67	45	118
M113	58	45	121
M201	87	45	153
M202	80	45	152
M203	118	60	200
M204	95	45	165
M205	115	45	181
M206	73	45	160

Priloga B

Tabela maksimalnih sil na vpetju in načinov porušitev s pripadajočimi pomiki

Vzorec	Laboratorijski test			Numerična analiza - Abaqus			SIST EN 1993-1-8		$P_{b,k}$ (Može, Beg) [kN]
	Način porušitve	F_{max} [kN]	D_u [mm]	Način porušitve	F_{max} [kN]	D_u [mm]	Merodajna kontrola	F_{min} [kN]	
M101	a	151,4	11,4	a	162,1	12,1	c	80,8	131,2
M102	b	192,2	13,7	b	205,3	17,0	c	98,0	163,9
M103	b	202,2	9,0	b	210,1	9,0	c	133,5	179,5
M104	a	125,0	9,2	a	134,9	11,6	c	99,6	117,5
M105	a	163,8	12,2	a	168,2	13,2	c	128,1	147,1
M106	a	197,4	13,7	a	206,4	13,7	c	150,2	173,8
M107	c	282,5	20,5	c	281,8	18,6	c	201,1	234,5
M108	b	279,0	13,4	b	286,2	14,4	c	235,6	243,7
M109	a	83,5	7,7	a	95,4	10,4	c	66,1	76,1
M110	a	103,6	8,1	a	118,5	8,9	c	78,3	90,6
M111	a	129,3	9,4	a	138,4	10,1	c	99,4	114,0
M112	c	181,6	14,7	b/c	194,1	19,9	c	134,1	153,7
M113	b	187,6	10,3	b	196,5	11,4	c	164,6	168,2
M201	d	359,2	11,6	d	372,4	11,6	c	176,6	301,7
M202	b*	492,9	13,4	b*	477,6	11,7	c	292,1	447,0
M203	d	348,3	15,6	d	368,9	14,7	c	163,7	274,2
M204	b**	455,2	14,9	b**	464,8	11,3	c	275,0	343,9
M205	a	352,5	14,7	a	367,4	13,3	c	236,0	274,8
M206	b	469,3	16,3	b	488,7	13,4	b	403,9	335,6

Legenda porušitev:

a	strig
b	oslabljeni prerez
b*	oslabljeni prerez med vijakoma
b**	oslabljeni prerez od vijakov do roba
c	bočni pritiski
d	strižni iztrg

Tabela nosilnosti izračunanih po SIST EN 1993-1-8 in primerjava z laboratorijskimi testi ter numeričnimi simulacijami

Vzorec	SIST EN 1993-1-8				Laboratorijski test - F_{max} [kN]	Numerična analiza – Abaqus F_{max} [kN]	Način porušitve
	oslabljen prerez - $N_{u,k}$ [kN]	bočni pritisk - $F_{b,k}$ [kN]	Strižni iztrg - $V_{eff,1,k}$ [kN]	F_{min} [kN]			
M101	179,0	80,8	/	80,8	151,4	162,1	a
M102	174,4	98,0	/	98,0	192,2	205,3	b
M103	179,5	133,5	/	133,5	202,2	210,1	b
M104	243,3	99,6	/	99,6	125,0	134,9	a
M105	243,3	128,1	/	128,1	163,8	168,2	a
M106	243,3	150,2	/	150,2	197,4	206,4	a
M107	238,7	201,1	/	201,1	282,5	281,8	c
M108	241,0	235,6	/	235,6	279,0	286,2	b
M109	169,8	66,1	/	66,1	83,5	95,4	a
M110	168,0	78,3	/	78,3	103,6	118,5	a
M111	168,0	99,4	/	99,4	129,3	138,4	a
M112	168,5	134,1	/	134,1	181,6	194,1	c
M113	169,8	164,6	/	164,6	187,6	196,5	b
M201	527,9	176,6	258,4	176,6	359,2	372,4	d
M202	531,5	292,1	355,4	292,1	492,9	477,6	b*
M203	417,2	163,7	247,9	163,7	348,3	368,9	d
M204	417,2	275,0	345,1	275,0	455,2	464,8	b**
M205	403,9	236,0	305,3	236,0	352,5	367,4	a
M206	404,4	423,4	414,8	404,4	469,3	488,7	b

Legenda porušitev:

a	strig
b	oslabljeni prerez
b*	oslabljeni prerez med vijakoma
b**	oslabljeni prerez od vijakov do roba
c	bočni pritiski
d	strižni iztrg

