



РД 17816



300121098

COBISS

Грађевински факултет  
Универзитета у Београду

Златко А. Марковић

ПРИЛОГ АНАЛИЗИ НОСИВОСТИ МЕХАНИЧКИХ  
СПОЈНИХ СРЕДСТАВА КОД ТАНКОЗИДНИХ  
ЧЕЛИЧНИХ ЕЛЕМЕНАТА

• Докторска дисертација •

Београд, 2002.

РА 17816

ARHIV  
UNIVERZITETA U BEOGRADU  
17816

Грађевински факултет  
Универзитета у Београду

Златко А. Марковић

**ПРИЛОГ АНАЛИЗИ НОСИВОСТИ МЕХАНИЧКИХ  
СПОЈНИХ СРЕДСТАВА КОД ТАНКОЗИДНИХ  
ЧЕЛИЧНИХ ЕЛЕМЕНАТА**

- Докторска дисертација -

Београд, 2002.

УНИВЕРЗИТЕТСКА БИБЛИОТЕКА  
"СВЕТОЗАР МАРКОВИЋ" - БЕОГРАД  
Д. Бр. 121098

2461-23



## **Ментор:**

Проф. др Драган Буђевац, дипл. грађ. инж.  
Грађевински факултет Универзитета у Београду

## **Чланови комисије:**

Проф. др Бранко Зарић, дипл. грађ. инж.  
Грађевински факултет Универзитета у Београду

Проф. др Бранислав Ћорић, дипл. грађ. инж.  
Грађевински факултет Универзитета у Београду

Проф. др Љубомир Влајић, дипл. грађ. инж.  
Грађевински факултет у Суботици, Универзитет у Новом Саду

## **Датум одбране:**

## **Датум промоције:**

## **Област доктората:**

Техничке науке - област Грађевинарство (челичне конструкције)

# ПРИЛОГ АНАЛИЗИ НОСИВОСТИ МЕХАНИЧКИХ СПОЈНИХ СРЕДСТАВА КОД ТАНКОЗИДНИХ ЧЕЛИЧНИХ ЕЛЕМЕНАТА

## РЕЗИМЕ

У овом раду приказана су теоријска и експериментална истраживања у области веза танкозидних челичних елемената остварених помоћу механичких спојних средстава: обичних завртњева, високовредних завртњева и самонарезајућих завртњева. Испитивани су смичући спојеви и спојеви оптерећени на затезање.

Код смичућих спојева анализиране су везе на преклоп и са подвезицама. Варирана су четири параметра: дебљина лима (2 и 4 mm), ивично растојање (20 и 40 mm), тип везе (на преклоп или са подвезицама), као и врста спојног средства. Да би се прецизније утврдило понашање основног материјала код оваквих веза, поред експерименталне извршена је и нумеричка анализа, применом методе коначних елемената. Коришћени су готови софтверски пакети (програм ПАК). На основу поменутих теоријско-експерименталних истраживања утврђени су потенцијални видови лома и дате препоруке за прорачун носивости.

Због свог специфичног понашања испитиване су само везе оптерећење затезање остварене помоћу самонарезајућих завртњева. Испитивање је спроведено у уређају који је посебно конструисан за ову прилику. Установљени су могући видови лома као и фактори од којих зависи који ће се тип лома појавити.

### *Кључне речи:*

- челичне конструкције,
- танкозидни елементи,
- везе,
- обични завртњеви,
- високовредни завртњеви,
- самонарезајући завртњеви,
- смицање,
- затезање

# A CONTRIBUTION TO THE BEARING ANALYSIS OF THE FASTENERS IN THIN GAUGE STEEL MEMBERS

## SUMMARY

Theoretical and experimental researches in the field of connections of steel thin gauge members made with fasteners (bolts, high resistance bolts and screws) are shown in this paper. Both of shear and tension connections have been examined.

In shear connections, lap connections and connections with splices have been analysed. Four parameters have been varied: thickness of the steel plate (2 and 4 mm), edge distance (20 and 40 mm), type of the connections (lap or splices) and kind of fastener (simple bolts, high resistance bolts and screws). Numerical analysis by finite element method has been done in the sense of precise establishing of the basic material behavior in such a kind of connections. Existing computer programs have been used (PAK). According these, mentioned, theoretical-experimental research potential types of failure have been defined and some recommendations for calculation of the bearing capacity have been given.

Only tension connections with screws have been examined, because of their specific behavior. Testing procedure has been carried out in special device, which had been designed for this dissertation. Possible types of failure have been defined, and factors that influence which type of failure will appear, have been given, as well.

### *Key words:*

- steel structures
- thin gauge members
- connections
- bolts with nuts
- high resistance bolts
- screws
- shear
- tension

# САДРЖАЈ

УВОД	1
1 Историјат	1
2 Везе код танкозидних челичних елемената	3
3 Актуелна светска сазнања и тенденције	7
3.1 Смичући спојеви	7
3.1.1 Завртњеви	9
3.1.2 Самонарезујући завртњеви	10
3.2 Спојеви оптерећени на затезање	11
3.3 Савремене тенденције	12
4 Стање у домаћој регулативи и пракси	15
5 Основни циљеви истраживања	16
Поглавље 1:	
<b>ОСНОВНА МЕХАНИЧКА СПОЈНА СРЕДСТВА</b>	<b>18</b>
1 Завртњеви	18
1.1 Облици и димензије	18
1.2 Материјали за израду	23
1.3 Поље примене	25
2 Самонарезујући завртњеви	27
2.1 Облици и димензије	27
2.2 Материјали за израду	30
2.3 Примена у грађевинарству	31
Поглавље 2:	
<b>ПРИКАЗ ЕКСПЕРИМЕНТАЛНОИХ ИСПИТИВАЊА</b>	<b>32</b>
1 Програм испитивања	32
2 Поступци вредновања резултата испитивања	35
3 Испитивање механичких карактеристика основног материјала	37
4 Испитивање носивости завртњева	40
5 Испитивање механичких спојних средстава у смичућим спојевима	42
5.1 Обични завртњеви	42
5.2 Високовредни завртњеви	48
5.3 Самонарезујући завртњеви	50
6 Испитивање самонарезујућих завртњева у спојевима оптерећеним на затезање	56

<b>Поглавље 3:</b>		
<b>НУМЕРИЧКА АНАЛИЗА</b>		<b>60</b>
1	Увод	60
2	Програм нумеричких истраживања и концепције нумеричких модела	63
3	Приказ резултата нумеричке анализе и њихово поређење са експерименталним резултатима	64
3.1	Серија SBS2-1	64
3.2	Серија SBS2-2	70
3.3	Упоредна анализа напонско деформацијског стања нумеричких модела серија SBS2-1 и SBS2-2	73
3.4	Модел са средњом величином ивичног растојања - SBS2-3	76
<b>Поглавље 4:</b>		
<b>ПОНАШАЊЕ МЕХАНИЧКИХ СПОЈНИХ СРЕДСТАВА У СМИЧУЋИМ СПОЈЕВИМА</b>		<b>80</b>
1	Увод	80
2	Обични завртњевеи	81
2.1	Носивост завртњева на смицање	81
2.2	Носивост основног материјала	85
2.2.1	Лом цепањем лима и гњечењем омотача рупе	86
2.2.2	Лом кривљењем лима и пробијањем главе завртња	92
2.2.3	Лом нето пресека	95
3	Високовредни завртњевеи	97
4	Самонарезујући завртњевеи	101
4.1	Општа разматрања	101
4.2	Носивост основног материјала	104
4.3	Носивост самонарезујућих завртњева на смицање	105
<b>Поглавље 5:</b>		
<b>ПОНАШАЊЕ САМОНАРЕЗУЈУЋИХ ЗАВРТЊЕВА У СПОЈЕВИМА ОПТЕРЕЂЕНИМ НА ЗАТЕЗАЊЕ</b>		<b>108</b>
1	Увод	108
2	Носивост самонарезујућих завртњева на затезање	109
3	Носивост самонарезујућих завртњева на чупање	110
4	Носивост самонарезујућих завртњева на пробијање и провлачење	111
<b>ЗАКЉУЧАК</b>		<b>113</b>
<b>ЛИТЕРАТУРА</b>		<b>115</b>



# Увод

## 1 ИСТОРИЈАТ

Средином XX века, по завршетку II светског рата, у САД и Европи почињу интензивнија истраживања у области челичних конструкција од хладно обликованих профила. Она су била инспирисана низом предности које поседују хладно обликовани профили у поређењу са другим производима челичне индустрије који се, конвенционално, користе у грађевинарству (вруће ваљани профили и профили образовани заваривањем). Као најважније предности издвајају се: мањи утрошак челика (у неким случајевима и до 50%), широк асортиман производа и велике могућности конструкционог обликовања, брза и лака монтажа, побољшање механичких карактеристика поступком хладног обликовања, бољи квалитет обраде површина, квалитетнија и прецизнија израда итд.

Први званични документ који даје препоруке за прорачун конструкција од хладно обликованих профила издат је 1946. године у САД под насловом "Одредбе за пројектовање хладно обликованих елемената челичних конструкција" (*Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members*) и плод је дугогодишњих истраживања под руководством професора Џорџа Винтера (*Georg Winter*) са Корнел Универзитета (*Cornell University*). У Европи се први пут у техничкој регулативи проблематика хладно обликованих профила и производа третира у британским прописима из 1969. године (*BS 449: Part 2*).

Касније се битно убрзавају активности на изради прописа из ове области, па низ земаља, углавном по угледу на САД или Велику Британију, израђују властите прописе који обрађују ову проблематику (Аустралија, Шведска, Западна Немачка, Француска, Чехословачка, Холандија,...). Европска конвенција за челичне конструкција (*European Convention for Constructional Steelwork - ECCS*) публикује 1977. године "Европске препоруке за испитивање металних профилисаних лимова" (*European Recommendation for the Testing of Profiled metal sheets*) у којима се, по први пут, дефинишу поступци за испитивање веза код хладно обликованих танкозидних елемената, као и потенцијални видови лома. Кроз три године, тачније 1980., ECCS објављује и "Европске препоруке за пројектовање профилисаних лимова и пресека" (*European Recommendation for Design of Profiled Sheeting and Sections*). Тек нешто касније, 1989. године, по завршетку нових истраживања већег обима, спроведених у оквиру земаља Европске заједнице, појављују се "Европске препоруке за пројектовање танкозидних челичних елемената" (*European Recommendation for Design of Light Gauge Steel Members*) у оквиру којих су дата и нека правила за прорачун веза код танкозидних елемената. У овом документу дата су правила за прорачун веза у завареној изради, као и веза изведених помоћу механичких спојних средстава. Од механичких спојних средстава поред обичних завртњева (*bolts*



with nuts), по први пут, као специфична спојна средства за танкозидне челичне елементе, помињу се и поп-закивци (*blind rivets*) и самонарезајући завртњевци (*self-tapping screws*). До тада су, у свим претходним европским и ваневропским (САД и Аустралија) прописима за хладно обликоване профиле, од механичких спојних средстава били заступљени само обични завртњевци (завртњевци са навртком), који су уобичајени и код класичних челичних конструкција. Наиме, у прописима Америчког института за гвожђе и челик (*American Iron and Steel Institut - AISI*) и њима традиционално сличном аустралијском стандарду (*Cold Formed Steel Structure Code 1538-1974*), као и у британским прописима из 1987. године (*BS 5950: Part 5 - Code practice for design of cold formed section*), поред правила за прорачун веза у завареној изради, дата су и правила за прорачун веза остварених помоћу обичних завртњева.

У циљу хармонизације и постизања пуне конзистенције и компатибилности националних прописа и стандарда из области грађевинарства, Европска заједница је још крајем седамдесетих година прошлог века формирала комисију (*CEC*), која у сарадњи са Европском организацијом за стандардизацију (*Comité Européen de Normalisation - CEN*) има за циљ да изради и уведе у употребу нове европске прописе за конструкције - Еврокодове (*Structural Eurocode*).

Тако је, као последица напора на изради јединствених европских прописа, већ у марту 1989. године, у оквиру Еврокода 3, који се бави проблематиком челичних конструкција, објављена радна верзија Анекса А: "Хладно обликовани челични лимови и пресеци" (*Cold formed Steel Sheets and Members*), која се у многеме ослања на постојеће, већ поменуте, препоруке ECCS-а. До краја наредне године објављен је и преднацрт овог Анекса у коме су од механичких спојних средстава обухваћени: завртњевци, поп-закивци, самонарезајући завртњевци и ексери са експлозивним упуцавањем (*cartridge fired pins*). Поред тога, осим препорука за прорачун механичких спојних средстава у смичућим спојевима, дају се, по први пут, додуше у мањој мери, и препоруке за прорачун механичких спојних средстава у спојевима оптерећеним на затезање.

Даљом реорганизацијом, а у складу са значајем који јој припада, проблематика хладно обликованих профила добија више простора у оквиру Еврокода 3, па тако од Анекса А, прераста у посебан део овог Еврокода. У априлу 1996. године у виду европског предстандарда бива објављен Еврокод 3: Део 1.3: Додатна правила за хладно обликоване танкозидне елементе и лимове (*Supplementary rules for cold formed thin gauge members and sheeting*). У њему је, проблематика везана за прорачун механичких спојних средстава детаљније разматрана и систематизирана, тако да данас овај документ представља најсавременији пропис који третира област челичних конструкција од хладно обликованих профила и њихових веза, поготово ако се има у виду да је, и након најновијих организационих и суштинских измена које су спроведене током последње две године у свим еврокодовима, овај део Еврокода 3 остао готово непромењен. Еврокод 3 - Део 1.3 је, у циљу увођења Еврокодова као најсавременијих међународних прописа из области грађевинарства у нашу техничку регулативу, преведен и објављен у издању Грађевинског факултета у Београду 1997. године.

На основу изложене хронологије развоја техничке регулативе из области веза изведених помоћу механичких спојних средстава код танкозидних челичних хладно обликованих елемената, може се закључити да је ова проблематика релативно скоријег датума, односно да су нека озбиљнија истраживања у свету почела тек у последњих двадесетак година и још увек су у току. Актуелност ове теме посебно добија на значају

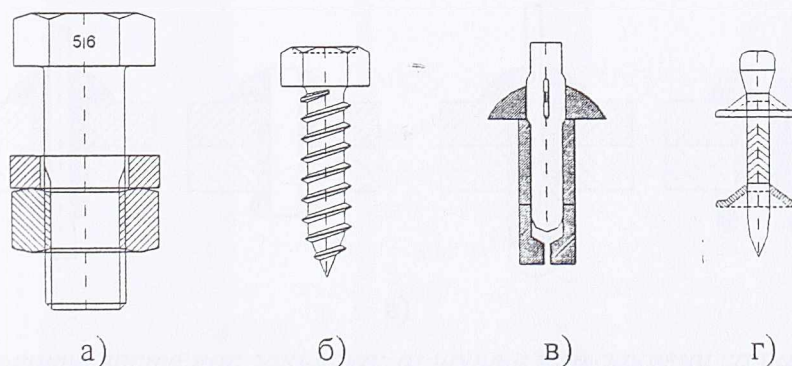
у нашим условима, јер у нашој земљи ни до данас нису објављени прописи који би регулисали ову проблематику и омогућили већу примену хладно обликованих профила, пре свега у зградарству, али и у другим, савременим инжењерским објектима.

## 2 ВЕЗЕ КОД ТАНКОЗИДНИХ ЧЕЛИЧНИХ ЕЛЕМЕНАТА

Специфичности конструкција од челичних танкозидних хладно обликованих профила свакако се одражавају и на начин повезивања оваквих елемената у јединствену конструктивну целину. Једна од битних карактеристика хладно обликованих профила је знатно мања дебљина лима у односу на класичне вруће ваљане производе. Уобичајене дебљине лимова од којих се, хладним ваљањем, пресовањем или савијањем, добијају хладно обликовани профили и производи крећу се у опсегу од 0,5 до 6 mm. Примена класичних спојних средстава, која се примењују у конвенционалним челичним конструкцијама, свакако захтева извесну модификацију, односно прилагођавање, а у неким случајевима јавља се и потреба за применом нових механичких спојних средстава.

Везе између танкозидних челичних елемената могу да се остваре применом механичких спојних средстава или технолошких поступака, као што су заваривање и лепљење. Од механичких спојних средстава углавном се користе:

- завртњеви (слика 1а),
- самонарезајући завртњеви (слика 1б),
- поп-закивци (слика 1в) и
- ексери са експлозивним упуцавањем (слика 1г).



Слика 1 - Механичка спојна средства која се примењују код танкозидних елемената:

- а) завртњеви; б) самонарезајући завртњеви; в) поп-закивци;  
г) ексери са експлозивним упуцавањем

Примена завртњева, како обичних, тако и високовредних, је уобичајена за класичне челичне конструкције, док су остала механичка спојна средства специфична за танкозидне хладно обликоване профиле. Начин њихове примена у грађевинарству преузет је из других индустријских грана, које су традиционално упућене на лимове малих дебљина, као што су аутомобилска и авио индустрија. Имајући у виду да ће завртњеви (са навртком) и самонарезајући завртњеви бити детаљно разматрани у оквиру Поглавља 1, овде се истичу само неке, најбитније, одлике поп-закивака и ексера са експлозивним упуцавањем.

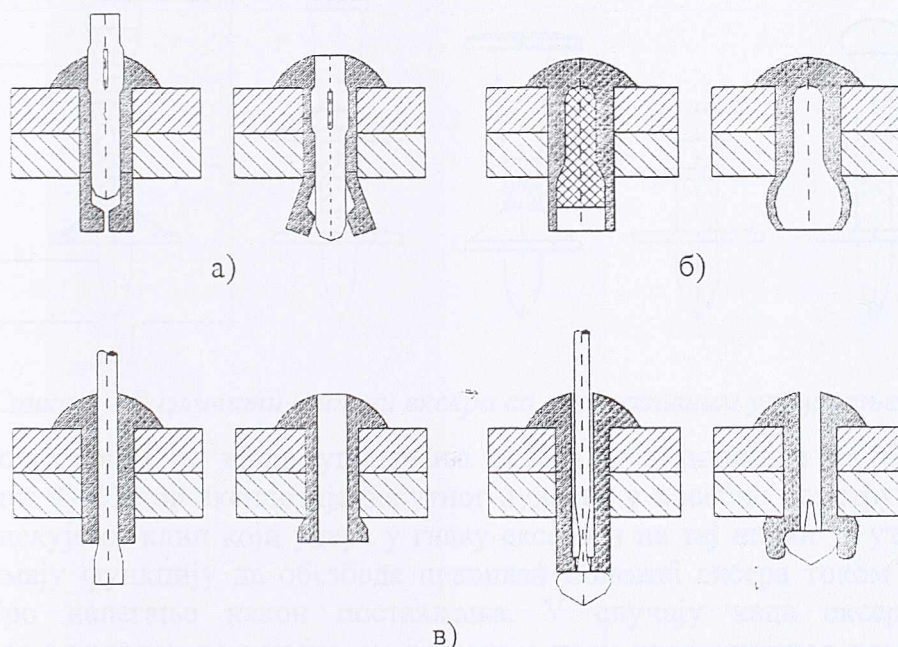
Поп-закивци или у буквалном преводу "слепи закивци" (*blind rivets*) су посебно конструисана врста закивака за чије постављање није неопходан приступ са обе стране

везе. Хладно обликовани профили затвореног (кружног или правоугаоног) попречног пресека имају знатно већу торзиону крутост и носивост у односу на отворене. Међутим, везе елемената за такве хладно обликоване профиле могу се остварити само са спољашње стране, на пример заваривањем. Због неприступачне унутрашњости примена класичних завртњева са навртком је искључена. Стога се јавила потреба за применом механичких спојних средстава као што су поп-закивци.

Постоји већи број патентираних система који омогућавају постављање ових механичких спојних средстава код танкозидних челичних елемената код којих је једна страна везе неприступачна. Ови патенти се разликују по начину формирања "слепо" главе поп-закивци. Најчешће се срећу следеће три групе:

- поп-закивци са расцепком (*drive-pin blind rivets*),
- поп-закивци са експлозивним пуњењем (*explosive blind rivets*) и
- поп-закивци са трном (*pull-stem blind rivets*).

*Поп-закивци са расцепком* (слика 2а) се постављају једноставним укуцавањем расцепке, помоћу које се на слепом крају поп-закивка формирају два или четири "репа" и на тај начин спречава извлачење поп-закивка.



Слика 2 - Различите врсте поп закивака: а) шупљи поп-закивци са расцепком; б) поп-закивци са експлозивним пуњењем; в) поп-закивци са трном

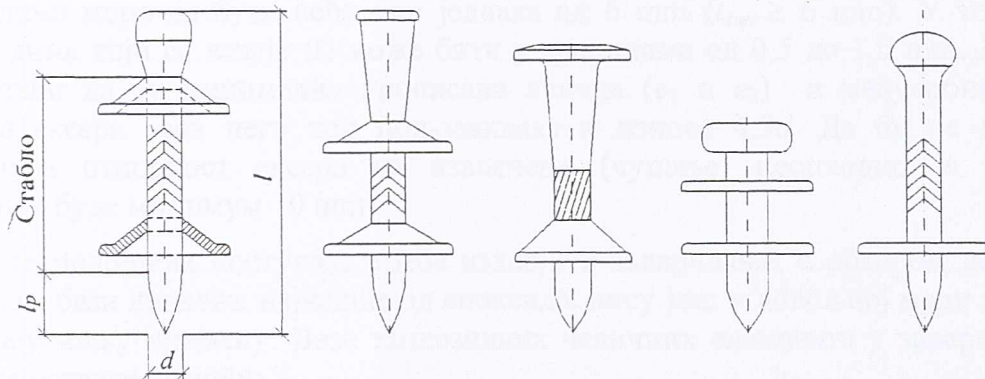
*Поп-закивци са експлозивним пуњењем* (слика 2б) у свом телу садрже хемијско средство (експлозивно пуњење) које се активира загревањем главе поп-закивка. Приликом контролисане експлозије долази до пластичне деформације посебно обликованог слепог краја поп-закивка, и на тај начин се образује друга, "слепа" глава.

*Поп-закивци са трном* (слика 2в) постављају се извлачењем посебно обликованог трна са проширеним завршетком, који врши пластичну деформацију тела закивка на његовом слепом крају. Постоје два основна типа оваквих поп-закивака. Први тип су шупљи поп-закивци са трном са конично проширеним завршетком. Један трн може да се користи за постављање већег броја поп-закивака чије тело, након уградње, остаје шупље. Постоје и варијанте са накнадним попуњавањем ове шупљине. Други тип представљају поп-закивци са кидајућим трном, чији проширени део, након постављања трајно остаје у телу поп-закивка и врши његово затварање. Трн је на једном делу

ослабљен (редукована му је површина попречног пресека), тако да приликом његовог извлачења управо на том делу долази до тзв. програмираног лома (на предвиђеном месту). У оба случаја извлачење трна се врши помоћу посебних уређаја.

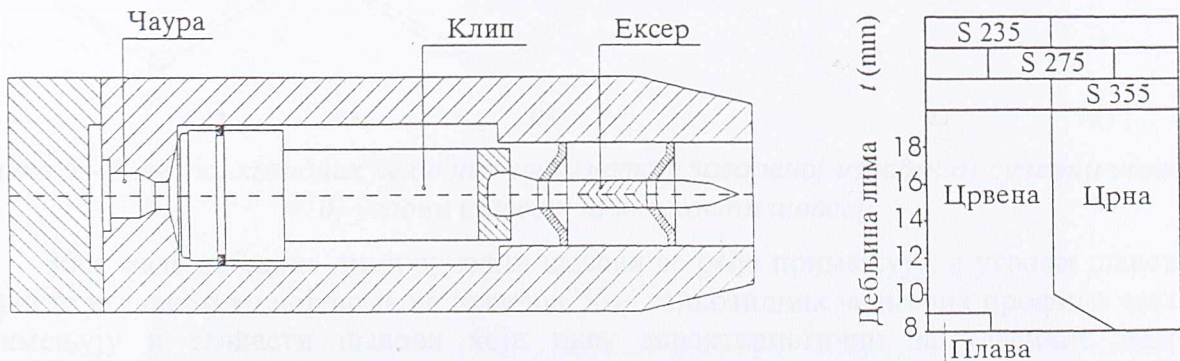
Примена поп-закивака у грађевинарству је скоријег датума и углавном је ограничена на лаке металне конструкције у зградарству. Пречници поп-закивака ( $d$ ) се крећу у опсегу од 2,6 mm до 6,4 mm. Уз ограничења везана за међусобна и ивична растојања ( $e_1 \geq 3d$ ;  $e_2 \geq 1,5d$ ;  $p_1 \geq 3d$ ;  $p_2 \geq 3d$ ), поп-закивци се користе у смичућим спојевима, док њихова примена у спојевима оптерећеним на затезање није у довољној мери испитана, па се не препоручује без посебних испитивања.

Ексери са експлозивним упуцавањем су још једна савремена механичка спојна средства. Област примене је слична као и код поп-закивака, а користе се и за причвршћивање кровних или зидних облога од профилисаног лима. Уграђују се машинским путем, помоћу посебних уређаја - "пиштоља", па је самим тим брзина, односно ефикасност извођења већа него код спојева са поп-закивцима. Један ексер се састоји из главе, трупа са наборима и шиљком и једне или две подлошке (слика 3).



Слика 3 - Различити типови ексера са експлозивним упуцавањем

"Пиштољ" којим се врши упуцавање ексера функционише на бази барутног пуњења (слика 4). Након експлозије барутног пуњења у посебно конструисаној касети (чаури), потискује се клип који удара у главу ексера и на тај начин га утискује у лим. Подлошке имају функцију да обезбеде правилан положај ексера током упуцавања и његово добро налегање након постављања. У случају када ексер служи за причвршћивање кровног покривача, на пример у виду профилисаног лима, онда се на главу ексера постављају заптивне капе које могу да буду од нерђајућег челика или пластике.



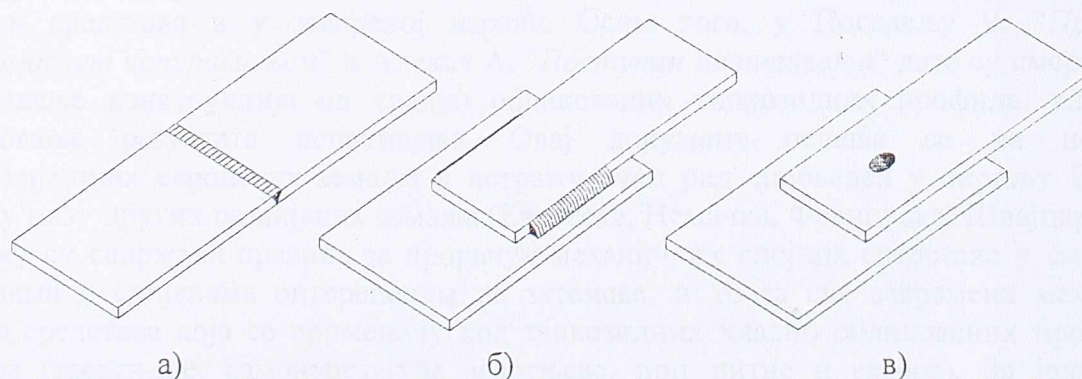
Слика 4 - Шематски приказ "пиштоља" за упуцавање ексера и препоруке за избор барутног пуњења

Интензитет силе удара треба да се одреди на основу дебљине лима ( $t_{sup}$ ) и квалитета основног материјала у који се ексер упуцава. Он се може контролисати подешавањем на самом пиштољу или избором врсте експлозивног пуњења (касете стандардизованих боја). Постоје препоруке на основу којих се, за различите врсте материјала и дебљине лима, може правилно изабрати тип барутног пуњења (видети слику 4). Контрола исправности упуцавања, може да се изврши на основу стања подлошке након постављања или на основу мерења дела ексера који је након упуцавања остао изнад горње површине елемента који се причвршћује. Када је ексер недовољно или превише упуцан треба га заменити.

Ексери се углавном израђују са пречницима ( $d$ ) од 3,7 mm, 4,5 mm и 5,2 mm. Дебљина носећег (доњег) лима ( $t_{sup}$ ) за који је причвршћен ексер не сме да буде мања од 4 mm, за ексере пречника  $d = 3,7$  mm, 6 mm за ексере пречника  $d = 4,5$  mm, односно 8 mm за ексере пречника  $d = 5,2$  mm. Имајући у виду ова ограничења може да се закључи да ексери са експлозивним упуцавањем имају примену само у случају причвршћивања танких лимова за лимове веће дебљине, јер се лимови од 6 и 8 mm не могу сматрати танкозидним. У случају затежућих спојева, без обзира на пречник ексера, дебљина носећег лима мора да буде већа или једнака од 6 mm ( $t_{sup} \geq 6$  mm). У том случају, дебљина лима који се везује ( $t$ ) може бити у границама од 0,5 до 1,5 mm. Поред тога треба истаћи да су минимална прописана ивична ( $e_1$  и  $e_2$ ) и међусобна ( $p_1$  и  $p_2$ ) растојања ексера већа него код поп-закивака и износе  $4,5d$ . Да би се обезбедила одговарајућа отпорност ексера на извлачење (чупање) неопходно је да дубина пенетрације буде минимум 10 mm.

Од технолошких поступака треба издвојити заваривање, с обзиром да поступци везивања на бази лепкова, најчешће од епоксида, нису још у довољној мери испитани и стога имају мању примену. Везе танкозидних челичних елемената у завареној изради могу да се остваре помоћу:

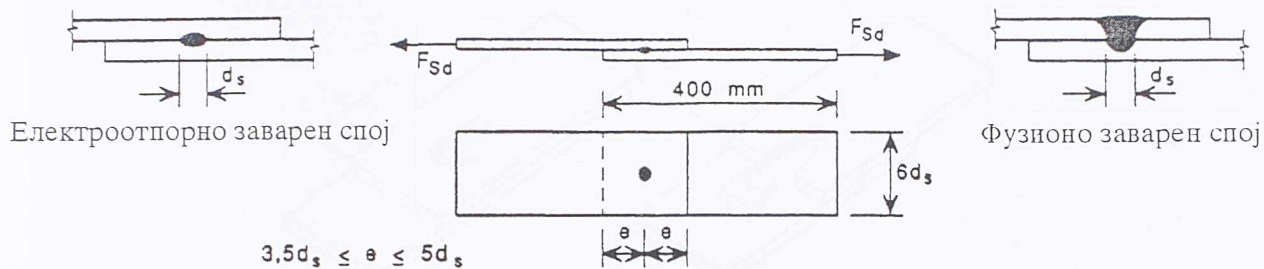
- сучеоних шавова (слика 5а),
- угаоних шавова (слика 5б) и
- тачкастих шавова (слика 5в).



Слика 5 - Везе танкозидних челичних елемената у завареној изради: а) сучеони шавови; б) угаони шавови; в) тачкасти шавови

Због мале дебљине лима сучеони шавови се ређе примењују, а угаони шавови се користе углавном у спојевима на преклоп. Код танкозидних челичних профила често се примењују и тачкасти шавови који нису карактеристични за класичне челичне конструкције. Њихова примена је ограничена на лимове дебљине до 4 mm, с тим да дебљина тањег елемента у споју не сме да буде већа од 3 mm. Изводе се

електроотпорним или фузионим поступком заваривања. У неким случајевима могућа је примена и издужених електролучних шавова.



Слика 6 - Узорак за одређивање стварног унутрашњег пречник  $d_s$  тачкастог шав

За разлику од сучеоних и угаоних шавова који обезбеђују континуалан ток силе, тачкастим заваривањем остварује се дисконтинуалан (тачкаст) пренос оптерећења, слично као и у случају веза са механичким спојним средствима. Величина унутрашњег пречника тачкастог шав ( $d_s$ ) зависи од поступка извођења (електроотпорно или фузионо заваривање) и може се одредити рачунским путем, али се препоручује да се стварна вредност унутрашњег пречника утврди експерименталним путем на узорцима прописаних димензија (слика 6). Тачкасти шавови примењују се само у спојевима оптерећеним на смицање.

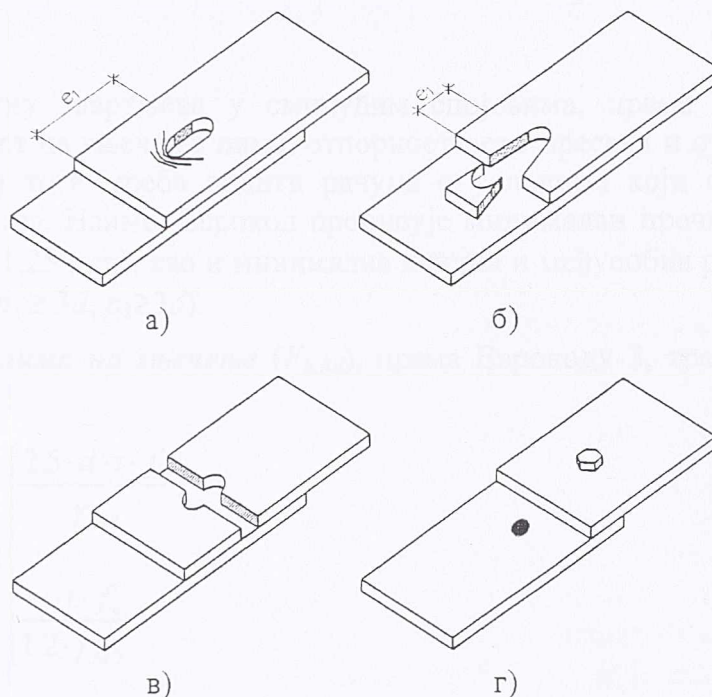
### 3 АКТУЕЛНА СВЕТСКА САЗНАЊА И ТЕНДЕНЦИЈЕ

Проблематика веза код хладно обликованих профила, као што је већ поменуто, није још у довољној мери обрађена, стога је и релативно мали број публикованих радова и књига који третирају ову материју. Тренута светска сазнања из ове обалсти су, у највећој мери, сажета у Еврокоду 3 Део 1.3, који у Поглављу 8: "Спојеве и везе" даје препоруке за пројектовање веза танкозидних челичних елемената помоћу механичких спојних средстава и у завареној изради. Осим тога, у Поглављу 9: "Прорачун потпомогнут испитивањем" и Анексу А: "Поступци испитивања" дате су смернице за испитивање конструкција од хладно обликованих танкозидних профила, као и за вредновање резултата испитивања. Овај документ ослања се на искуства најразвијенијих европских земаља и истраживачки рад спроведен у окриљу ЕССС-а, као и у низу других развијених земаља (Енглеска, Немачка, Француска, Швајцарска...). У њему су садржана правила за прорачун механичких спојних средстава у смичућим спојевима и спојевима оптерећеним на затезање, и то за сва савремена механичка спојна средства која се примењују код танкозидних хладно обликованих профила и лимова (завртњеве, самонарезујуће завртњеве, поп нитне и ексере). За један број карактеристичних видова лома нису дати изрази за прорачун, већ се препоручује експериментално одређивање носивости.

#### 3.1 СМИЧУЋИ СПОЈЕВИ

Без обзира на врсту механичког спојног средства, начини, односно механизми лома код смичућих спојева су слични. Према досадашњим сазнањима, поткрепљеним експерименталним и теоријским истраживањима, постоји четири карактеристична вида лома и то су:

- лом гњечењем лима (*bearing failure*),
- лом цепањем лима (*tearing or edge failure*),
- лом нето пресека (*net section failur*) и
- лом смицањем завртњева (*bolt shearing failur*).



Слика 7 - Карактеристични видови лома код смичућих спојева са механичким спојним средствима: а) лом гњечењем лима; б) лом цепањем лима; в) лом нето пресека; г) лом смицањем завртњева

Који, од поменутих видова лома ће наступити зависи од много фактора као што су: дебелина и квалитет лима, број и врста спојних средстава, ивично и међусобно растојање завртњева, итд.

Није редак случај да у једном споју дође до комбинације поменутих видова лома, на пример истовремено гњечење и цепање лима. Код веза на преклоп, због ексцентричног напрезања, јавља се још један вид комбинованог лома. То је лом кривљењем (*inclination failur*) који је комбинација гњечења (*bearing*) и закошења (*tilting*) лима и праћен је пробијањем главе завртња кроз лим.

За носивост спојног средства, односно везе треба да се усвоји минимална отпорност, имајући у виду све потенцијалне видове лома. Уколико се унапред, на основу искуства, не може искључити неки од наведених видова лома, онда је неопходно да се одреде отпорности спојног средства за сваки могући лом, те да се као меродавна усвоји минимална вредност.

Ова, генерална разматрања, која се односе на начине лома, као и на утврђивање отпорности, односно носивости спојних средстава, преточена су у правила за прорачун механичких спојних средстава код танкозидних хладно обликованих профила. Дакле, суштина је иста, а од прописа до прописа, могу се уочити разлике које су најчешће формалне природе.

С обзиром да је Еврокод тренутно најсавременији и најкомплетнији пропис из ове области, а имајући у виду и његову актуелност на нашем простору, правила за прорачун механичких спојних средстава (завртњева са навртком и самонарезујућих



завртњева) ће у овом раду бити приказана у складу са Еврокодом 3 (Део 1.3). Треба напоменути да су и све ознаке које се користе у овој дисертацији, такође, у складу са Еврокодом, управо из разлога унификације и лакше комуникације и сарадње.

### 3.1.1 Завртњеви

При прорачуну завртњева у смичућим спојевима, према Еврокоду 3, треба одредити: отпорност на гњечење лима, отпорност нето пресека и отпорност завртњева на смицање. Осим тога, треба водити рачуна о условима који ограничавају домен примене датих израза. Наиме, Еврокод прописује минималан пречник завртња ( $M6$ ) и дебљину лима ( $t \geq 1,25 \text{ mm}$ ), као и минимална ивична и међусобна растојања завртњева ( $e_1 \geq 1,5d$ ;  $e_2 \geq 1,5d$ ;  $p_1 \geq 3d$ ;  $p_2 \geq 3d$ ).

Отпорност лима на гњечење ( $F_{b,Rd}$ ), према Еврокоду 3, треба да се одреди на следећи начин:

$$F_{b,Rd} = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{2,5 \cdot d \cdot t \cdot f_u}{\gamma_{M2}} \\ \frac{e_1 \cdot t \cdot f_u}{1,2 \cdot \gamma_{M2}} \end{array} \right. \quad (1)$$

где су:

$d$  пречник завртња,

$t$  дебљина најтањег лима у споју,

$f_u$  чврстоћа основног материјала на затезање,

$e_1$  растојање од крајњег завртња до ивице лима у правцу деловања силе и

$\gamma_{M2}$  парцијални коефицијент сигурности за отпорност веза ( $\gamma_{M2} = 1,25$ ).