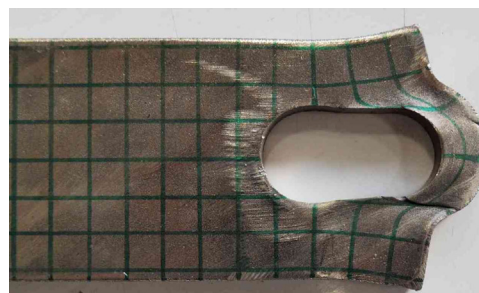
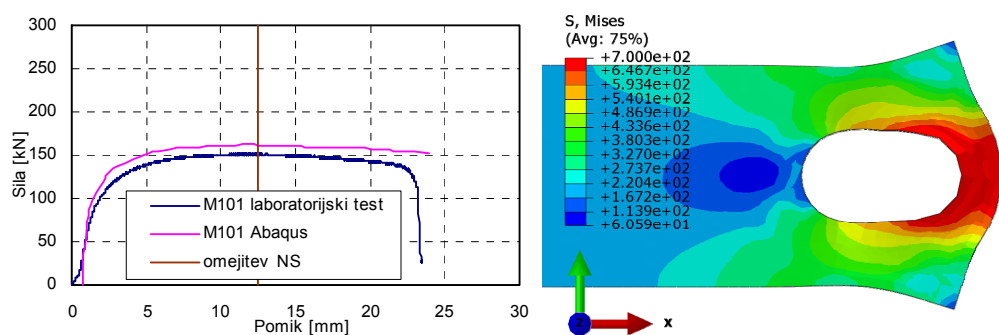
Tabela sil pri pomiku $d_0/6$

Vzorec	Laboratorijski test	Numerična analiza - Abaqus	SIST EN 1993-1-8
	$F(d_0/6)$ [kN]	$F(d_0/6)$ [kN]	F_{min} [kN]
M101	139,6	150,0	80,8
M102	160,9	182,4	98,0
M103	188,9	202,7	133,5
M104	117,7	124,3	99,6
M105	150,9	153,3	128,1
M106	177,9	185,3	150,2
M107	227,9	237,6	201,1
M108	235,1	253,4	235,6
M109	77,3	85,5	66,1
M110	95,4	103,2	78,3
M111	115,2	120,6	99,4
M112	147,4	156,5	134,1
M113	157,1	154,9	164,6
M201	322,1	327,8	176,6
M202	422,5	410,2	292,1
M203	306,0	318,4	163,7
M204	384,5	391,6	275,0
M205	314,3	319,0	236,0
M206	383,7	400,4	404,4

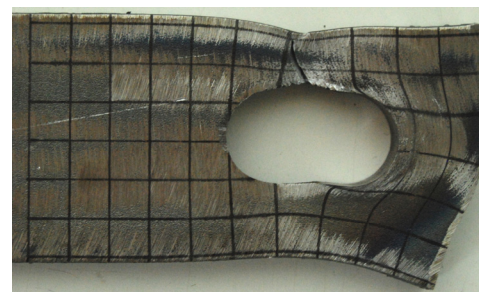
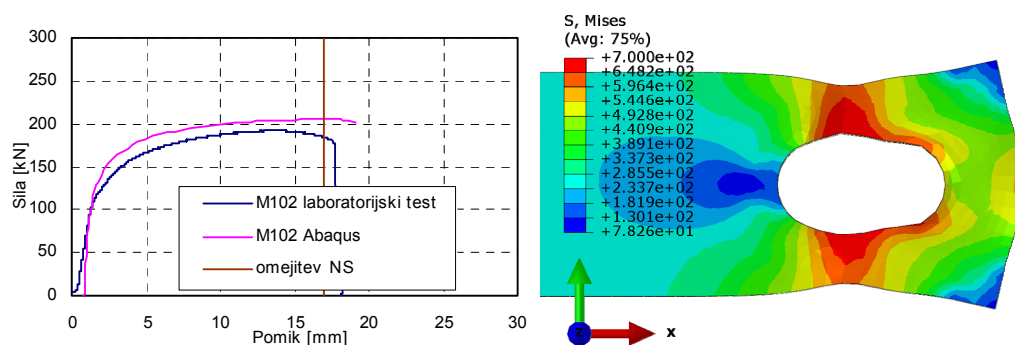
Priloga C

Prikaz diagrama sila - pomik, in slike deformiranega numeričnega modela in slike porušenega vzorca za vse spoje. Vrednosti za napetosti so podane v MPa.