Отпорност нето пресека ( $F_{n,Rd}$ ) код танкозидних елемената спојених обичним завртњевима треба да се одреди на основу израза:

$$F_{n,Rd} = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{\left[ 1 - 3 \cdot r \cdot \left( 0,3 - \frac{d_0}{u} \right) \right] \cdot A_{net} \cdot f_u}{\gamma_{M2}} \\ \frac{A_{net} \cdot f_u}{\gamma_{M2}} \end{array} \right. \quad (2)$$

где су:

$d_0$  пречник рупе за спојна средства,

$A_{net}$  нето површина попречног пресека.

$r = \frac{\text{број завртњева у посматраном пресеку}}{\text{укупан број завртњева}}$ ,

$u = 2e_2$  али  $u \leq p_2$ .

Отпорност завртња на смицање ( $F_{v,Rd}$ ) за случај једносечне везе може да се одреди на основу следећег израза:

$$F_{v,Rd} = \frac{C_1 \cdot A_s \cdot f_{ub}}{\gamma_{M2}} \quad (3)$$

где су:

$C_1$  коефицијент који зависи од класе чврстоће завртња и одређује се на следећи начин:

$$C_1 = \begin{cases} 0,6 & \text{за завртњеве класе чврстоће 4.6, 5.6 и 8.8} \\ 0,5 & \text{за завртњеве класе чврстоће 4.8, 5.8, 6.8 и 10.9} \end{cases} \quad (4)$$

$A_s$  површина испитног пресека завртња и

$f_{ub}$  чврстоћа на затезање материјала од којег је израђен завртња.

Поред тога, треба истаћи да Еврокод 3 прописује и услов у погледу односа појединих отпорности. Овај услов може да се формулише на следећи начин: отпорност завртњева на смицање треба да буде за 20% већа од отпорности лима на гњечење и од отпорности нето пресека.

### 3.1.2 Самонарезајући завртњеве

За самонарезајуће завртњеве су у Еврокоду 3 - Део 1.3 дата правила за прорачун отпорности на гњечење лима и отпорности нето пресека, док отпорност на смицање самонарезајућих завртњева треба да се утврди експерименталним путем. Од услова под којим изрази за димензионисање важе треба истаћи оне који се тичу дебљине лима ( $3 \text{ mm} < t < 8 \text{ mm}$ ) и ивичних и међусобних растојања самонарезајућих завртњева ( $e_1 \geq 3d$ ;  $e_2 \geq 1,5d$ ;  $p_1 \geq 3d$ ;  $p_2 \geq 3d$ ).

*Отпорност лима на гњечење* код веза са самонарезајућим завртњевима може да се одреди на основу следећег израза:

$$F_{b,Rd} = \frac{\alpha \cdot d \cdot t \cdot f_u}{\gamma_{M2}} \quad (5)$$

Параметар  $\alpha$ , који фигурише у претходном изразу може да се одреди на следећи начин:

$$\alpha = \begin{cases} 3,2 \cdot \sqrt{t/d} & \text{за } t_1 = t \\ 2,1 & \text{за } t_1 \geq 2,5t \\ \text{линеарна интерполација} & \text{за } t < t_1 < 2,5t \end{cases} \quad (6)$$

где су  $t$  и  $t_1$  дебљина тањег, односно дебљег лима у споју, респективно.

*Отпорност нето пресека* код спојева са самонарезајућим завртњевима одређује се на основу познатог израза:

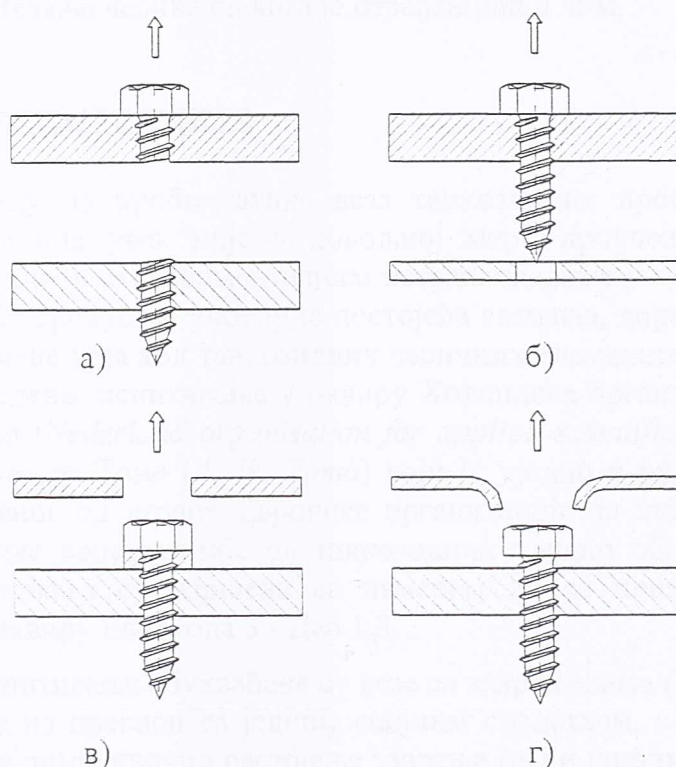
$$F_{n,Rd} = \frac{A_{net} \cdot f_u}{\gamma_{M2}} \quad (7)$$

Исти услови који важе за везе са завртњевима, а тичу се међусобних односа различитих отпорности важе и у случају веза са самонарезајућим завртњевима. Препорука за прорачун отпорности самонарезајућих завртњева на смицање, као што је већ поменуто, нема.

### 3.2 СПОЈЕВИ ОПТЕРЕЂЕНИ НА ЗАТЕЗАЊЕ

Везе танкозидних елемената код којих су спојна средства оптерећена у правцу своје осе потпуно се другачије понашају у односу на смичуће спојеве. Овакве везе најчешће се срећу при покривању или облагању објеката профилисаним лимом и углавном се изводе помоћу самонарезујућих завртњева. Извођење оваквих веза помоћу завртњева је непримерено и неекономично. Видови лома који се могу појавити код спојева оптерећених на затезање су следећи:

- лом завртња затезањем (*tension failur of screw*),
- лом чупањем (извлачењем) завртња из основног материјала (*pull-out failur*),
- лом пробијањем главе завртња (*pull- through failur*) и
- лом провлачењем главе завртња (*pull-over failur*).



Слика 8 - Видови лома веза са самонарезујућим завртњевима у спојевима оптерећеним на затезање: а) лом завртња затезањем; б) лом чупањем завртња; в) лом пробијањем; г) лом провлачењем

Последња два типа лома су у литератури често обједињена, а могу се срести и под једним или другим именом, али најчешће као лом пробијањем (*pull- through failur*). У Еврокоду 3 постоје изрази за прорачун отпорности лима на пробијање и чупање, а препоручује се да се носивост самонарезујућих завртњева на затезање одреди експерименталним путем.

Отпорност на пробијање ( $F_{p,Rd}$ ) главе завртња кроз лим, према Еврокоду 3, треба да се одреди на основу следећег израза:

$$F_{p,Rd} = \frac{d_w \cdot t \cdot f_u}{\gamma_{M2}} \quad (8)$$

где је  $d_w$  пречник подлошке, за коју се претпоставља да поседује довољну дебљину, односно крутост која спречава њену прекомерну деформацију и чупање преко главе



самонарезујућег завртња. Треба напоменути да код веза које су изложене цикличним оптерећењима, на пример услед дејства ветра, отпорност на пробијање, дефинисана изразом (9), треба да се редукује за 50%.

Отпорност на чупање ( $F_{o,Rd}$ ) завртња из доњег, основног материјала (лима), може да се одреди коришћењем израза:

$$F_{o,Rd} = \frac{0,65 \cdot d \cdot t_{sup} \cdot f_{u,sup}}{\gamma_{M2}} \quad (9)$$

где су:

$d$  пречник завртња,

$t_{sup}$  дебљина доњег лима и

$f_{u,sup}$  чврстоћа на затезање челика од кога је израђен доњи лим.

### 3.3 САВРЕМЕНЕ ТЕНДЕНЦИЈЕ

Имајући у виду да проблематика веза танкозидних профила са механичким спојним средствима још увек није у довољној мери проучена, данас се у свету наставља са теоријским и експерименталним истраживањима у овој области. Циљ тих истраживања је да се продубе и употпуне постојећа сазнања, дораде важећи прописи и прошири поље примене веза код танкозидних челичних елемената. У овом контексту су 2000. године спроведена испитивања у оквиру Холандске организације за примењена научна истраживања (*Nederland organization for applied scientific research - TNO*) под руководством професора Томе (*A. W. Tomà*) који је уједно и руководио Техничког комитета 10 основаног од стране Европске организације за стандардизацију (CEN), задуженог за челичне конструкције од танкозидних хладно обликованих профила и лимова. Ова испитивања су изршена са намером да се прошири област важења препорука датих у оквиру Еврокода 3 - Део 1.3.

Програмом испитивања обухваћене су везе са завртњевима (М8) и поп-закивцима. Испитиване су везе на преклоп са једним спојним средством, а варирани су следећи параметри: дебљина лима, ивично растојање завртња ( $e_1$ ) и ширина узорка. Поред тога, по први пут испитиване су везе са једноструким превојем лима на крају (слика 9), као и везе са континуланим двоструким закошеним превојем (слика 10).

Превасходни циљ ових истраживања је да се проучи понашање веза код изузетно танких лимова, као и у случајевима са малим ивичним растојањем завртњева или поп-закивака, те да се на извесан начин узме у обзир постојање превоја (једноструког или двоструког) на носивост везе. На овај начин би се проширила област примене механичких спојних средстава у односу на ону која је дефинисана Еврокодом. Наиме, у Еврокоду 3 је, као што је претходно речено, прописана минимална дебљина лима за везе са завртњевима  $t=1,25$  mm, и минимално ивично растојање у правцу деловања силе  $e_1=1,5d$ .

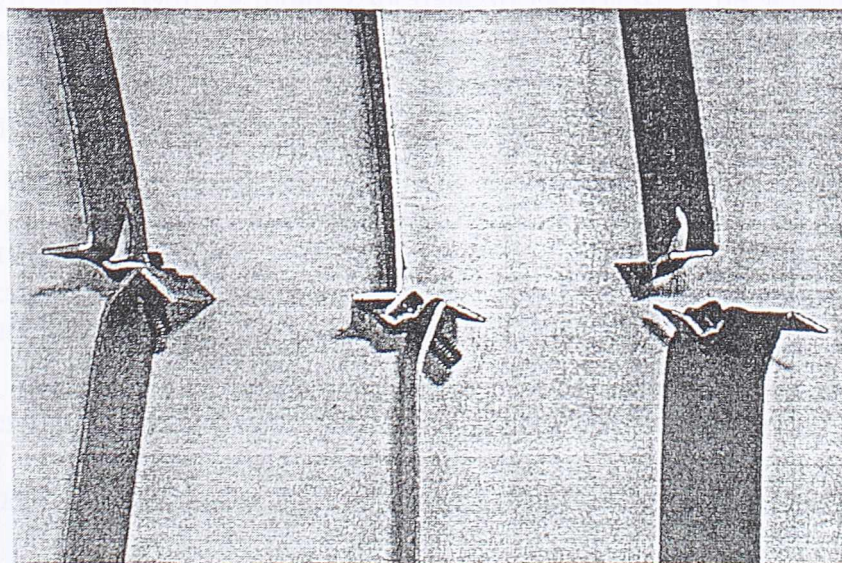
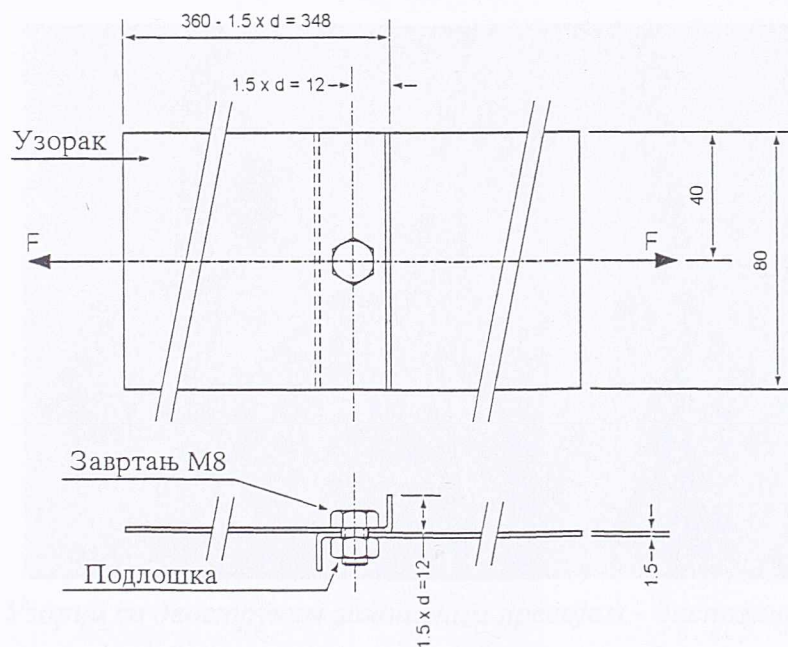
Поред веза са лимовима уобичајених дебљина, које се налазе унутар граница прописаних Еврокодом (1,5 mm и 2 mm), овим испитивањима су обухваћене и везе са изузетно танким лимовима, дебљине  $t=0,8$  mm. У закључцима који су дати у радном материјалу (*Design Tools and New Applications of Cold-Formed Steel in Buildings Final report of WP 2.2 New connection methods*) констатује се да, у погледу дебљине лима,

граница за примену завртњева може да се помери на  $t \geq 0,75$  mm, уз услов да се отпорност лима на гњечење одреди на основу израза:

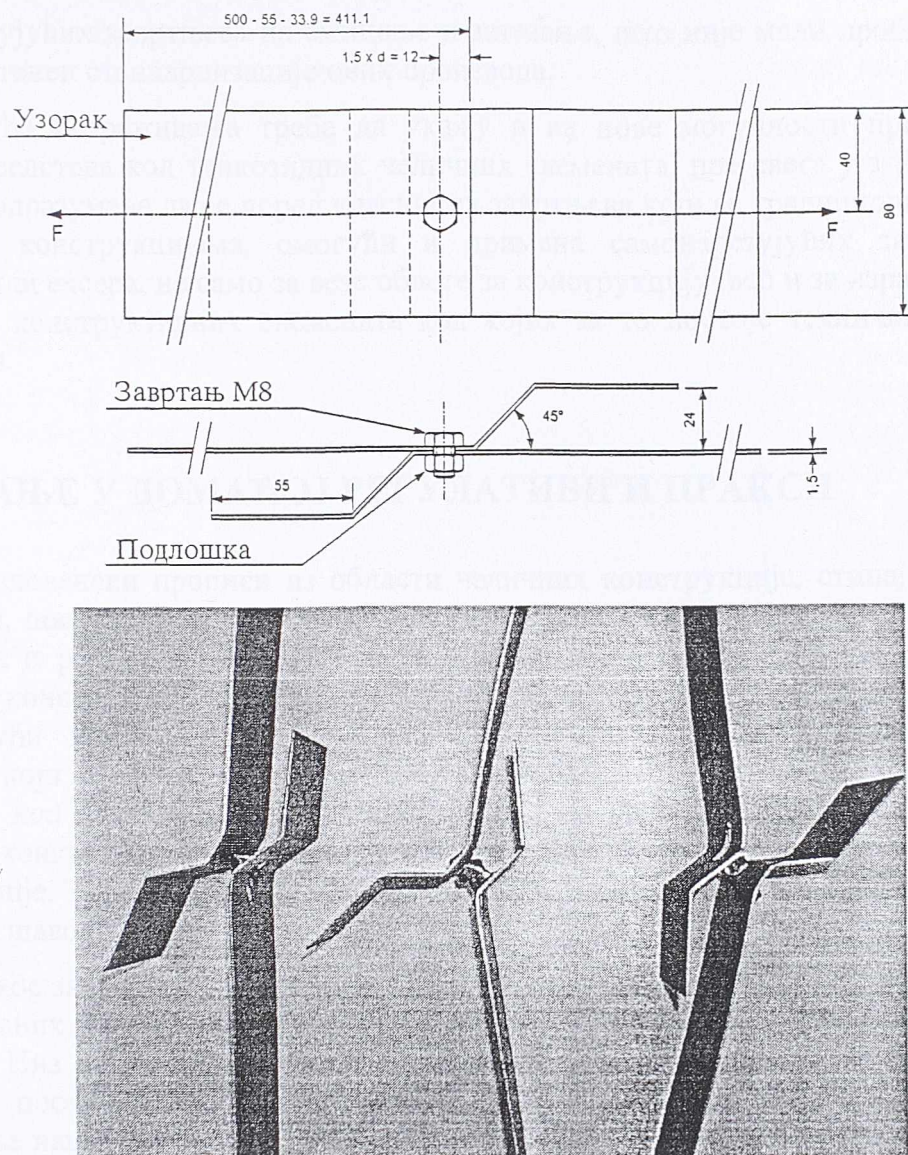
$$F_{b,Rd} = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{\alpha \cdot d \cdot t \cdot f_u}{\gamma_{M2}} \\ \frac{e_1 \cdot t \cdot f_u}{1,2 \cdot \gamma_{M2}} \end{array} \right. \quad (10)$$

где је  $\alpha$  фактор који треба да се одреди на следећи начин:

$$\alpha = \begin{cases} 0,8 \cdot t + 1,5 & \text{за } 0,75 \leq t \leq 1,25 \text{ mm} \\ 2,5 & \text{за } t > 1,25 \text{ mm} \end{cases} \quad (11)$$



Слика 9 - Узорци са једноструким ивичним превојем - диспозиција и облици лома



Слика 10 - Узорци са двоструким закошеним превојем - диспозиција и облици лома

Осим тога, услов који се односи на ивично растојање у правцу дејства силе ( $e_1$ ) може да се ублажи, па би он, по овим препорукама требало да буде  $e_1 \geq 1,0d$ . Треба напоменути и да ово проширење домена примене завртњева не захтева никакве измене у погледу прорачуна.

Што се тиче веза са ивичним превојем, да би се дефинисала правила за њихов прорачун неопходно је да се спроведу додатна истраживања којима би се обухватили сви релевантни утицаји. У закључку се истиче да би у новим испитивањима требало варирати следеће параметре: дебљина лима, ивична растојања ( $e_1$  и  $e_2$ ), пречник завртња, висину превоја и нагиб угла и дужину закошења.

Следећа фаза у научно истраживачком раду свакако би требало да буде спровођење сличних испитивања са самонарезајућим завртњевима и ексерима са експлозивним упуцавањем, како би се омогућило проширење поља примене и за ова спојна средства и на тај начин "покрила" сва механичка спојна средства обухваћена Еврокодом 3 - Део 1.3. Осим тога неопходно је да се утврде смернице и реални рачунски модели за одређивање отпорности оних видова лома који до сада нису обухваћени техничком регулативом. Овде се пре свега се мисли на отпорност

самонарезајућих завртњева на смицање и затезање, што није мали проблем с обзиром на низак степен стандардизације ових производа.

Будућа истраживања треба да укажу и на нове могућности примене оваквих спојних средстава код танкозидних челичних елемената, пре свега у зградарству. Под овим се подразумева да се поред класичних завртњева који се традиционално користе у челичним конструкцијама, омогући и примена самонарезајућих завртњева, поп-закивака или ексера, не само за везе облоге за конструкцију, већ и за израду наставака и веза оних конструктивних елемената код којих за то постоје техничка и економска оправдања.