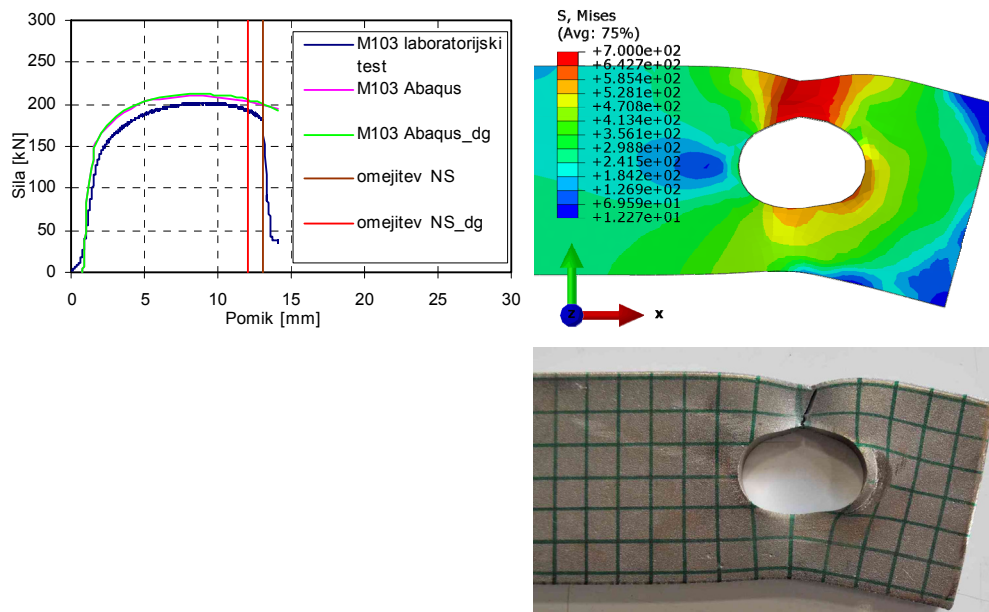
M101



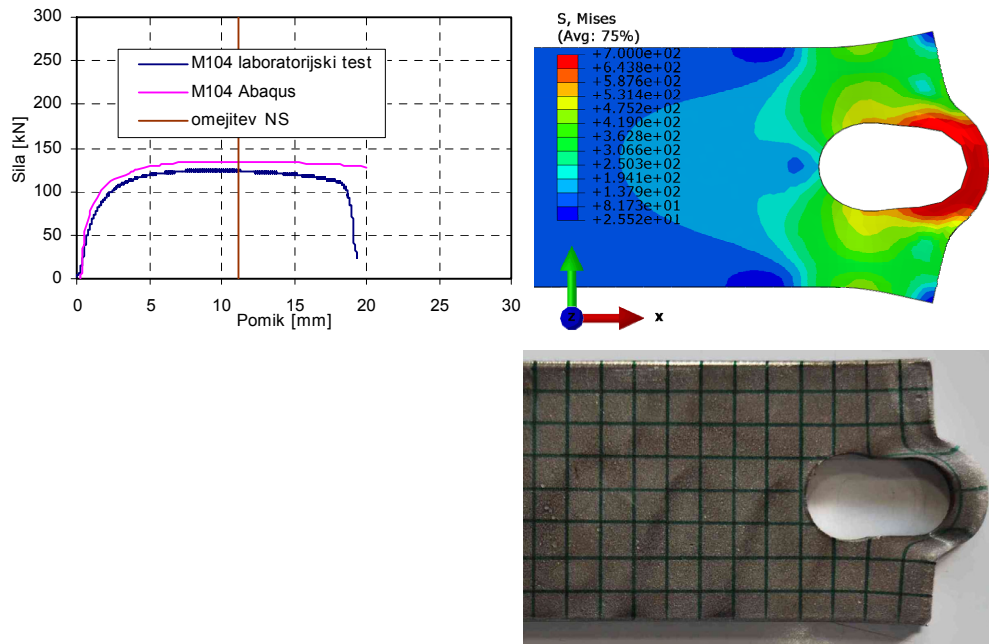
M102



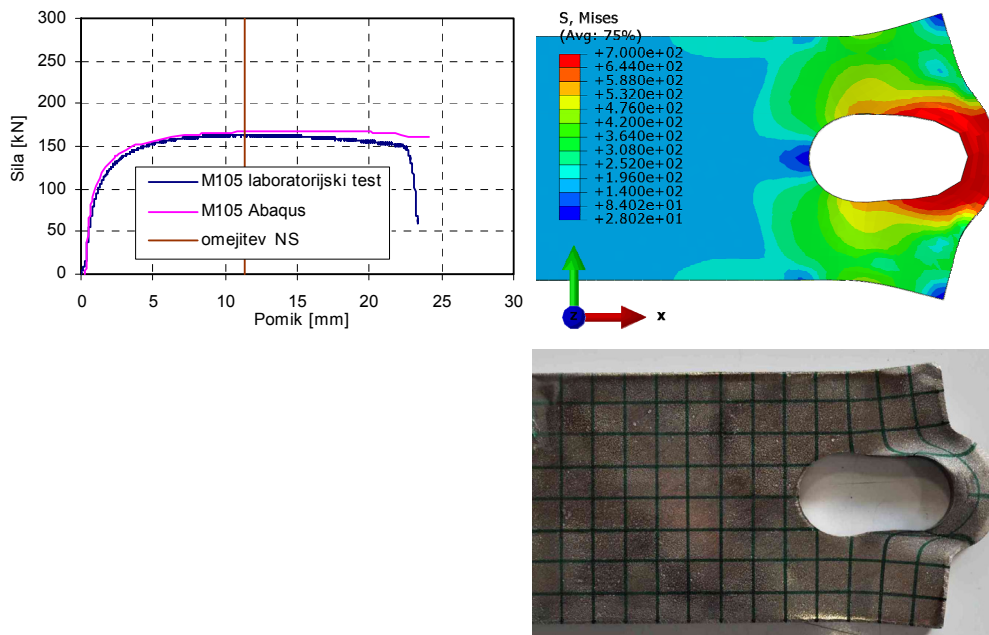
M103



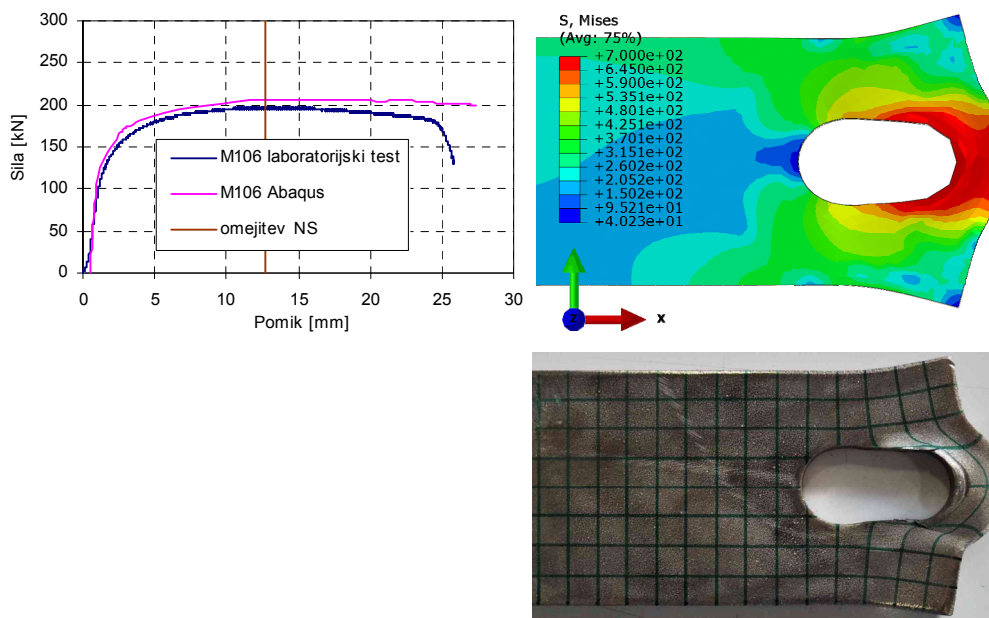
M104



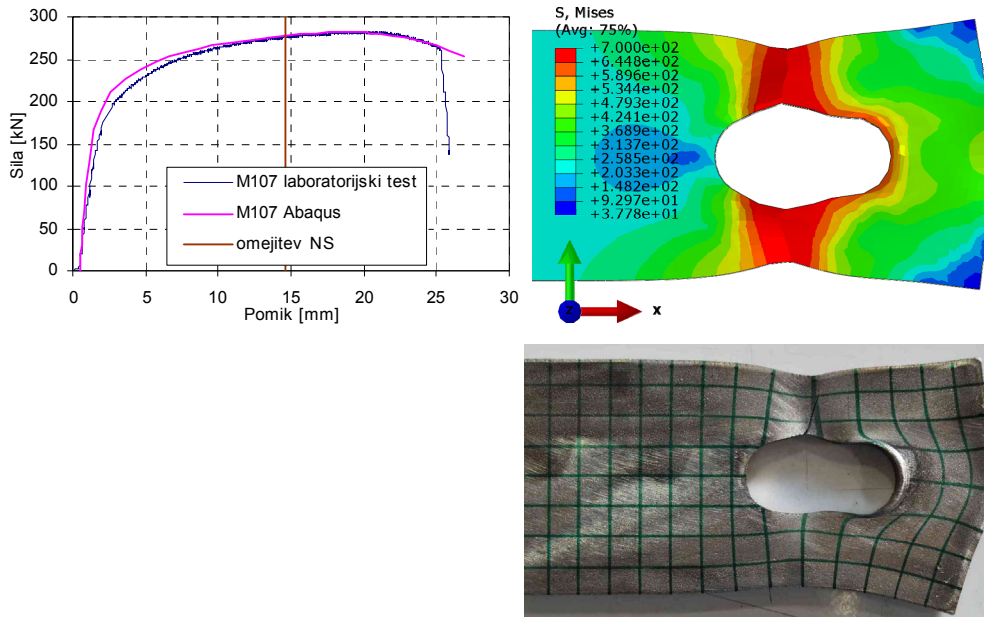
M105



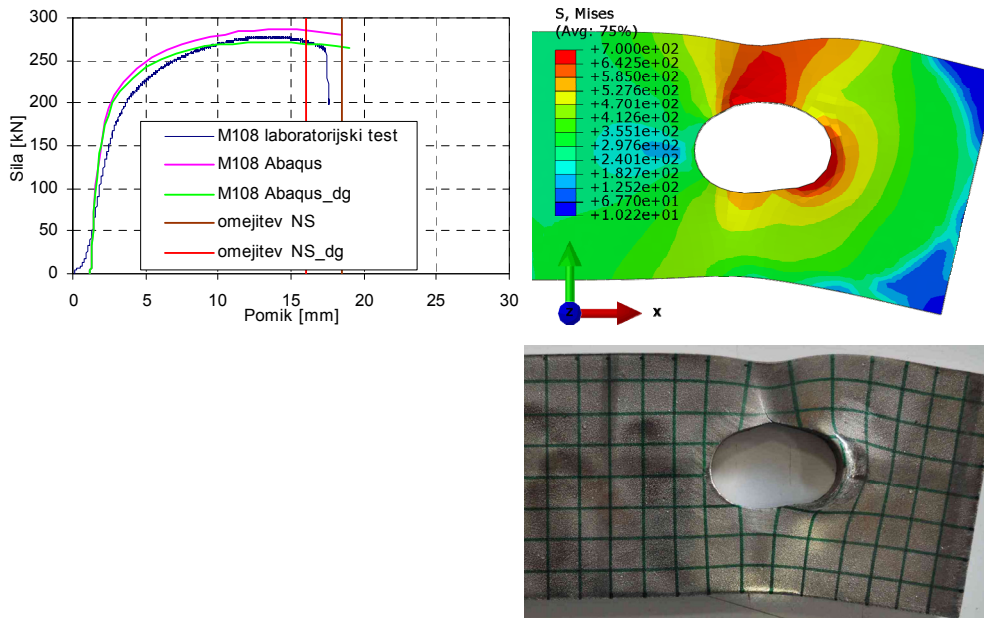