#### 4 СТАЊЕ У ДОМАЋОЈ РЕГУЛАТИВИ И ПРАКСИ

Југословенски прописи из области челичних конструкција, стицајем различитих околности, последњих пар деценија нису усаглашавани са савременим међународним сазнањима и регулативом. Стога је разумљиво да, имајући у виду наглу експанзију челичних конструкција од хладно обликованих профила у овом периоду, не постоје одговарајући домаћи стандарди који би обухватили ову проблематику. Једини документ који само делимично третира ову проблематику су *Технички прописи за лаке грађевине код носећих челичних конструкција* из далеке 1965. године у коме нема довољно конкретних препорука на основу којих би се могле пројектовати овакве конструкције. У делу који се односи на везе једино постоје извесна правила за прорачун тачкастих шавова.

Упркос значајном броју произвођача танкозидних хладно обликованих профила и профилисаних лимова, недостатак техничке регулативе спутава њихову озбиљнију примену. Низ особености које се јављају код конструкција од хладно обликованих профила, посебно оних са отвореним попречним пресеком, као и недовољно образовање наших инжењера у овој области (не изучава се у оквиру редовних студија), такође, утичу на релативно малу примену оваквих конструкција у нашој земљи, без обзира на све њихове предности.

Ипак, то не значи да се и у нашим условима не могу наћи успешне примене хладно обликованих профила у носећим челичним конструкцијама. Углавном се њихов прорачун заснива на искуствима и прописима развијених европских земаља, као што су Немачка (DIN) и Енглеска (BS), а у новије време се користи и Еврокод 3 - Део 1.3. Иако је Савезни завод за стандардизацију још пре десетак година донео одлуку о неопходности израде стандарда за прорачун и конструисање челичних конструкција од хладно обликованих профила, ни до данас се у том послу није далеко одмакло. Имајући у виду напоре које се чине у домаћој стручној јавности на увођењу Еврокодова у нашу техничку регулативу, остаје нада да ће се у скорије време, у склопу глобалног пројекта усаглашавања домаће са међународном регулативом, као пропис у области хладно обликованих профила усвојити Еврокод 3 - Део 1.3.

Исту судбину деле и везе код конструкција од танкозидних лимова. Дакле, у Југославији не постоји документ који даје препоруке за прорачун веза танкозидних елемената изведених помоћу механичких спојних средстава. Што се тиче примене завртњева у класичним челичним конструкцијама постоје стандарди за прорачун обичних завртњева (ЈУС У.Е7.145/1987: "*Носеће челичне конструкције спојене заковицама и вијцима*" и ЈУС У.Е7.145-1/1991: "*Носеће челичне конструкције спојене*

заковицама и вијцима - *Измене и допуне*") и високовредних завртњева (ЈУС У.Е7.140/1985: "*Спојеви са вијцима високе класе чврстоће код носећих челичних конструкција*"), али би и они с обзиром на нова сазнања из ових области требало да буду иновирани. За самонарезујуће завртњеве нема никаквих препорука, као ни за класичне завртњеве, обичне или високовредне у случају челичних конструкција од танких лимова. Осим тога, постоје и неписана правила о минималном пречнику завртња (М12 у зградарству, односно М16 у мостоградњи) и минималном броју завртњева у вези (2 у зградарству и 3 у мостоградњи), која су непримерена за везе код конструкција од танких челичних лимова.

Поред поменутих стандарда за прорачун завртњева, треба истаћи да постоји и низ домаћих стандарда у којима су дефинисани облици и димензије завртњева, подлошки и навртки, и то како за обичне тако и за високовредне завртњеве, као и стандард за облике и димензије самонарезујућих завртњева. Такође, постоје и стандарди са прописаним толеранцијама израде и условима за материјале за израду завртњева.

Имајући у виду све претходно изнете чињенице може се констатовати да проблематика веза челичних конструкција од танкозидних профила није адекватно покривена домаћом регулативом, те да је неопходно убрзати активности на изради и усвајању прописа или стандарда из области челичних конструкција од танкозидних хладно обликованих профила у оквиру којих би се нашла и правила за прорачун веза. Такође је потребно да се, кроз курсеве, семинаре или на неки други начин побољша едукација инжењерског кадра из ове области, као и да се ова проблематика уврсти у програм редовних студија. На овај начин би се и у нашим условима на одговарајући начин могла пратити евидентна експанзија челичних конструкција од хладно обликованих профила која је приметна у свету последњих деценија.

## 5 ОСНОВНИ ЦИЉЕВИ ИСТРАЖИВАЊА

Када се анализирају претходно изречени ставови о тренутном стању научно-стручних сазнања и регулативе у области веза код танкозидних челичних елемената, као закључак се намеће неопходност даљих теоријских и експерименталних истраживања у овој области. Ово посебно важи за нашу земљу, с обзиром на недостатак адекватног истраживачког рада и одговарајуће техничке регулативе. У том контексту треба схватити и ову дисертацију која првенствено има за циљ да отвори, или бар одшкрине, врата широј примени механичких спојних средстава, односно завртњева са навртком и самонарезујућих завртњева код танкозидних челичних лимова у нашој земљи. Осим тога, намера аутора ове дисертације је да се код нас, у што је могуће већој мери, афирмише примена челичних конструкција од хладно обликованих профила.

Осим ових генералних циљева, чије остварење ће моћи да се оцени од стране компетених стручњака, али и шире инжењерске јавности, постоји и низ конкретних циљева који су зацртани већ при самом избору теме овог рада. Један од главних задатака ове дисертације је да се, на основу опсежног експерименталног рада, праћеног теоријском и нумеричком анализом, утврде основна правила и законитости у понашању смичућих спојева изведених помоћу завртњева са навртком и самонарезујућих завртњева код танкозидних челичних елемената. Осим поменутих истраживања, која представљају тежиште дисертације, она се делом бави и испитивањима спојева



изведених помоћу самонарезујућих завртњева, који су оптерећени на затезање, односно у правцу осе завртња. Сви резултати испитивања, и нумеричких и експерименталних ће бити анализирани и вредновани и контексту постојећих иностраних препорука за прорачун и rezultata, у свету спроведених, сличних експеримената.

## Поглавље 1:

# Основна механичка спојна средства

## 1. ЗАВРТЊЕНИ

Иако се, према неким изворима, број облика завртњева појављују још 139. године пре Христа, већина изумљених врста у челичним конструкцијама у грађевинарству појављује се у другој половини двадесетог века. Због великог различитог машинског индустрије, укључујући и аутомобилства, дошло је до развоја нових типова завртња. Давном напредном у области металургије, одговарајућим зварљивим високе класе челицима (ликоварским челицима), као и развојем неколико различитих контролних процедура, завртњацима је пружено завртњева и код различитих оптерећења конструкција као што су на пример дрвених и железних конструкција, код којих су до сада за изградњу коришћени искључиво челици.

Иако је у виду познатих врста од којих су изумљени: једноставни и брзи монтаж и демонтаж од временских услова, у складу са изумљеним различитим облицима средстава, неки специјални облици различитог облика, као и други облици, челици, завртњаци су готово у потпуности потпуно изумљени, до су у изградњи главна средства у различитим облицима конструкцијама.

Данас се у челичним конструкцијама у грађевинарству примењују две основне групе завртњака:

- обични завртњаци

- самокренени завртњаци

Они се разликују по облику и детаљима, али према томе по конструкцији различита од која су изумљена. Они тако треба да имају да изумљеним завртњацима могу да се примењују у различитим случајима, што је случај са обичним завртњацима. Стога се код различитих случајева, конструкцијама обично примењују различити облици завртњака, који се обично користе у различитим случајима, као што је случај са самокрененим завртњацима, који се примењују у различитим случајима, као што је случај са обичним завртњацима. У случају изумљених обичних завртњака, обично код којих су завртњаци оптерећени у правцу своје осе, такође треба да се примењују у различитим случајима, као што је случај са обичним завртњацима.

### 1.1. ОБЛИЦИ И ДИМЕНЗИЈЕ

Завртњаци се данас могу срести у готово свим врстама грађевинарских конструкција, тако у грађевинарству као и у машиници. У складу са применом завртњака у различитим облицима и метричким мерним вредностима ИСО стандарду (ISO 898-1:2000) "Метрички стандарти пројектни ИСО профили - Просте, челичне конструктивне металне"

## Поглавље 1:

# Основна механичка спојна средства

## 1 ЗАВРТЊЕВИ

Иако се, према неким изворима, први облици завртњева појављују још 239. године пре Христа, њихова интензивнија примена у челичним конструкцијама у грађевинарству почиње тек у првој половини двадесетог века, када, захваљујући наглом развоју машинске индустрије, успевају да буду конкурентни, до тада неприкосновеним закивцима. Даљим напретком у области металургије, односно производњом завртњева високе класе чврстоће (високовредни завртњеви), као и освајањем технике њиховог контролисаног преднапрезања омогућена је примена завртњева и код динамички оптерећених конструкција као што су на пример друмски и железнички мостови, код којих су до тада за израду веза коришћени искључиво закивци.

Имајући у виду низ предности од којих су најважније: једноставнија и бржа монтажа независна од временских услова, уједначеност квалитета уграђеног спојног средства, нижи степен квалификација радне снаге, као и друге економске аспекте, завртњеви су готово у потпуности потиснули закивке, те су уз заваривање главна спојна средства у савременим челичним конструкцијама.

Данас се у челичним конструкцијама у грађевинарству примењују две основне групе завртњева:

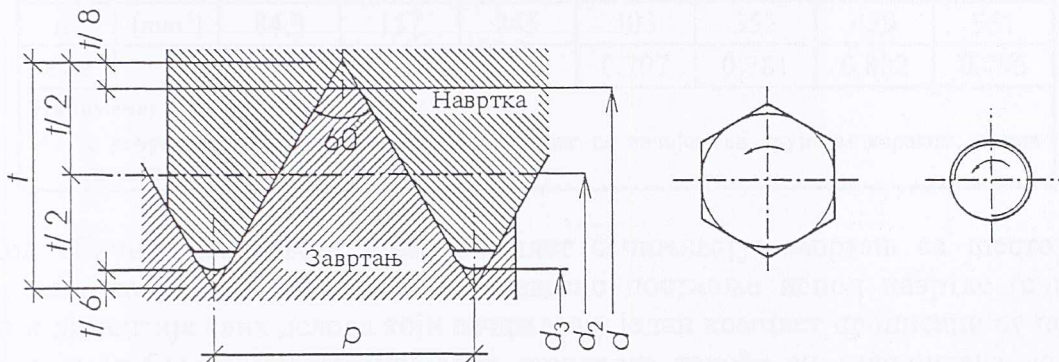
- обични завртњеви и
- високовредни завртњеви.

Они се разликују по облику и димензијама, али пре свега по квалитету материјала од кога су израђени. Осим тога, треба истаћи да високовредни завртњеви могу да се примењују у преднапрегнутим спојевима, што није случај са обичним завртњевима. Стога се код динамички оптерећених конструкција обавезно примењују преднапрегнути високовредни завртњеви, док се обични завртњеви примењују углавном код конструкција са преовлађујућим мирним, статичким оптерећењем. У везама оптерећеним на затезање, односно код којих су завртњеви оптерећени у правцу своје осе, такође треба да се примењују преднапрегнути високовредни завртњеви, без обзира на природу оптерећења.

### 1.1 ОБЛИЦИ И ДИМЕНЗИЈЕ

Завртњеви се данас могу срести у готово свим врстама челичних конструкција, како у зградарству тако и у мостоградњи. Углавном се примењују завртњеви са шестоугаоном главом и метричким навојем према ИСО стандарду (ЈУС М.Б0.014-1977: "Метрички навој са троугластим ИСО профилом - Пресек, језгра, испитни пресек и

угао завојнице за навоје са крупним и ситним кораком"). У челичним конструкцијама у грађевинарству обично се користе завртњеве са десним навојем и крупним кораком, према ЈУС М.Б0.12. Завртњеве са левим навојем морају да имају посебне, уочљиве ознаке, најчешће на глави (слика 11б).



Слика 11 - Основне димензије метричког навоја и његово означавање

На слици 11а приказане су карактеристичне, стандардизоване димензије навоја на основу којих се може одредити површина испитног пресека ( $A_s$ ). То су:

- $d$  номинални (називни) пречник завртња,
- $d_2$  средњи пречник навоја ( $d_2 = d + 2 \cdot t/8 - 2 \cdot t/2 = d - 3/4 \cdot t$ ),
- $d_3$  пречник језгра завртња ( $d_3 = d + 2 \cdot t/8 - 2 \cdot t + 2 \cdot t/6 = d - 17/12 \cdot t$ ),
- $p$  корак навоја који зависи од пречника завртња, (нпр. за М12  $p = 1,75$  mm),
- $t$  висина навоја ( $t = p/(2 \cdot \tan 30^\circ) = p \cdot \sqrt{3}/2 = 1,155 \cdot p$ ).

Табела 1 - Референтни југословенски стандарди за појединачне делове обичних и високовредних завртњева

Елемент	Ознака стандарда	Назив стандарда
<b>Обични завртњеве</b>		
Завртањ	ЈУС М.Б1.068	Вијци са шестостраном главом за челичне конструкције
Навртка	ЈУС М.Б1.601	Шестостране навртке средње класе израде
Подлошка	ЈУС М.Б2.015	Подлошке за вијке за челичне конструкције
<b>Високовредни завртњеве</b>		
Завртањ	ЈУС М.Б1.066	Вијци са шестостраном широком главом за спојеве носећих челичних конструкција, класе израде Б
Навртка	ЈУС М.Б1.629	Шестостране широке навртке за спојеве носећих челичних конструкција, класе израде Б
Подлошка	ЈУС М.Б2.030	Подлошке за високо преднапегнуте спојеве у челичним конструкцијама

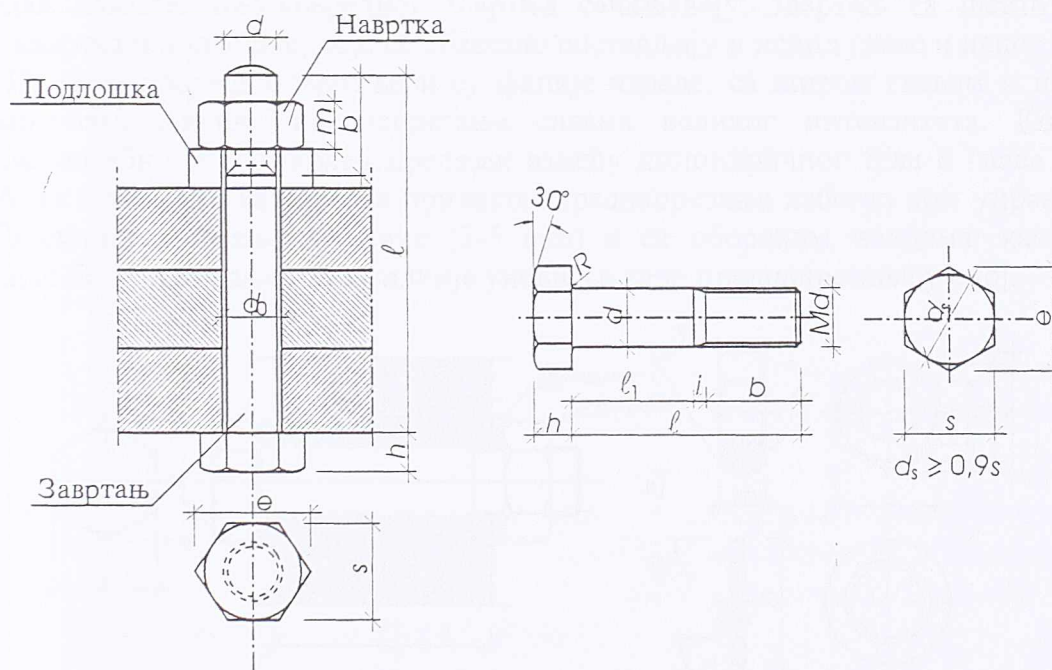
Површина испитног пресека ( $A_s$ ) је величина од виталног значаја за прорачун носивости завртњева, како у смичућим, тако и у спојевима оптерећеним на затезање. Она представља површину лома попречног пресека завртња при одређивању његове чврстоће на затезање и може да се одреди на основу израза:

$$A_s = \frac{\pi}{4} \cdot \left( \frac{d_2 + d_3}{2} \right)^2 = 0,785 \cdot (d - 0,9382 \cdot p)^2. \quad [\text{mm}^2] \quad (12)$$

Табела 2 – Површине попречних и испитних пресека за завртњеве стандардних димензија

Завртањ		M12	M16	M20	M22	M24	M27	M30
$A$	[mm <sup>2</sup> ]	113	201	314	380	452	572	706
$A_s$	[mm <sup>2</sup> ]	84,3	157	245	303	353	459	561
$A_s/A$	-	0,746	0,781	0,780	0,797	0,781	0,802	0,795
Напомена: $A_s$ је површина испитног пресека за завртњеве са навојем са крупним кораком, према стандарду ЈУ М.Б0.014-1977.								

Код обичних завртњева један комплет сачињавају: завртањ са шестоугаоном главом, навртка и подлошка, која се обавезно поставља испод навртке (слика 12). Облици и димензије свих делова који сачињавају један комплет прописани су посебним стандардима (табела 1). У оквиру ових стандарда такође су дефинисана дозвољена одступања (толеранције), као и правила за обележавање. Осим тога дате су и везе са другим стандардима, првенствено у погледу врсте материјала од кога се израђују предметни делови.



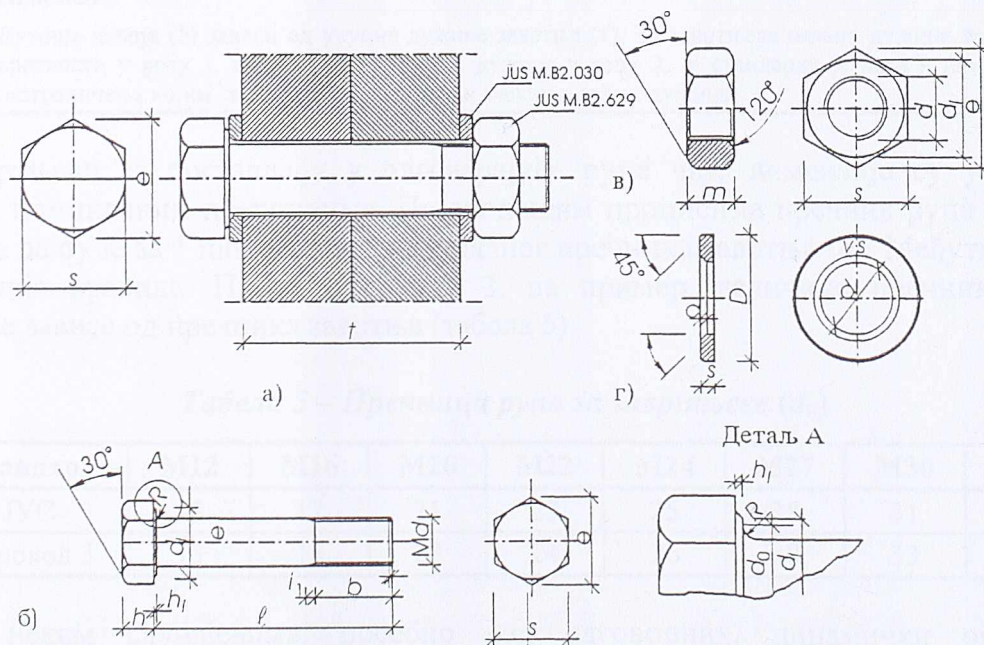
Слика 12 - Делови једног комплета обичног завртња

Основне димензије делова стандардних обичних завртњева, према релевантним стандардима (табела 1), дате су у табели 3. Ознаке у овој табели су у потпуности у складу са сликом 12. Дужина завртњева ( $l$ ) је такође стандардизована и креће се у границама од 25 mm до 200 mm, у зависности од номиналног (називног) пречника завртња и стезне дужине, односно дебљине пакета елемената који се спајају, и то у интервалима од по 5 mm. Како је дужина навоја ( $b$ ) константна за поједини пречник завртња, то значи да варира само дужина дела цилиндричног тела без навоја ( $l_1$ ). На овај начин, имајући у виду да је дебљина подлошке 8 mm, омогућава се да, за произвољну стезну дужину ( $l_2$ ), раван смицања не пресеца део тела завртња са навојем, те је носивост завртња на смицање сразмерна површини попречног пресека тела завртња а не површини испитног пресека.