M106



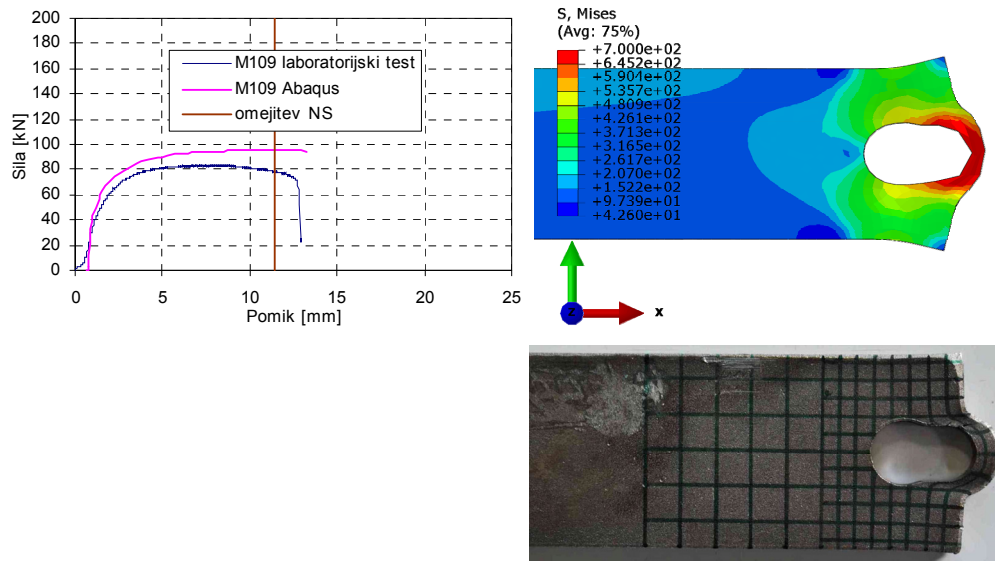
M107



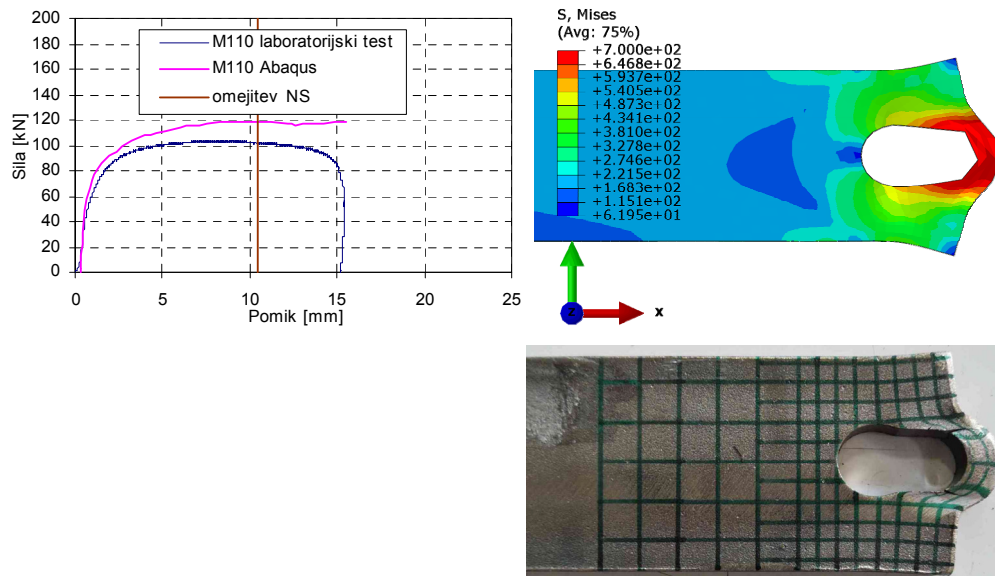
M108