Табела 3 - Основне димензија делова стандардних обичних завртњева [mm]

Ознака	M12	M16	M20	M22	M24	M27	M30
Завртањ							
$b$	19,5	23	26	28	29,5	32,5	35
$i$	2,5	3,0	4,0	4,0	4,5	4,5	5,0
$e$	20,88	26,17	32,95	35,03	39,55	45,20	50,85
$h$	8	10	13	14	15	17	19
$s$	19	24	30	32	36	41	46
$R$	0,6	0,6	0,8	0,8	0,8	1,0	1,0
Навртка							
$m$	10	13	16	18	19	22	24
Подлошка							
$d_0$	14	18	22	24	26	30	33
$D$	24	30	37	39	44	50	56

Један комплет високовредног завртња сачињавају: завртањ са шестоугаоном главом, навртка и подлошке, које се обавезно постављају и испод главе и испод навртке (слика 13). Високовредни завртњеви су финије израде, са широм главом и навртком што омогућава њихово преднапрезање силама великог интензитета. Код ових завртњева посебно је обликован прелазак између цилиндричног тела и главе (видети детаљ А на слици 13), како би се приликом преднапрезања избегао лом управо у том делу. Подлошке су мање дебљине (3-5 mm) и са обореним ивицама, како би се обезбедило боље налегање и правилније уношење силе преднапрезања у спој.



Слика 13 – Високовредни завртањ: а) комплетан завртањ у вези; б) завртањ; в) навртка; г) подлошка

Димензије високовредних завртњева према важећим домаћим стандардима (табела 1) дате су у оквиру табеле 4. Ознаке у овој табели су у складу са сликом 13, а високовредни завртњеви се испоручују у стандардним дужинама које се крећу од 30

mm до 200 mm у зависност од пречника завртња. У случају потребе могу се наручити и завртњеви веће или евентуално мање дужине.

Табела 4 – Основне димензије стандардних високовредних завртњева [mm]

Ознака		M12	M16	M20	M22	M24	M27	M30
<b>Завртањ</b>								
$b$	1	21	26	31	32	34	37	40
	2	23	28	33	34	37	39	42
$h_i$	min	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
	max	0,6	0,6	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
$d_{a,max}$		15,2	19,2	24	26	28	32	35
$d_{i,min}$		20	25	30	34	39	43,5	47,5
$e_{min}$		23,91	29,56	35,03	39,55	45,20	50,85	55,37
$h$		8	10	13	14	15	17	19
$R_{min}$		1,2	1,2	1,5	1,5	1,5	2	2
$s$		22	27	32	36	41	46	50
<b>Навртка</b>								
$m$		10	13	16	18	19	22	24
<b>Подлошка</b>								
$d_0$		13	17	21	23	25	28	31
$D$		24	30	37	39	44	50	56
$s$		3	4	4	4	4	5	5
<b>Напомена:</b>								
Дужина навоја ( $b$ ) зависи од укупне дужине завртња ( $\ell$ ). За завртњеве мањих дужина важе вредности у реду 1, а за завртњеве већих дужина у реду 2. У стандарду је дата и линија разграничења којим се дефинишу завртњеви мањих и већих дужина.								

Завртњеви се постављају у одговарајуће рупе чије димензије су у складу са њиховим номиналним пречницима. Према нашим прописима пречник рупе за завртањ ( $d_0$ ) треба да буде за 1 mm већи од номиналног пречника завртња ( $d$ ). Међутим, постоје и другачија правила. Према Еврокоду 3, на пример, величине пречника рупа за завртњеве зависе од пречника завртња (табела 5).

Табела 5 – Пречници рупа за завртњеве ( $d_0$ )

Стандард	M12	M16	M20	M22	M24	M27	M30	M36
ЈУС	13	17	21	23	25	28	31	37
Еврокод 3	13	18	22	24	26	30	33	39

У неким случајевима, посебно код одговорних, динамички оптерећених конструкција могу да се примене и завртњеви са тачним налегањем - упасовани завртњеви. Код ових завртњева тело завртња (стабло) је посебно обрађено, тако да се зазор ( $\Delta d = d_0 - d$ ) налази унутар прописаних граница ( $\Delta d \leq 0,3$  mm). Применом упасованих завртњева смањује се деформабилност везе и конструкције и повећава њена отпорност на замор, али је извођење конструкција са оваквим спојним средствима доста компликовано, управо због овако строгих толеранција.

Означавање завртњева у техничкој документацији, као и у поруџбинским листама, такође је стандардизовано. Ознака треба да садржи све неопходне податке о облику и димензијама завртња, стандарду према којем је израђен и материјалу од кога је израђен. Начин означавања завртњева према нашем стандарду приказан је у табели 6.

Табела 6 - Означавање завртњева према југословенском стандарду

Ознака навоја	Називни пречник	Дужина завртња	Стандард по којем је израђен завртањ	Ознака квалитета материјала завртња
-	[mm]	[mm]	-	-
M <sup>1)</sup>	<i>d</i>	<i>ℓ</i>	ЈУС ... <sup>2)</sup>	## <sup>3)</sup>
<p><b>Напомене:</b>  <sup>1)</sup> М се односи на метрички навој, а " је ознака за Витвортов навој  <sup>2)</sup> Ознака стандарда се може изоставити у техничкој документацији.  <sup>3)</sup> Ознака класе чврстоће завртња (арапски бројеви раздвојени тачком).</p> <p><b>Примери:</b>  M20×60 ЈУС М.Б1.068 5.6 или скраћено M20×60...5.6  (Обичан завртањ са метричким навојем, пречника 20 mm, дужине 60 mm, класе чврстоће 5.6 израђен према ЈУС М.Б1.068)  M20×60 ЈУС М.Б1.066 10.8 или скраћено M20×60...10.9  (Високовредан завртањ са метричким навојем, пречника 20 mm, дужине 60 mm, класе чврстоће 10.9 израђен према ЈУС М.Б1.066)</p>				

Означавање навртки и подлошки је такође стандардизовано. Ознаке за подлошке код обичних завртњева садрже на првом месту ознаку квалитета израде (А за грубу израду без посебне обраде спољашњих површина, Б за средњу израду), потом пречник рупе  $d_0$  у милиметрима и стандард по коме се израђују. Код високовредних завртњева подлошке се обележавају на готово идентичан начин. Једина измена је у томе што се изоставља ознака за квалитет израде (груба израда није дозвољена). Подлошке за високовредне завртњеве израђују се као и завртњеви од челика високог квалитета. Код навртки треба да се означи тип навоја (метрички или Витвортов), називни пречник завртња у милиметрима, стандард по коме је израђена навртка и квалитет материјала (код навртки за обичне завртњеве). У челичним конструкцијама у грађевинарству углавном се примењују навртке средње класе израде (Б).

## 1.2 МАТЕРИЈАЛИ ЗА ИЗРАДУ

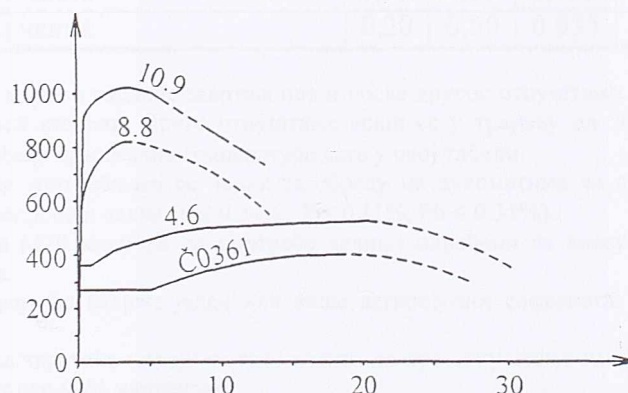
Квалитет материјала од кога је завртањ израђен битно утиче на његову носивост. Стога, челични материјали за израду завртњева подлежу строгој техничкој контроли и високо су стандардизовани. У домаћој регулативи врста и квалитет материјала за израду завртњева дефинисани су стандардом ЈУС М.Б1.023-1983: *Вијци са утврђеним особинама - Технички услови*. У овом стандарду су, такође, прописана правила за проверу квалитета завртња. Наиме, прописана су стандардна испитивања за проверу, пре свега, механичких карактеристика завртњева, али и неких других битних својстава као што је на пример разугљеничење. Нека од стандардних испитивања механичких карактеристика завртњева су: испитивање затезањем на епрувети, испитивање затезањем на завртњу, испитивање тврдоће, испитивање затезне чврстоће на косом ослонцу итд. Квалитет завртњева са утврђеним механичким карактеристикама дефинише се класом чврстоће, која се означава са два арапска броја раздвојена тачком. Први број означава стоти део називне (номиналне) чврстоће на затезање у МПа

( $f_u/100$ ), а други десетоструку вредност односа границе развлачења ( $f_y$ ) или техничке границе развлачења ( $f_{0,2}$ ), код високовредних завртњева код којих нема изражене границе развлачења, и чврстоће на затезање ( $10 \cdot f_y/f_u$  или  $10 \cdot f_{0,2}/f_u$ ). У табели 7 дате су механичке карактеристике за завртњеве свих класа чврстоће. Класа чврстоће, као једна од најбитнијих карактеристика завртња, мора да буде трајно обележена на његовој глави. Најчешће се назначаване класе чврстоће врши на горњој страни главе завртња у виду рељефне или урезане ознаке, или се пак класа чврстоће може урезати на једној од бочних страна шестоугаоне главе.

Табела 7 - Механичке карактеристике завртњева стандардних класа чврстоће

МПа	Обични завртњеви					Високовредни завртњеви			
	4.6	4.8	5.6	5.8	6.8	8.8	9.8	10.9	12.9
$f_u$	400	400	500	500	600	800	900	1000	1200
$f_y$ или $f_{0,2}$	240	320	300	400	480	640	720	900	1080

Обични завртњеви се израђују од стандардних угљеничних челика, са особинама сличним општим конструкционим челицима, док се високовредни завртњеви израђују од челика високог квалитета код којих није јасно изражена граница развлачења. Дијаграми напон-дилатација ( $\sigma - \epsilon$ ) челика за завртњеве карактеристичних класа чврстоће приказани су на слици 14.



Слика 14 - Карактеристични  $\sigma - \epsilon$  дијаграми

За завртњеве који се не испитују на затезање у циљу одређивања механичких карактеристика, постоје прописане максималне, односно минималне вредности садржаја појединих хемијских елемената, то јест стандардом је прописан хемиски састав челика за њихову израду (табела 8) као и начин и услови евентуалне термичке обраде (нпр. отпуштање).

За навртке и подлошке је као и за завртњеве стандардом утврђен квалитет материјала. Навртке се израђују у класама чврстоће 4, 5, 6, 8, 10, 12 и 14, према стандарду ЈУС М.Б1.028-1974: *Навртке са прописаним особинама - Технички услови за израду и испоруку*. Број којим се означава класа чврстоће навртке представља стоти део њене чврстоће на затезање ( $f_u/100$ ) у МПа, исто као први број у ознакама класа чврстоће завртњева. Класа чврстоће навртке треба да одговара првом броју класе чврстоће завртња са којим је у комплекту. Подлошке за високовредне завртњеве се



израђују од челика високог квалитета чија је чврстоћа на затезање 1000 МПа или 1200 МПа, док се подлошке за обичне завртњеве израђују од обичних угљеничних челика.

Табела 8 - Прописани хемијски састав челика за израду завртњева

Класа чврстоће завртња	Материјал и термичка обрада	C		P	S	Температура отпуштања <sup>1)</sup> °C
		min	max			
		%	%			
4.6 <sup>2)</sup>	Угљенични челик	-	0,55	0,05	0,06	-
4.8 <sup>2)</sup>						
5.6						
5.8 <sup>2)</sup>						
6.8 <sup>2)</sup>						
8.8 <sup>6)</sup>	Угљенични челик за каљење са додацима В, Мп или Сг	0,15	0,35	0,04	0,05	425
8.8 <sup>3)</sup>	Угљенични челик за каљење	0,25	0,55	0,04	0,05	450 <sup>7)</sup>
9.8 <sup>6)</sup>	Угљенични челик за каљење са додацима В, Мп или Сг	0,15	0,35	0,04	0,05	410
9.8	Угљенични челик за каљење	0,25	0,55	0,04	0,05	410
10.9 <sup>6)</sup>	Угљенични челик за каљење са додацима В, Мп или Сг	0,15	0,35	0,04	0,05	340
10.9 <sup>5)</sup>	Угљенични челик за каљење	0,25	0,55	0,04	0,05	425
	Угљенични челик за каљење са додацима В, Мп или Сг	0,20				
	Легирани челик <sup>4)</sup>	0,20				
12.9 <sup>5)</sup>	Легирани челик <sup>4)</sup>	0,20	0,50	0,035	0,035	380

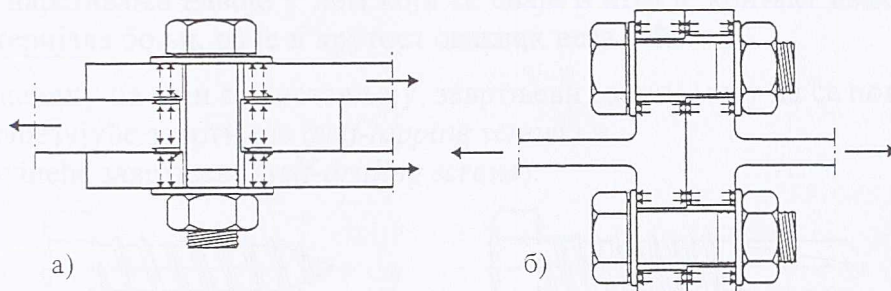
**Напомене:**

- 1) Средња вредност три мерења тврдоће завртња пре и после другог отпуштања на сме се разликовати за више од 20 Викерсових степени. Друго отпуштање врши се у трајању од 30 минута на температури мањој за 10°C од утврђене минималне температуре дате у овој табели.
- 2) За ове класе чврстоће употребљава се челик за обраду на аутоматима са прописаним максималним садржајем сумпора, фосфора и олова ( $S \leq 0,34\%$ ,  $P \leq 0,11\%$ ,  $Pb \leq 0,35\%$ ).
- 3) За завртњеве веће од М20 могу да се употребе челици одређени за класу 10.9 да би се постигла одговарајућа чврстоћа.
- 4) Легирани челици морају да садрже један или више легирајућих елемената: хром, никл, молибден и ванадијум.
- 5) Материјали ових класа чврстоће морају се тако калити да пре отпуштања имају структуру материјала у језгру навојног дела са око 90% мартензита
- 6) Код завртњева израђених од угљеничних мартензитних челика са мањим садржајем угљеника ознака класе чврстоће мора да буде подвучена цртом како је назначено у овој табели.
- 7) За завртњеве пречника већег од М20 користи се температура отпуштања од 425°C.

### 1.3 ПОЉЕ ПРИМЕНЕ

Завртњеви се данас примењују у готово свим областима челичних конструкција у грађевинарству и то углавном за израду веза и монтажних наставка. У погледу напрезања могу се успешно примењивати у смичућим спојевима, спојевима оптерећеним на затезање, као и у комбиновано оптерећеним спојевима (истовремено смицање и затезање). У зградарству код претежно мирних, статичких оптерећења уобичајена је примена обичних завртњева различитих класа чврстоће, у складу са интензитетом оптерећења и врстом основног материјала. Када је оптерећење већег интензитета могу се применити високовредни завртњеви са и без силе преднапрезања. Код динамички оптерећених конструкција (кранске стазе, железнички и друмски

мостови) углавном се примењују високовредни завртњеве са пуном силом преднапрезања. Међутим, с обзиром на висок квалитет, односно носивост и малу разлику у цени високовредни завртњеве могу да буду успешно и економично примењени и у многим другим случајевима. Треба истаћи да је, када се преднапрегнути високовредни завртњеве примењују у смичућим спојевима, неопходна посебна обрада и заштита површина споја како би се обезбедио одговарајући, пројектовани коефицијент трења између контактних површина и истовремено његова постојана антикорозиона заштита.



Слика 15 - Преднапрегнути високовредни завртњеве: а) у смичућем споју; б) у споју оптерећеном на затезање

Према одредбама Еврокода 3 завртњеве у металним конструкцијама могу да се примењују у пет различитих категорија веза:

- категорија А - везе са смичућим спојевима код којих завртњеве носе смицањем и притиском по омотачу рупе, а могу се изводити помоћу обичних и високовредних завртњева свих класа чврстоће од 4.6 до 10.9;
- категорија Б - везе са смичућим спојевима остварене помоћу високовредних завртњева са пуном силом преднапрезања, отпорне на проклизавање при граничном стању употребљивости, код којих се гранично стање носивости достиже на исти начин као и код категорије А (смицањем тела завртња и притиском по омотачу рупе), али се при граничном стању употребљивости не дозвољава проклизавање;
- категорија Ц - везе са смичућим спојевима остварене помоћу високовредних завртњева са пуном силом преднапрезања, отпорне на проклизавање при граничном стању носивости, код којих ни при граничном стању носивости не долази до проклизавања везе;
- категорија Д - везе оптерећене на затезање изведене помоћу обичних или високовредних завртњева без силе преднапрезања, и за њих се примењују све класе чврстоће од 4.6 до 10.9;
- категорија Е - везе оптерећене на затезање остварене са високовредним завртњевима са пуном силом преднапрезања.

У зависности од категорије везе прописани су и прорачунски услови који морају да буду задовољени при разматраним граничним стањима носивости, односно употребљивости.

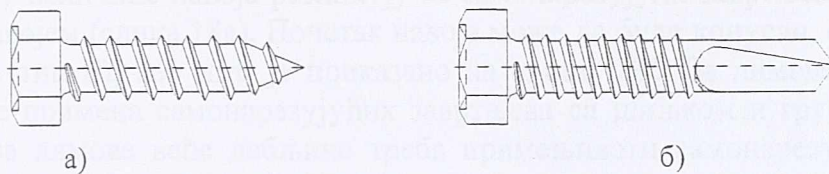
У погледу квалитета материјала, треба истаћи да се у нашој земљи најчешће примењују обични завртњеве класе чврстоће 5.6 и високовредни завртњеве класе чврстоће 10.9.

## 2 САМОНАРЕЗУЈУЋИ ЗАВРТЊЕВИ

Данас се у свету користе различите врсте завртњева за лим. Њихова заједничка особина је да су обликовани и изведени тако да могу да образују (урежу) навој у лиму за који се везују, односно причвршћавају. Конструкција самонарезујућих завртњева им омогућава примену и код веза са једном неприступачном страном. Предности у односу на класичне завртњеве су у томе што отпада потреба за навртком или додатним операцијама нарезивања навоја у лим који се спаја и што је контакт између завртња и основног материјала бољи, па је и крутост оваквих веза већа.

Према начину на који се постављају, завртњеви за лим могу да се поделе на:

- самонарезујуће завртњеве (*self-tapping screws*) и
- самобушеће завртњеве (*self-drilling screws*).



Слика 16 - Различите врсте завртњева за лим: а) самонарезујући; б) самобушећи

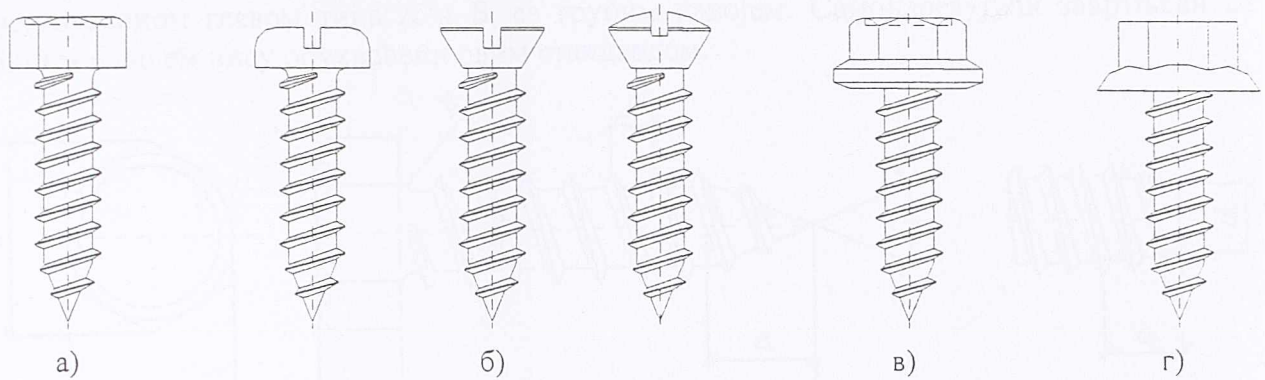
**Самонарезујући завртњеви** (слика 16а) се постављају ручно или машински у већ припремљене рупе чији је пречник мањи од називног пречника завртња. Они се урезају у челичне материјале који имају мању тврдоћу од самог завртња. Будући да се ови завртњеви изводе са површински очврслим, цементираним слојем њихова примена је могућа код свих стандардних конструкционих челика.

**Самобушећи завртњеви** (слика 16б) имају посебно обликован врх у облику завршетка бургије и уграђују се искључиво машинским путем, директним бушењем у основни материјал. Дакле, код оваквих завртњева није потребно претходно бушење рупа. Монтажа је бржа и једноставнија, а обавља се бушилицама са великим бројем обртаја (1500 о./мин). Примена самобушећих завртњева је знатно мања у односу на самонарезујуће, првенствено због њихове цене и потребе за посебном опремом за уградњу.

### 2.1 ОБЛИЦИ И ДИМЕНЗИЈЕ

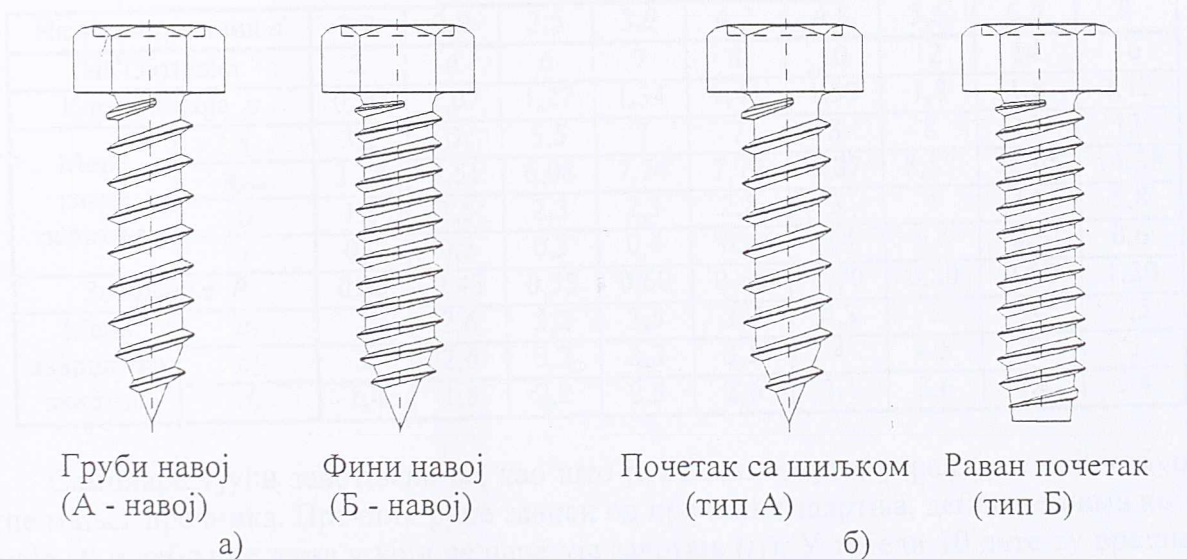
У савременим челичним конструкцијама се користе самонарезујући завртњеви различитих облика. Најчешће су то разлике у погледу облика главе, корака навоја и облика почетка навоја.

Главе самонарезујућих завртњева су најчешће шестоугаоног облика (слика 17а) али могу бити и коничног облика упуштене или полуупуштене са обичним или крстастим урезом за завијач (слика 17б). Поред тога, у новије време се израђују самонарезујући завртњеви са шестоугаоном главом у коју је интегрисана (утиснута) заптивка (слика 17в), као и са главом израђеном од синтетичких материјала, односно пластике (слика 17г).



Слика 17 - Облици глава самонарезујућих завртњева: а) шестоугаона; б) упуштена и полуупуштена; в) шестоугаона са утиснутом заштитком; г) пластична

У погледу величине навоја разликују се самонарезујући завртњеве са грубим (А) и финим (Б) навојем (слика 18а). Почетак навоја може да буде конусан, са шиљком (тип А), или раван (тип Б), као што је приказано на слици 18б. За лимове мале дебљине препоручује се примена самонарезујућих завртњева са шиљком и грубим или финим навојем, док за лимове веће дебљине треба примењивати самонарезујуће завртњеве типа Б са финим навојем (Б-навој). Навој се налази дуж читавог завртња, док код типа А шиљак може да буде израђен без навоја, у сагласности са наручиоцем.

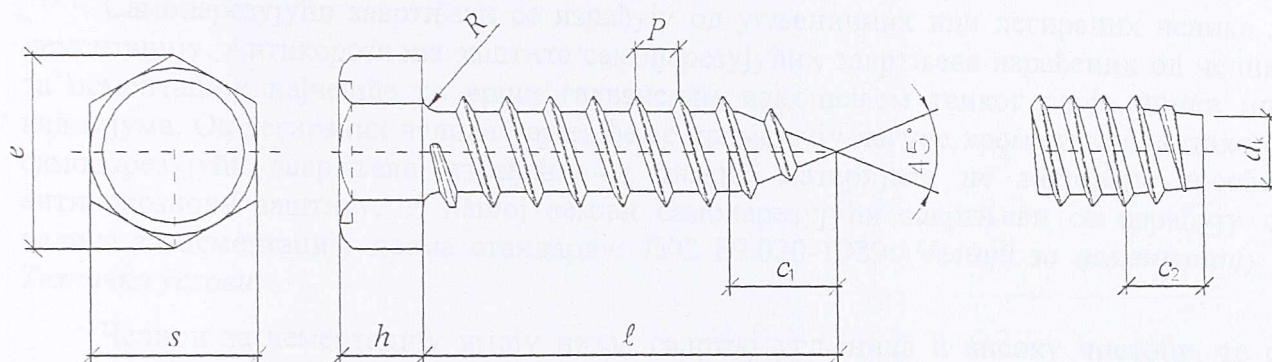


Слика 18 - Врсте навоја и облици његовог почетка

Када се самонарезујући завртњеве користе за причвршћивање кровног покривача (нпр. трапезастог лима) испод главе завртња се обавезно поставља заштитна плочица. Поред заштивања споја заштитна плочица повећава носивост завртња и спречава евентуална оштећења декоративних површина приликом монтаже. Постоје различите врсте заштитних плочица. Оне су најчешће сферног облика, а израђују се од метала и синтетичких материјала. Јако добро су се показале заштитне плочице од метала са вулканизираним еластомером, односно неопреном.

Наша техничка регулатива дефинише облике и димензије самонарезујућих завртњева стандардом ЈУС М.Б1.455-1970: Вијци за лим са шестоугаоном главом. У овом стандарду дати су облици и димензије самонарезујућих завртњева са

шестоугаоном главом типа А и Б, са грубим навојем. Самонарезујући завртњеве са финим навојем нису обухваћени овим стандардом.



Слика 19 - Основне димензије самонарезујућег завртња са шестоугаоном главом

Основне димензије самонарезујућих завртњева (слика 19) приказане су у табели 9. Све димензије у овој табели изражене су у милиметрима. Код нас се, као и у свету, највише примењују самонарезујући завртњеви називног пречника  $d = 6,3$  mm. Када су напрезања већег интензитета примењују се завртњеви пречника  $d = 8$  mm.

Табела 9 - Димензије стандардних самонарезујућих завртњева са шестоугаоном главом

Називни пречник $d$	2,2	2,9	3,5	3,9	4,2	4,8	5,5	6,3	8	
ИСО ознака	2	4	6	7	8	10	12	14	16	
Корак навоја $p$	0,79	1,07	1,27	1,34	1,41	1,59	1,8	1,8	2,12	
Мере главе завртња	$s$	3,2	5	5,5	7	7	8	8	10	13
	$e_{\min}$	3,48	5,51	6,08	7,74	7,74	8,87	8,87	11,05	14,38
	$h$	1,3	1,5	2,3	2,3	2,8	3	4	4,8	5,8
	$t$	0,2	0,3	0,3	0,4	0,4	0,4	0,4	0,5	0,6
Заобљење $R$	0,35	0,45	0,55	0,60	0,65	0,70	0,80	0,90	1,20	
Мере завршетка завртња	$c_1$	2	2,6	3,2	3,5	3,7	4,3	5	6	7,5
	$c_2$	2	2,6	3,2	3,3	3,5	4	4,5	5	5
	$d_k$	1,4	1,8	2,2	2,5	2,6	3,1	3,6	4,2	5,4

Самонарезујући завртњеви се, као што је већ поменуто, уграђују у већ избушене рупе мањег пречника. Пречник рупе зависи од пречника завртња, дебљине лима који се везује ( $t$ ) и дебљине лима у који се нарезује завртањ ( $t_1$ ). У табели 10 дате су вредности пречника рупа које се препоручују за стандардни самонарезујући завртањ пречника  $d = 6,3$  mm у зависности од дебљина лимова  $t$  и  $t_1$ .

Табела 10 - Стандардни пречници рупа за самонарезујуће завртњеве

[mm]	Дебљина доњег лима $t_1$							
$t$	0,88	1,00	1,13	1,25	1,50	2 - 5	5 - 6	6 - 25
0,88	4,5	4,5	4,5	4,5	5,0	5,3	5,5	5,7
1,00	-	4,5	4,5	4,5	5,0			
1,13	-	-	4,5	4,5	5,0			
1,25	-	-	-	4,5	5,0			
1,50	-	-	-	-	5,0			
2,00	-	-	-	-	-			

## 2.2 МАТЕРИЈАЛИ ЗА ИЗРАДУ

Самонарезујући завртњеве се израђују од угљеничних или легираних челика за цементацију. Антикорозиона заштита самонарезујућих завртњева израђених од челика за цементацију најчешће се врши галванским nanoшењем танког слоја цинка или кадмијума. Од легираних челика најчешће се примењују легуре хрома и никла, тако да самонарезујући завртњеве израђени од оваких материјала не захтевају посебну антикорозиону заштиту. У нашој земљи самонарезујући завртњеве се израђују од челика за цементацију према стандарду: ЈУС Б9.020-1989: *Челици за цементацију – Технички услови.*

Челици за цементацију имају низак садржај угљеника и високу чистоћу, те се стога производе са великом пажњом у строго контролисаним условима. Након обogaћивања површинских слојева угљеником (наугљичење или карбонизација) врши се каљење и тако настају комади, односно елементи код којих се површински слојеви одликују великом тврдоћом и отпорношћу на хабање, а језгра остају релативно мека и жилава. Између тврдих површинских слојева и меког језгра налази се прелазна зона у којој тврдоћа опада од површине ка унутрашњости завртња. Дакле, цементација је процес термичке обраде челика који се састоји из две операције: карбонизације и каљења. Избор челика за цементацију се врши на основу следећих критеријума односно захтева:

- постизање тражене површинске тврдоће,
- остварење задовољавајуће чврстоће на затезање језгра пресека и
- обезбеђење довољне жилавости и динамичке отпорности.

Ако се правилно изабере режим карбонизације (температура и време трајања) и средство за карбонизацију, захтев у погледу површинске тврдоће се може остварити код готово свих челика за цементацију. Испуњење другог захтева, који се тиче механичких карактеристика језгра пресека, код елемената малог попречног пресека постиже се адекватним избором садржаја угљеника. Код елемената већих димензија испуњење ових захтева се остварује правилним избором и дозирањем легирајућих елемената који повећавају прокаљивост. Треба напоменути да се о механичким карактеристикама карбонизираних и каљеног елемента не може судити на основу механичких карактеристика (чврстоће на затезање) слепо каљене пробе. Вредности механичких својстава добијене на овај начин могу послужити само као компаративне. Повољније је и препоручује се да се чврстоће језгра оцене према Доминијевој (*Jominy*) кривој прокаљивости. У погледу трећег услова треба рећи да се жилавост цементираног дела мора испитати на епруветама са истом дужином карбонизације, а не на слепо каљеној епрувети.

Од челика за цементацију осим завртњева за лим израђују се и сворни завртњеве, зглобови, вретена, чауре, делови за писаће и рачунске машине и други делови машинске индустрије који треба да имају велику тврдоћу површинског слоја и отпорност на хабање уз задовољавајуће механичке карактеристике унутрашњег дела, односно језгра.

За израду самонарезујућих завртњева се, углавном примењују угљенични челици који се могу сврстати у две групе:

- *квалитетни угљенични челици (Ћ1120, Ћ1220) и*

- племенити угљенични челици (Ћ1121, Ћ1221) који се од претходних разликују по већој уједначености и чистоћи, а имају и већу жилавост, односно контракцију пресека.

Табела 11 – Хемијски састав и механичке карактеристике челика за цементацију

Ознака челика			Ћ1120	Ћ1121	Ћ1220	Ћ1221
Хемијски састав	C	%	0,07 – 0,13	0,07 – 0,13	0,12 – 0,18	0,12 – 0,18
	S <sub>i,max</sub>	%	0,40	0,40	0,40	0,40
	Mn	%	0,30 – 0,60	0,30 – 0,60	0,30 – 0,60	0,30 – 0,60
	P <sub>max</sub>	%	0,045	0,035	0,035	0,035
	S <sub>max</sub>	%	0,045	0,035	0,035	0,020 – 0,035
Механичке карактеристике (за Ø11 mm)	f <sub>y,min</sub>	MPa	380	380	430	430
	f <sub>t</sub>	MPa	650 – 800	650 – 800	750 – 900	750 – 900
	δ <sub>5,min</sub>	%	13	13	12	12
	Ψ <sub>min</sub>	%	35	40	30	35

Хемијски састав као и механичке карактеристике челика за цементацију које се односе на округли челик у слепо каљеном стању (табела 11) су стандардизовани. Треба напоменути да су вредности механичких карактеристика дате у стандарду ЈУС Б9.020-1989 само информативне. Дакле, самонарезујући завртњеве не спадају у завртњеве са прецизно утврђеним механичким карактеристикама.

### 1.3 ПРИМЕНА У ГРАЂЕВИНАРСТВУ

Поред примене у машинској индустрији самонарезујући завртњеве се примењују и у грађевинарству, и то највише за везивање профилисаног лима или сличних материјала за облагање, за носећу челичну конструкцију. У последње време у свету је приметна већа примена специјалних механичких спојних средстава, у које свакако спадају и самонарезујући завртњеве у носећим челичним конструкцијама од танкозидних хладно обликованих профила. Уз адекватно конструисање и прорачун, али и коректно извођење самонарезујући завртњеве могу да се користе и у спојевима оптерећеним на смицање и у спојевима оптерећеним на затезање, као и у спојевима код којих се истовремено јављају оба вида напрезања. Приметна је улога ових завртњава код конструкција код којих је примењен такозвани стресд-скин (*stressed-skin*) концепт пројектовања.

Даља афирмација и примена ових спојних средстава код носећих челичних конструкција у грађевинарству, поготово у нашој средини, један је од циљева израде ове дисертације.

## Поглавље 2:

# Приказ експерименталних испитивања

## 1 ПРОГРАМ ИСПИТИВАЊА

Ради утврђивања понашања и носивости веза танкозидних челичних елемената остварених завртњевима и самонарезајућим завртњевима у оквиру ове дисертације спроведена су опсежна експериментална истраживања. Испитано је око стотину узорака веза код којих су механичка спојна средства оптерећена на смицање или затезање. Највећи број узорака односио се на смичуће спојеве, јер опис понашања ових спојева представља тежиште дисертације, док је проблем оптерећења спојева на затезање обрађен у нешто мањем обиму. Поред тога извршено је испитивање основног материјала од којег су израђени узорци, како би се одредиле његове стварне механичке карактеристике и испитивање завртњева на затезање ради утврђивања њихове носивости и класе чврстоће.

Код веза са завртњевима оптерећеним на смицање варирана су четири параметра која битно утичу на њихову носивосте:

- тип везе (везе на преклоп и везе са подвезицама),
- дебљина лима ( $t = 2$  и  $4$  mm),
- врста спојног средства (обични и преднапрегнути високовредни завртњеви и две врсте самонарезајућих завртњева) и
- ивично растојање завртња ( $e_1 = 20$  и  $40$  mm).

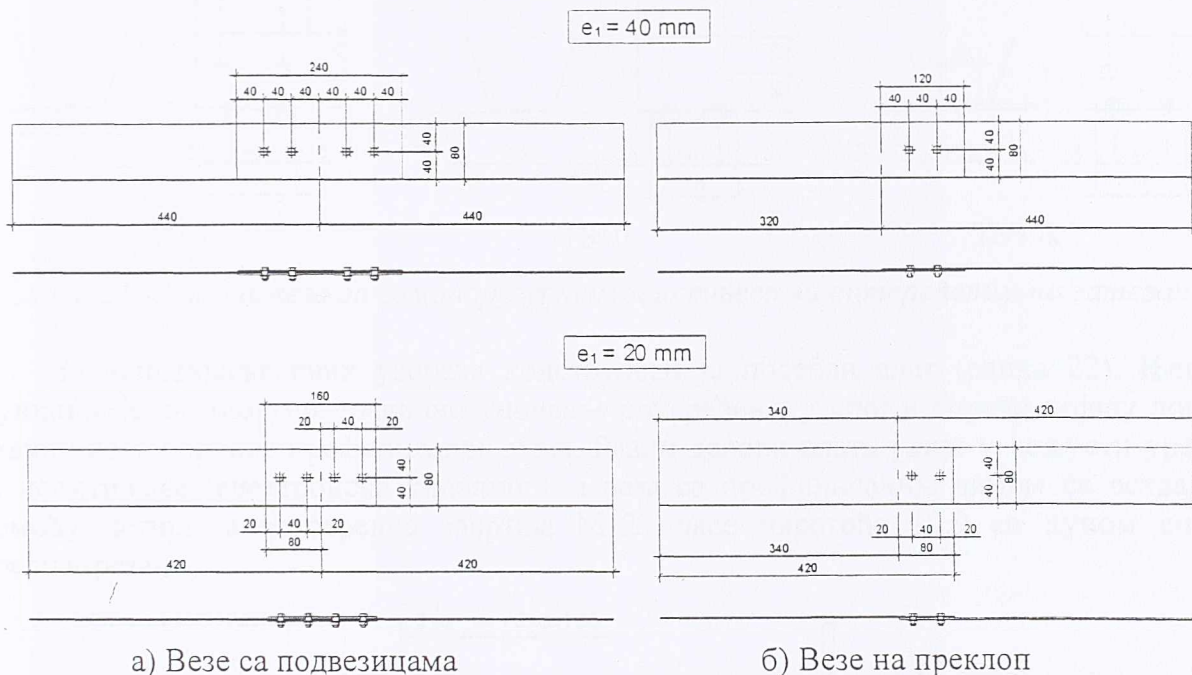
Да би се извели одговарајући закључци и упоредили резултати различитих серија, неопходно је да се у једној серији узорака варира само један од поменутих параметара. Имајући у виду да су анализирана четири поменута параметра, за испитивање је предвиђено укупно 26 серија: по осам серија за везе са обичним и оба типа самонарезајућих завртњева и две серије за везе са преднапрегнутим високовредним завртњевима. Због веома мале стезне дебљине и великих губитака силе притезања, нису испитиване везе са лимовима дебљине  $t = 2$  mm, нити везе на преклоп изведене помоћу високовредних завртњева.