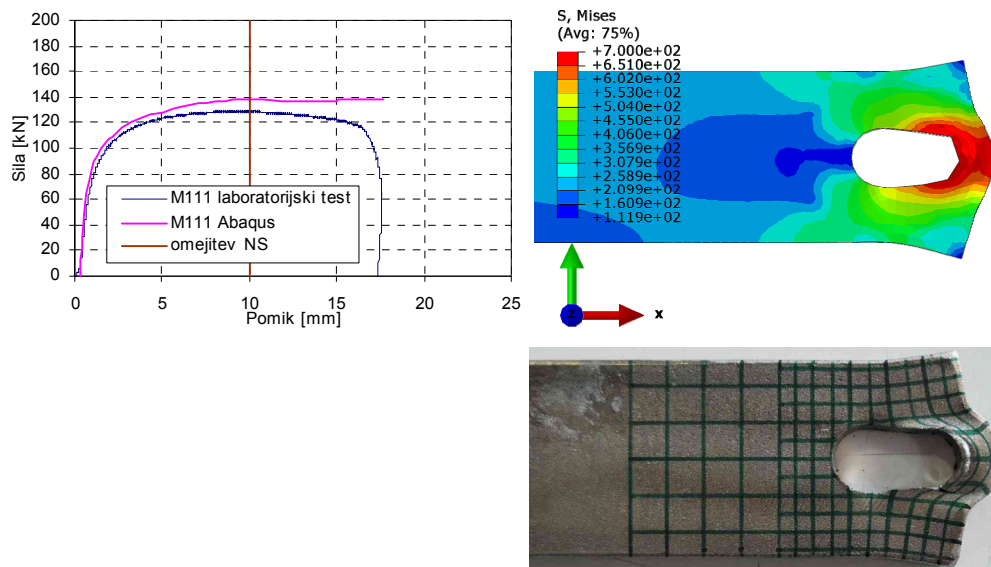
M109



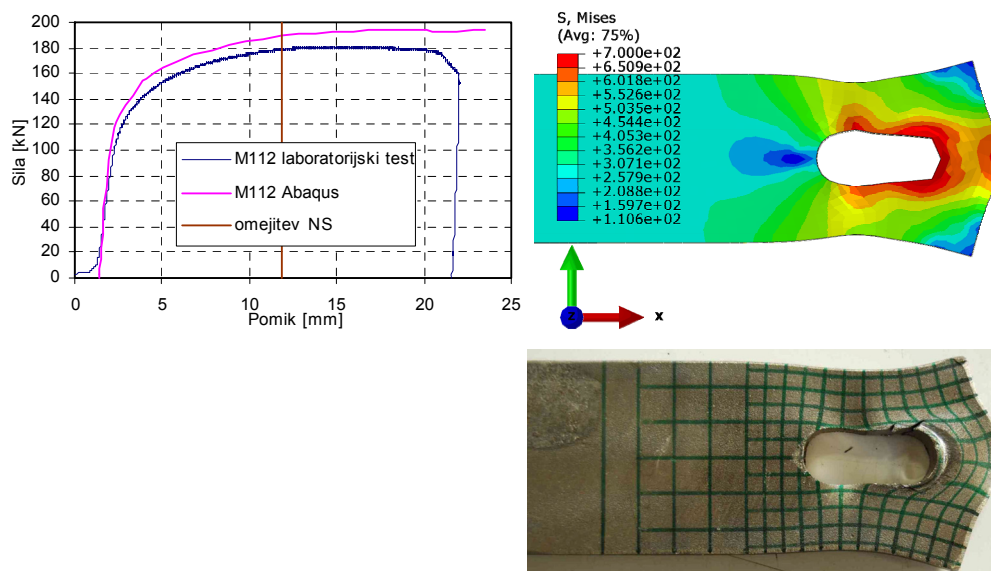
M110



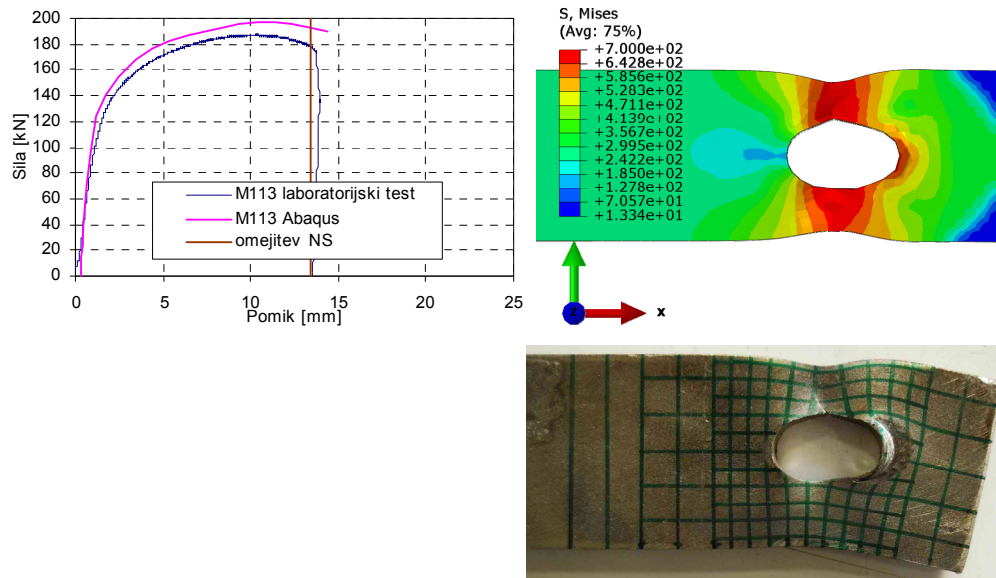
M111