Све везе су изведене са по два завртња са једне стране. За израду узорака коришћени су обични завртњеви М8 класе чврстоће 5.8, високовредни завртњеви М8 класе чврстоће 10.9 и самонарезајући завртњеви тип А, пречника 6,3 mm. Димензије испитиваних узорака приказане су на слици 20.

Узорци су означени великим латиничним словима и арапским бројевима (алфанумерички), на систематичан начин како би на основу ознаке могло недвосмислено да се утврди о којој серији и узорку је реч. Прво слово у ознаци дефинише начин напрезања. За смичуће спојеве то је S (*shear*), а за спојеве оптерећене



на затезање  $T$  (*tension*). Друго слово означава врсту спојног средства:  $B$  (*bolts*) за обичне завртњеве,  $H$  (*high resistance bolts*) за високовредне завртњеве,  $S$  (*screws*), односно  $T$  за самонарезујуће завртњеве. Ознаком на трећем месту дефинише се тип везе. Везе на преклоп означене су латиничним словом  $L$  (*lap*), а везе са подвезицама словом  $S$  (*strap*). Осталим, нумеричким ознакама дефинише се дебљина лима и ивично растојање. У табели 21 приказан је начин означавања серија узорака. Различити узорци унутар исте серије обележавају се арапским бројем (1-4) иза ознаке серије.



а) Везе са подвезицама

б) Везе на преклоп

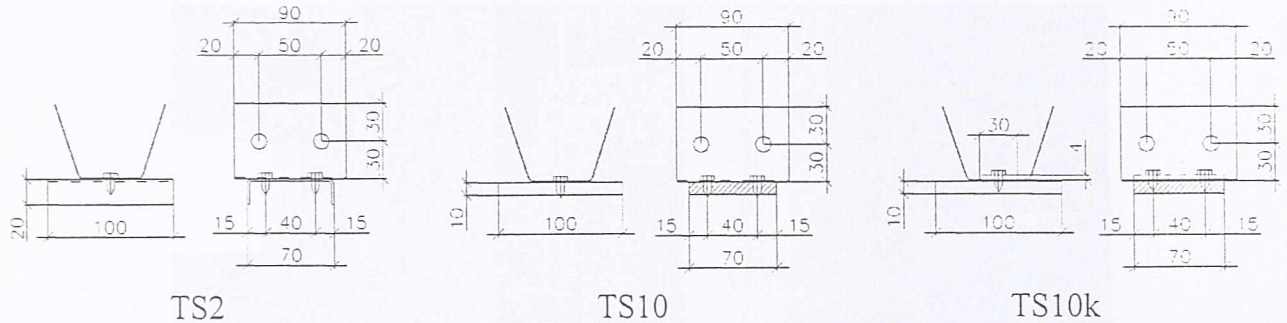
Слика 20 - Узорци испитиваних веза са механичким спојним средствима оптерећеним на смицање

Табела 12 - Начин означавања серија испитиваних узорака

Ознака на првом месту	Начин напрезања	S	Смицање
		T	Затезање
Ознака на другом месту	Врста спојног средства	B	Обични завртњеви
		H	Преднапрегнути високовредни завртњеви
		S	Самонарезујући завртњеви - А
		T	Самонарезујући завртњеви - Б
Ознака на трећем месту	Тип везе	S	Везе са подвезицама
		L	Везе на преклоп
Ознака на четвртм месту	Дебљина лима	2	Лимови дебљине 2 mm
		4	Лимови дебљине 4 mm
Ознака на петом месту	Ивично растојање	1	Ивично растојање $e_1 = 20$ mm
		2	Ивично растојање $e_1 = 40$ mm
<p>Напомена:                      Ознаке на четвртм и петом месту раздвојене су цртицом.                      Пример:                      Серија узорака оптерећених на смицање, са везом на преклоп и обичним завртњевима, израђена од лимова дебљине 2 mm, са ивичним растојањем <math>e_1 = 20</math> mm, означава се: SBL2-1.</p>			

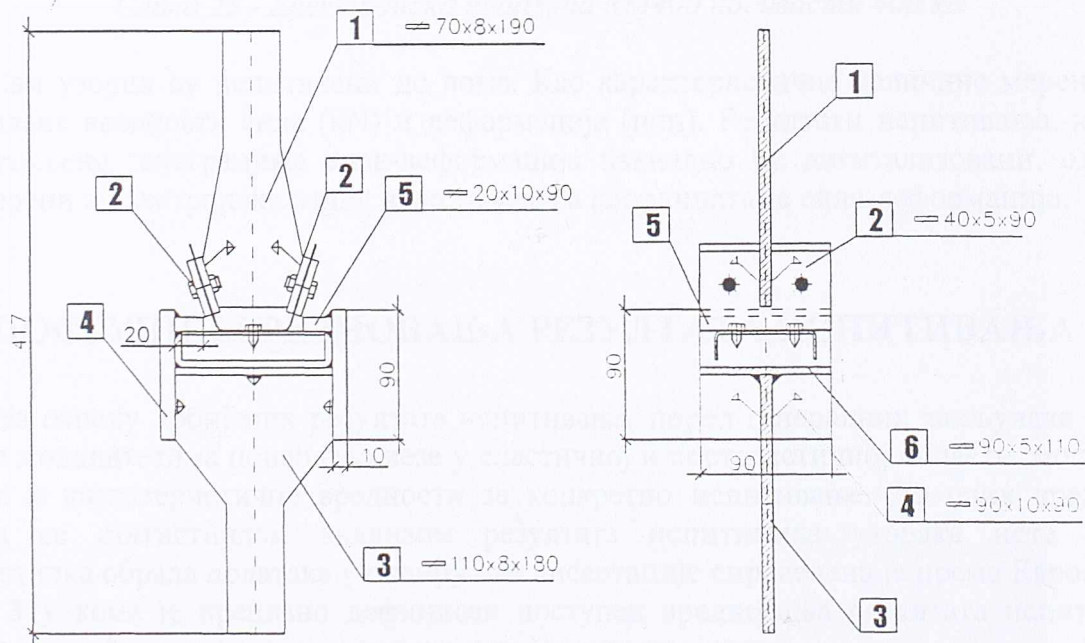
Испитивање веза са самонарезујућим завртњевима оптерећеним на затезање спроведено је на три серије узорака (слика 21). Код ових узорака варирана је дебљина

доњег, носећег лима ( $t_{sup}$ ) у који се завртањ урезује ( $t_{sup} = 2$  и  $10$  mm), док су облик и димензије горњег лима били исти за све узорке. У једној серији (TS10k), испод глава самонарезујућих завртњева, постављене су челичне контра-плоче дебљине  $4$  mm, како би се спречио лом пробијањем главе завртња. Горњи лим је добијен сечењем профилисаног трапезастог лима дебљине  $1$  mm.



Слика 21 - Узорци веза са самонарезујућим завртњевима оптерећеним на затезање

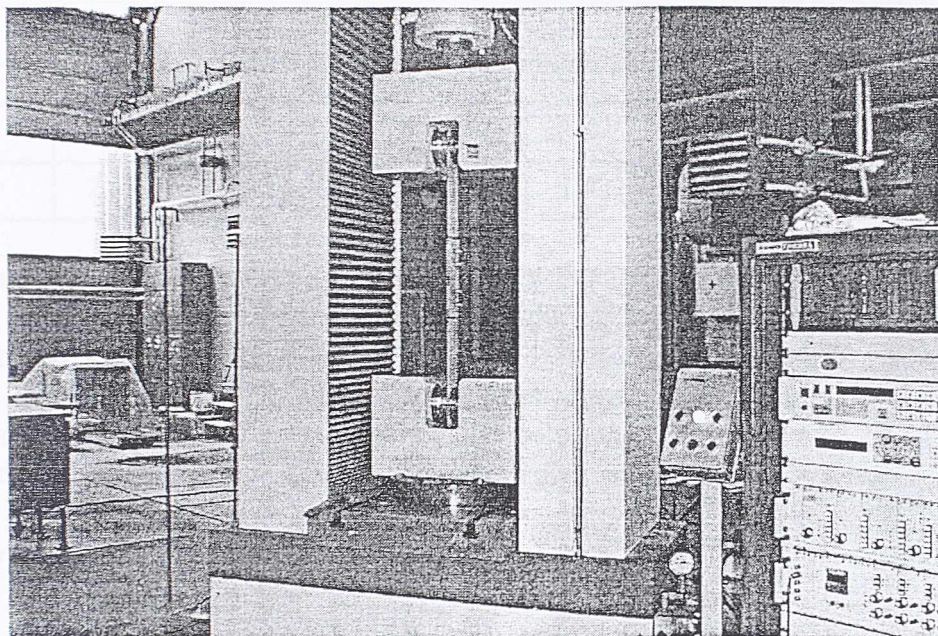
За испитивање ових узорка конструисан је посебан алат (слика 22). Његова функција је да омогући правилно уношење оптерећења у спој и спречи појаву лома у оквиру косих зидова профилисаног лима. Равни делови алата улазе у чељусти уређаја за испитивање (електронске кидалице), а веза са профилисаним лимом се остварује помоћу четири високовредна завртња M12 класе чврстоће 10.9 са пуном силом преднапрезања.



Слика 22 - Алат за испитивање веза оптерећених на затезање

Сва испитивања спроведена су у Војно-техничком институту у Београду, на електронским кидалицама Шенк-Требл (*Shenck-Trebel*) носивости  $100$  kN и  $400$  kN (слика 23). Ове савремене кидалице снабдевене су уређајем (плотером) који омогућава добијање графичког записа, односно дијаграма са изабраним величинама. На овим уређајима, такође се може контролисати брзина деформације и гранична - вршна сила при лому (дигитални запис на дисплеју). Хидрауличне чељусти спречавају било какво проклизавање и обезбеђују центрично деловање оптерећења.

Због велике дужине, везе у смичућим спојевима су испитиване на електронској кидалици RM400 носивости 400 kN, док су узорци оптерећени на затезање испитивани на кидалици мање носивости RM100 (100 kN). Наиме, размак чељусту кидалице RM100 није био довољан за узорке смичућих веза, иако, испоставило се, ниједан испитивани узорак није премашио капацитет ове кидалице (највећа сила лома је била око 44 kN).



Слика 23 - Електронска кидалица RM400 носивости 400 kN

Сви узорци су испитивани до лома. Као карактеристичне величине мерене су и записиване вредности сила (kN) и деформација (mm). Резултати испитивања, који су представљени дијаграмима сила-деформација накнадно су дигитализовани, односно претворени и електронски запис низа тачака са координатама сила-деформација.

## 2 ПОСТУПЦИ ВРЕДНОВАЊА РЕЗУЛТАТА ИСПИТИВАЊА

На основу добијених резултата испитивања, поред генералних закључака о типу лома и модалитетима понашања везе у еластичној и постеластичној области, могу да се одреде и карактеристичне вредности за конкретно испитивање. До ових вредности долази се статистичком анализом резултата испитивања узорака исте серије. Статистичка обрада података у оквиру ове дисертације спроведена је према Еврокоду 3: Део 1.3 у коме је прецизно дефинисан поступак вредновања резултата испитивања, односно одређивање карактеристичне и прорачунске вредности.

Карактеристична вредност отпорности ( $R_k$ ) може да се одреди на основу најмање четири испитана узорка, и то на следећи начин:

$$R_k = R_m - k \cdot s \quad (13)$$

где су:

$R_m$  средња вредност прилагођених (коригованих) резултата испитивања.

$k$  коефицијент који зависи од броја испитаних узорака (табела 13) и

$s$  стандардна девијација, која се одређује према изразу:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \left( \sum_{i=1}^n R_{adj,i} - R_m \right)^2} \quad (14)$$

где је  $n$  број испитаних узорака, а  $R_{adj,i}$  вредности прилагођеног резултата испитивања  $i$ -тог узорка.

Табела 13 - Вредности коефицијента  $k$

$n$	4	5	6	8	10	20	30	$\infty$
$k$	2,63	2,33	2,18	2,00	1,92	1,76	1,73	1,64

Прилагођавање (корекција) вредности испитивања се врши на основу стварних, измерених вредности механичких катактеристика материјала (границе развлачења) и дебљине лима одговарајуће серије. Стварно измерена вредност границе ( $f_{y,obs}$ ) развлачења не треба да прекорачи номиналну вредност за више од 25%, док измерена дебљина лима ( $t_{obs}$ ) не треба да буде већа од номиналне за више од 12%. Прилагођена вредност испитивања одређује се на основу следећег израза:

$$R_{adj,i} = \frac{R_{obs,i}}{\mu_R} \quad (15)$$

где су:

$R_{obs,i}$  стварно измерена вредност резултата испитивања,

$\mu_R$  коефицијент прилагођавања, дефинисан на следећи начин:

$$\mu_R = \left( \frac{f_{y,obs}}{f_y} \right)^\alpha \cdot \left( \frac{t_{obs}}{t} \right)^\beta \quad (16)$$

Начин одређивања експонената  $\alpha$  и  $\beta$  из претходног израза приказан је у оквиру табеле 14.

Табела 14 - Одређивање експонената  $\alpha$  и  $\beta$

$f_{y,obs} / f_y \leq 1$	$\alpha = 0$	-
$f_{y,obs} / f_y > 1$	$\alpha = 1$	У општем случају
	$\alpha = 0,5$	За испитивање профилисаних лимова код којих је избочавање јасно изражен вид лома.
$t_{obs} / t \leq 1$	$\beta = 1$	-
$t_{obs} / t > 1$	$\beta = 2$	За испитивање профилисаних лимова или касета
	$\beta = 1$	За испитивање елемената конструкција виткости мање од граничне $\lambda \leq \lambda_{lim}$
	$\beta = 2$	За испитивање елемената конструкција са виткшћу $\lambda > 1,5\lambda_{lim}$
Напомена: Гранична виткост одређује се при испитивању елемената код којих се јавља избочавање равних лимова.		

На основу претходно изложеног уочава се да приказани поступак одређивања карактеристичне вредности отпорности може да се изврши на основу најмање четири испитана узорка. Постоје, међутим и препоруке за одређивање карактеристичних

вредности и у случају мањег броја узорка, али су у том случају резултати свакако мање поуздани.

Да би резултати испитивања добили своју праву употребну вредност, поред одређивања карактеристичне вредности као једне од главних репрезентативних вредности отпорности испитаног елемента или дела конструкције, потребно је да се одреди и прорачунска вредност (*design value*) отпорности у случају прорачуна према граничним стањима, односно допуштена вредност према теорији допуштених напона.

Прорачунска вредност отпорности ( $R_d$ ) одређује се на основу карактеристичне вредности одређене испитивањем ( $R_k$ ), према следећем изразу:

$$R_d = \frac{R_k}{\gamma_M \cdot \gamma_{sys}} \quad (17)$$

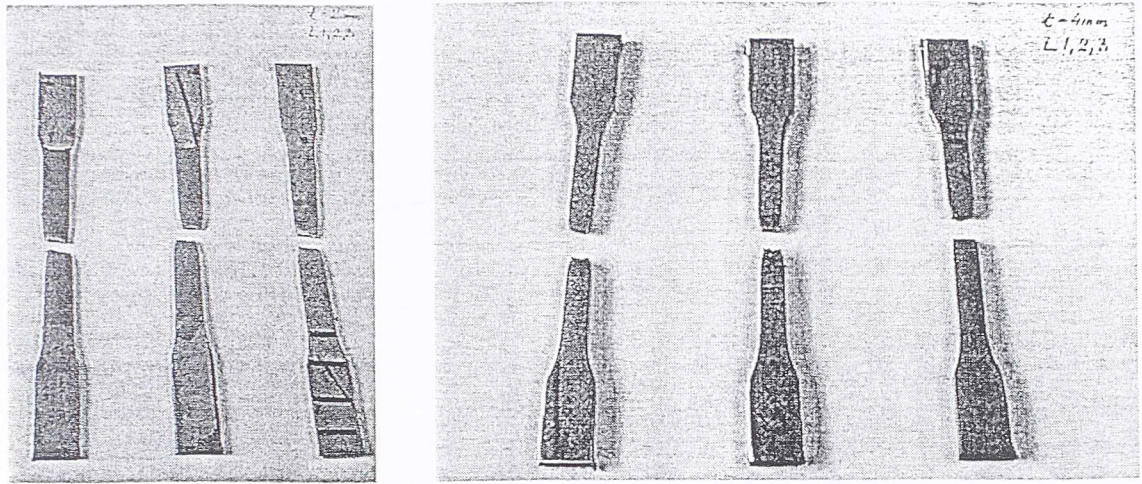
где су  $\gamma_M$  и  $\gamma_{sys}$  парцијални коефицијенти сигурности. Парцијални коефицијент сигурности за отпорност  $\gamma_M$  може да се одреди статистичком анализом серије од барем четири испитана узорка, према препорукама датим у Анексу Z Еврокода 3: Део 1.1. или се могу усвојити вредности препоручене у одговарајућем делу Еврокода 3. На пример за прорачун отпорности веза препоручује се  $\gamma_M = 1,25$ . Парцијални коефицијент сигурности  $\gamma_{sys}$  се односи на разлике у понашању у условима током испитивања и у фази експлоатације. За испитивање лимова и остале прецизно утврђене стандардне поступке, уколико није другачије утврђено у договору између инвеститора, пројектанта и организације за испитивање, може се усвојити да је  $\gamma_{sys} = 1,0$ .

### 3 ИСПИТИВАЊЕ МЕХАНИЧКИХ КАРАКТЕРИСТИКА ОСНОВНОГ МАТЕРИЈАЛА

Ради утврђивања стварних механичких карактеристика материјала од којег су израђени узорци извршена су посебна испитивања. Из случајно изабраних узорка извађене су епрувете за испитивање затезањем. Испитивање је вршено на лимовима обе дебљине (2 и 4 mm) и то за подужни (L) и попречни правац (T), односно у правцу ваљања и управно на њега (слика 24). Испитиване су епрувете стандардних димензија и то по три епрувете за сваку дебљину лима и правац пружања. Основне димензије испитиваних епрувета, односно ширина ( $b$ ) и дужине редукованог дела ( $l_0$ ) приказане су у оквиру табеле 15. У складу са препорукама за мирна статичка оптерећења, приликом испитивања је контролисана брзина деформације и она је износила  $v = 15 \text{ mm/min}$ .