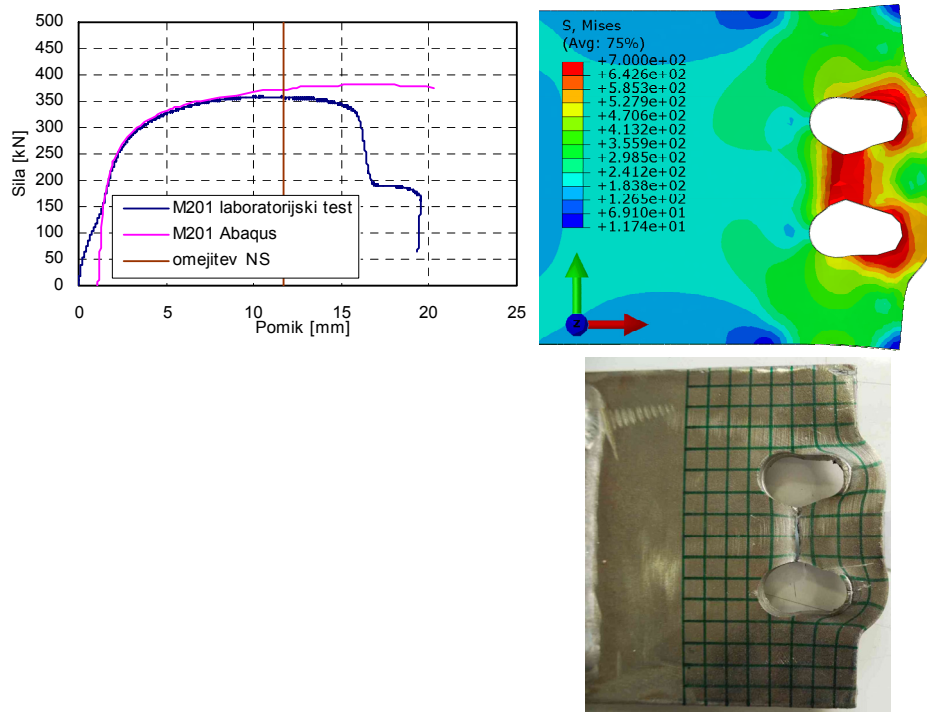
M112



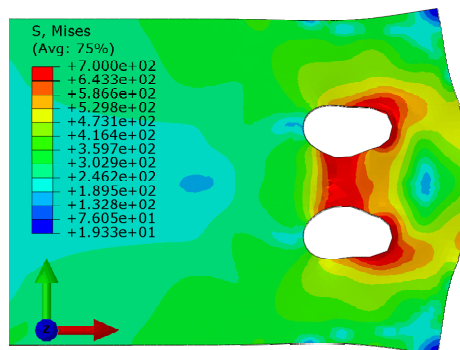
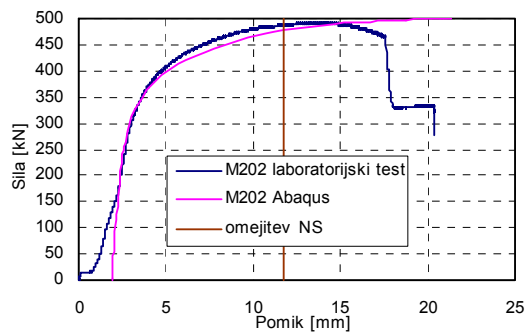
M113



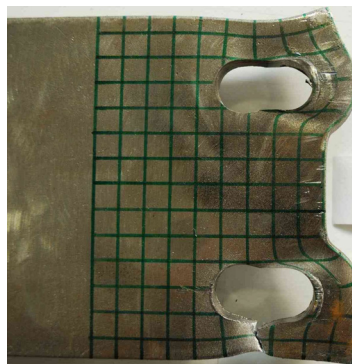
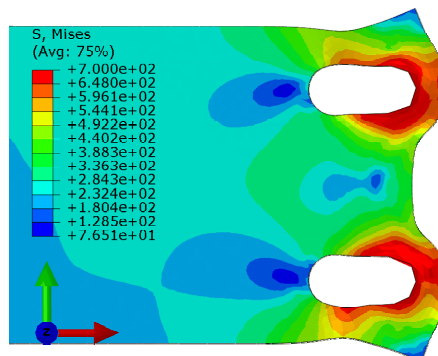
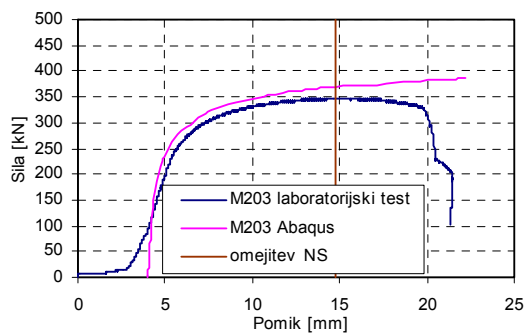
M201



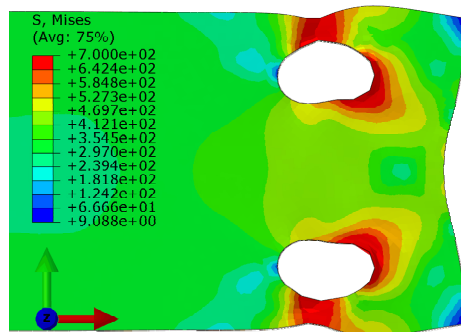
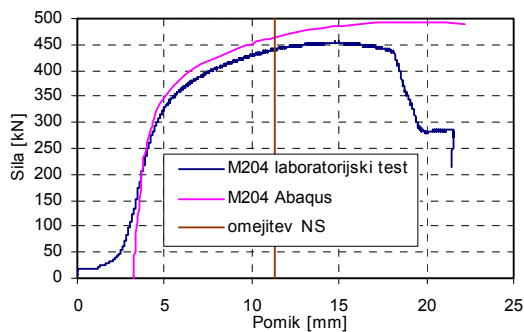
M202



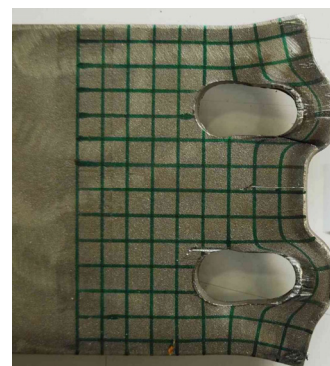
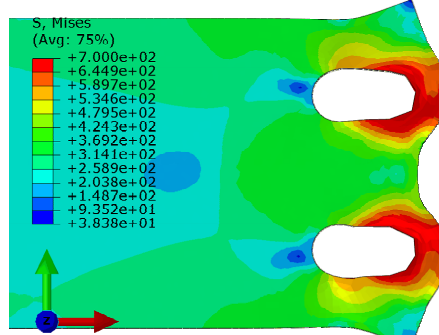
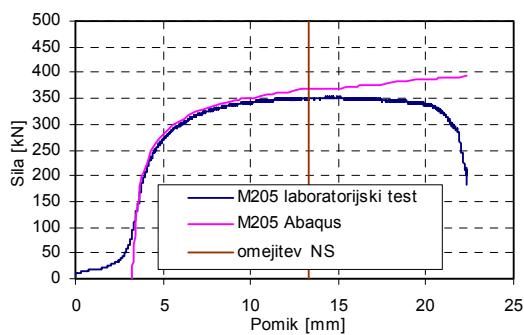
M203



M204



M205



M206