На основу добијених резултата (табела 15) може се извести више интересантних закључака. Као прво, код лима дебљине 2 mm нема јасно изражене границе развлачења ни платоа пластичности, што је карактеристично за танке лимове добијене поступком хладног ваљања (слика 25). То је последица пластичних деформација насталих током поступка хладног ваљања. Лимови дебљине 4 mm јасно показују еласто-пластично понашање својствено општим конструкционим челицима, са израженим платоом пластичности, горњом и доњом границом развлачења и ојачањем материјала (слика 26). Добијене вредности границе развлачења ( $f_y$ ) и чврстоће на затезање ( $f_u$ ) код лимова дебљине 2 mm су уједначене, без великог расипања. Такође, нема значајних разлика у резултатима испитивања за подужни и попречни правац оријентације. Ове разлике су нешто веће када је у питању граница развлачења (9.2%), док су у случају затезне

чврстоће, која је од пресудног значаја за одређивање граничног стања носивости, те разлике веома мале и износе у просеку 2,3%.



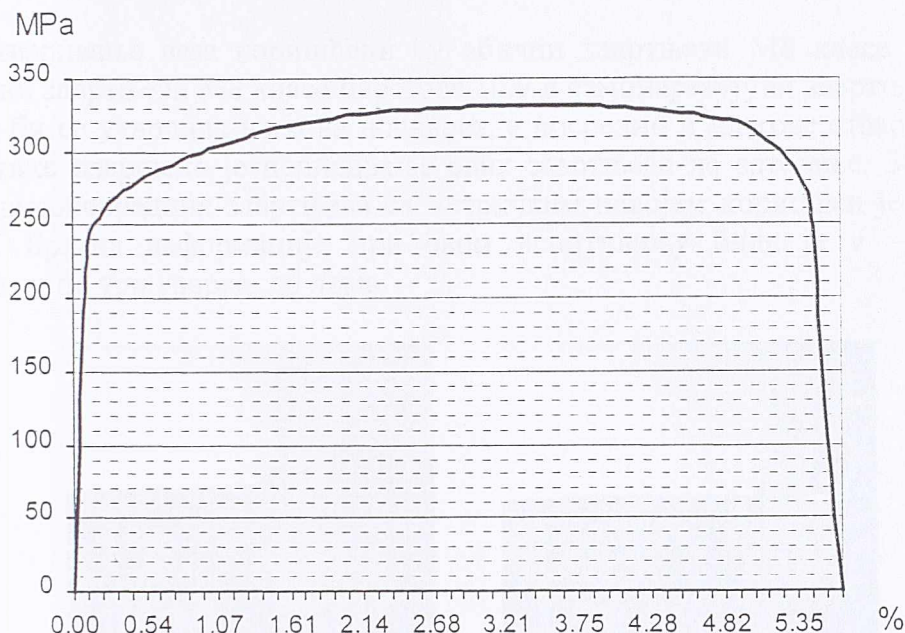
Слика 24 - Испитане подужне епрувете од лимова дебљине 2 mm (T2-L) и 4 mm (T4-L)

Табела 15 - Механичке карактеристика основног материјала

№	Серија	Узорак	$f_y$	$f_u$	$\delta_5$
			MPa	MPa	%
1	T2 - L $t = 2 \text{ mm}$ $b = 15 \text{ mm}$ $l_0 = 100 \text{ mm}$	1	246	330	22,5
		2	250	337	24,5
		3	247	330	23,0
		$\bar{x}$	247,6	332,3	23,33
2	T2 - T $t = 2 \text{ mm}$ $b = 6,2 \text{ mm}$ $l_0 = 30 \text{ mm}$	1	266	340	28,5
		2	282	342	27,5
		3	270	339	28,5
		$\bar{x}$	272,6	340,3	28,17
3	T4 - L $t = 4 \text{ mm}$ $b = 10 \text{ mm}$ $l_0 = 75 \text{ mm}$	1	292	412	16,6
		2	327	432	16,0
		3	350	437	14,6
		$\bar{x}$	323,0	427,0	15,7
4	T4 - T $t = 4 \text{ mm}$ $b = 6,2 \text{ mm}$ $l_0 = 30 \text{ mm}$	1	319	427	20,0
		2	343	439	20,6
		3	322	438	21,0
		$\bar{x}$	328	434,6	20,53

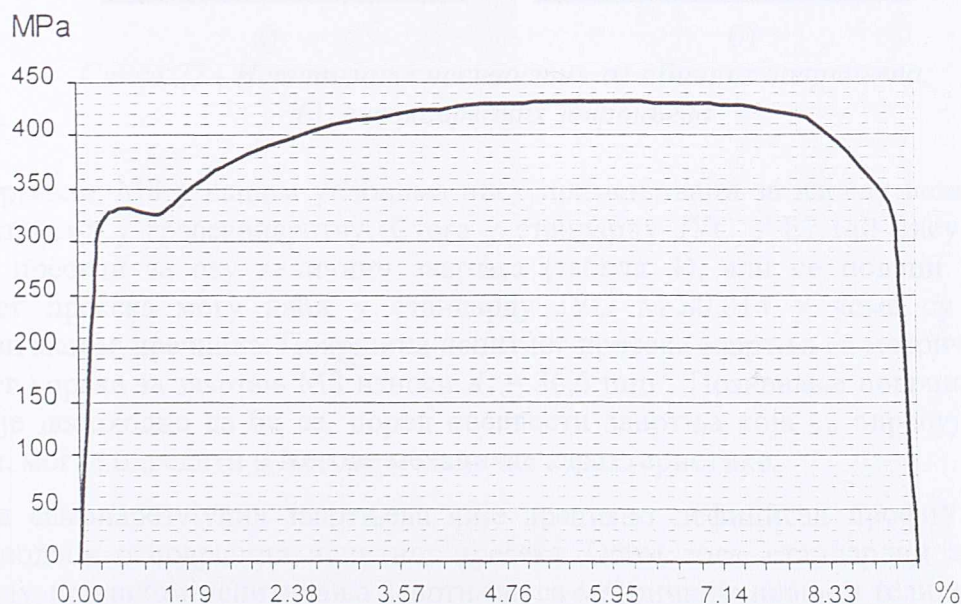
Код подужно оријентисаних узорака лимова дебљине 4 mm постоје извесне осцилације у погледу границе развлачења (стандардна девијација  $s=29,21 \text{ MPa}$ ).

варијанса  $V= 9,08\%$ ), али су вредности затезне чврстоће прилично уједначене ( $s=13,23$  МПа,  $V= 3,10\%$ ). Код лимова дебљине 4 mm готово да нема разлика у вредностима механичких карактеристика у подужном односно попречном правцу. Чврстоће на затезање се разликују у просеку за 1,7%, док је разлика код границе развлачења још мања и износи свега 1,5%.



Слика 25 - Карактеристичан  $\sigma$ - $\epsilon$  дијаграм за испитивани челични лим дебљине 2 mm

У табели 15 су дата издужења при лому  $\delta_5$ , која су показатељ дуктилности материјала и крећу се у границама од 15,7% до 28,17% у зависности од дебљине лима и оријентације узорка.



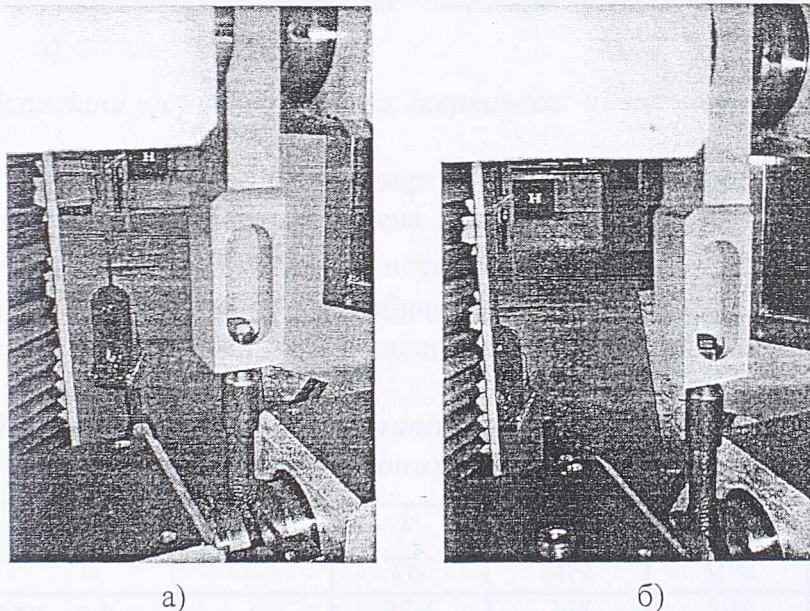
Слика 26 - Карактеристичан  $\sigma$ - $\epsilon$  дијаграм за испитивани челични лим дебљине 4 mm

На основу претходних података лако се може уочити да лимови дебљине 2 mm и 4 mm нису од челика истог квалитета. Лимови дебљине 2 mm припадају групи челика за

хладно обликовање (Ѕ0147), док су лимови дебљине 4 mm израђени од општег конструкционог челика (сличан Ѕ0451).

#### 4 ИСПИТИВАЊЕ НОСИВОСТИ ЗАВРТЊЕВА

За остваривање веза коришћени су обични завртњеве М8 класе чврстоће 5.8, високовредни завртњеве М8 класе чврстоће 10.9 и самонарезујући завртњеве, пречника 6,3 mm. Да би се утврдила њихова носивост, а посредно и њихове стварне механичке карактеристике извршено је испитивање ових завртњева на затезање. За испитивање обичних и високовредних завртњева са метричким навојем коришћен је посебан алат (слика 27). Брзина деформације при овом испитивању била је  $v = 15 \text{ mm/min}$ . Испитивана су по три узорка, до лома.



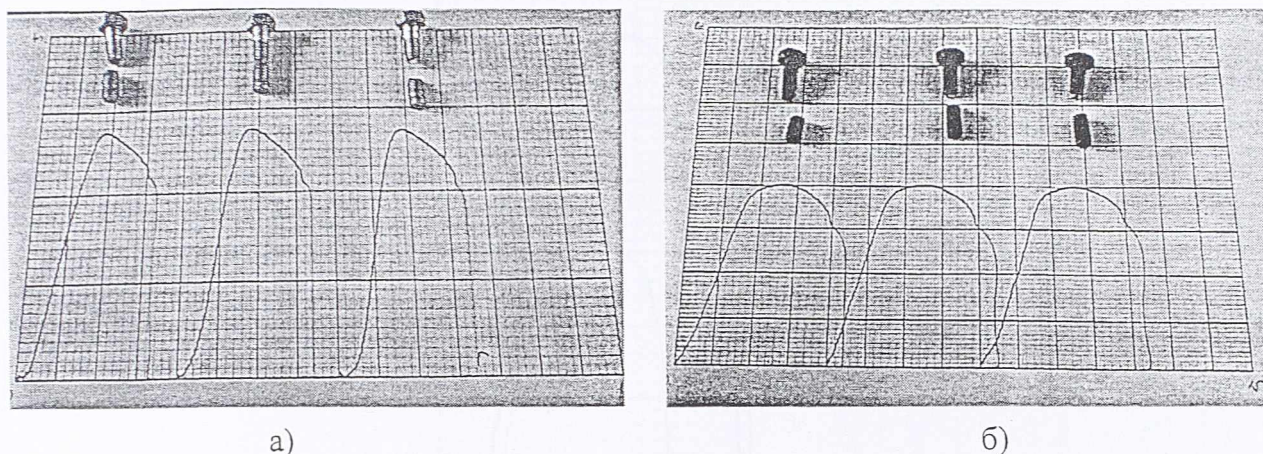
а) б)  
Слика 27 - Испитивање носивости: а) обичних завртњева;  
б) високовредних завртњева

Завртњеве М8 у нашим условима нису примењивани за израду веза у челичним конструкцијама у грађевинарству. Стога у стандарду ЈУС У.Е7.140 нису дефинисани испитни пресеци за ову величину завртња (табела 4), али се подаци о површини попречног пресека могу наћи у стандарду ЈУС М.Б0.014 у коме су обрађени и завртњеве мањег пречника. Површина испитног пресека завртња са метричким навојем крупнијег корака за завртња М8 износи  $A_s = 36,6 \text{ mm}^2$ . Познавање површине испитног пресека је неопходно да би се, поред носивости завртња која се одређује директним мерењем, могле одредити и његове механичке карактеристике.

Код самонарезујућих завртњева није прецизно дефинисан профил навоја нити постоје подаци о површини испитног пресека. Осим тога, стандардни алати који се примењују приликом испитивања завртњева са метричким навојем (слика 27) не могу да се користе. Стога је носивост самонарезујућих завртњева на затезање одређена посредним путем, на основу узорка који су испитивани на затезање (Т10к), о чему ће бити речи у делу рада који се бави испитивањем самонарезујућих завртњева у спојевима оптерећеним на затезање.



Приликом испитивања завртњева са навртком, и обичних и високовредних, уочена су изузетно мала одступања, која указују на високо стандардизован процес производње и контроле квалитета (слика 28).



Слика 28 - Испитани узорци: а) обичних завртњева; б) високовредних завртњева

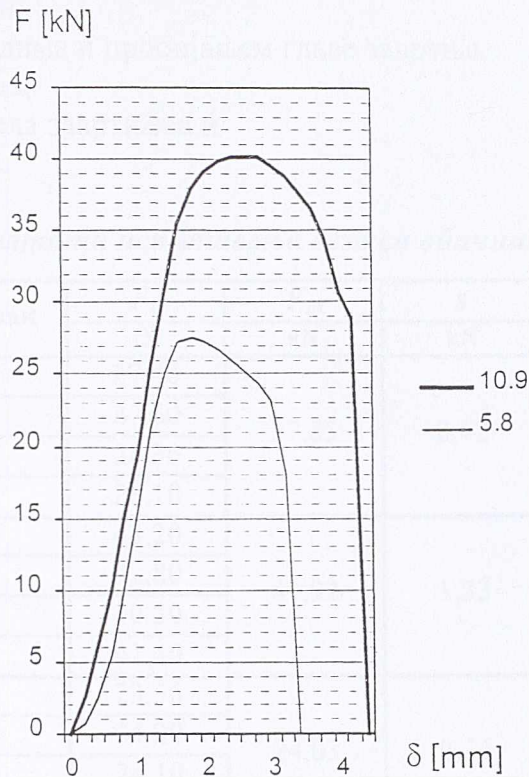
Резултати испитивања носивости завртњева приказани су у оквиру табеле 16. Потврда уједначености квалитета завртњева огледа се кроз изузетно ниске вредности стандардне девијације и варијансе, које за носивост завртњева ( $F_u$ ) износе:

- $s = 0,06 \text{ kN}$        $V = 0,21\%$       за обичне завртњеве,
- $s = 0,20 \text{ kN}$        $V = 0,50\%$       за високовредне завртњеве.

Табела 16 - Резултати испитивања носивости обичних и високовредних завртњева

N°	Серија	Узорак	$F_u$	$f_u$	$f_{02}$	$\delta_u$
			kN	MPa	MPa	mm
1	M8 - 5.8 $l_0 = 100 \text{ mm}$ $A_s = 36,6 \text{ mm}^2$	1	27,4	748	598	1,80
		2	27,4	748	598	1,80
		3	27,3	746	597	1,75
		$\bar{x}$	27,36	747,3	598,3	1,80
2	M8 - 10.9 $l_0 = 100 \text{ mm}$ $A_s = 36,6 \text{ mm}^2$	1	40,2	1098	988	2,55
		2	40,4	1104	993	2,50
		3	40,0	1093	983	2,60
		$\bar{x}$	40,2	1098	988	2,57

Такође, може да се констатује да су вредности чврстоће на затезање и техничке границе развлачења веће од номиналних, односно називних за конкретне класе чврстоће. Док је код високовредних завртњева ово одступање релативно мало и износи 9,7% ( $f_{02,obs} / f_{02} = 988/900 = 1,097$ ), код обичних је оно знатно веће (49,6%). Ови подаци илуструју важност експерименталног одређивања стварних носивости и механичких карактеристика материјала и завртњева коришћених за израду узорака. Ослањање на називне, односно номиналне вредности механичких карактеристика може произвести погрешне закључке, квантитативне, али и квалитативне природе.



Слика 29 - Дијаграми  $F$ - $\delta$  за обичне и високовредне завртњеве (M8)

На слици 29 приказани су карактеристични дијаграми сила-деформација ( $F$ - $\delta$ ) за испитиване обичне и високовредне завртњеве M8.

## 5 ИСПИТИВАЊЕ МЕХАНИЧКИХ СПОЈНИХ СРЕДСТАВА У СПОЈЕВИМА ОПТЕРЕЂЕНИМ НА СМИЦАЊЕ

С обзиром да су механичка спојна средства у челичним конструкцијама најчешће оптерећена на смицање, овој проблематици је посвећена посебна пажња. Примена различитих механичких спојних средстава, дебљина материјала, типова везе и ивичних растојања била је неопходна како би се анализирали сви могући видови лома и, ако је могуће, установи нека законитост. Узорци су осмишљени тако да се омогући појава свих карактеристичних видова лома (слика 7).

### 5.1 ОБИЧНИ ЗАВРТЊЕВИ

Приликом испитивања веза са обичним завртњевима (класе чврстоће 5.8) примењена је стандардна процедура испитивања, са контролисаним брзином деформације ( $v=15$  mm/min). Испитивано је осам серија узорака чија је геометрија приказана на слици 20. Резултати испитивања приказани су у табели 17. Ознаке серија узорака које су приказане у табели 17 су у складу са табелом 12. У табели 17 су поред максималне, односно граничне вредности силе ( $F_u$ ) за сваки узорак дате и средња

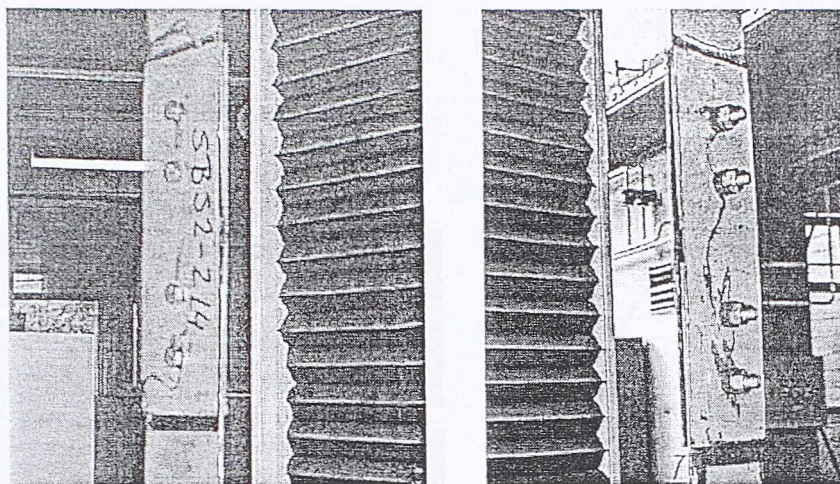
вредност ( $F_m$ ), стандардна девијација ( $s$ ), варијанса ( $V$ ) и тип лома. Типови лома су означени на следећи начин:

- А - лом кривљењем лима и пробијањем главе завртња,
- Б - лом цепањем лима,
- В - лом смицањем тела завртњева и
- Г - лом нето пресека.

Табела 17 - Резултати испитивања веза са обичним завртњевима

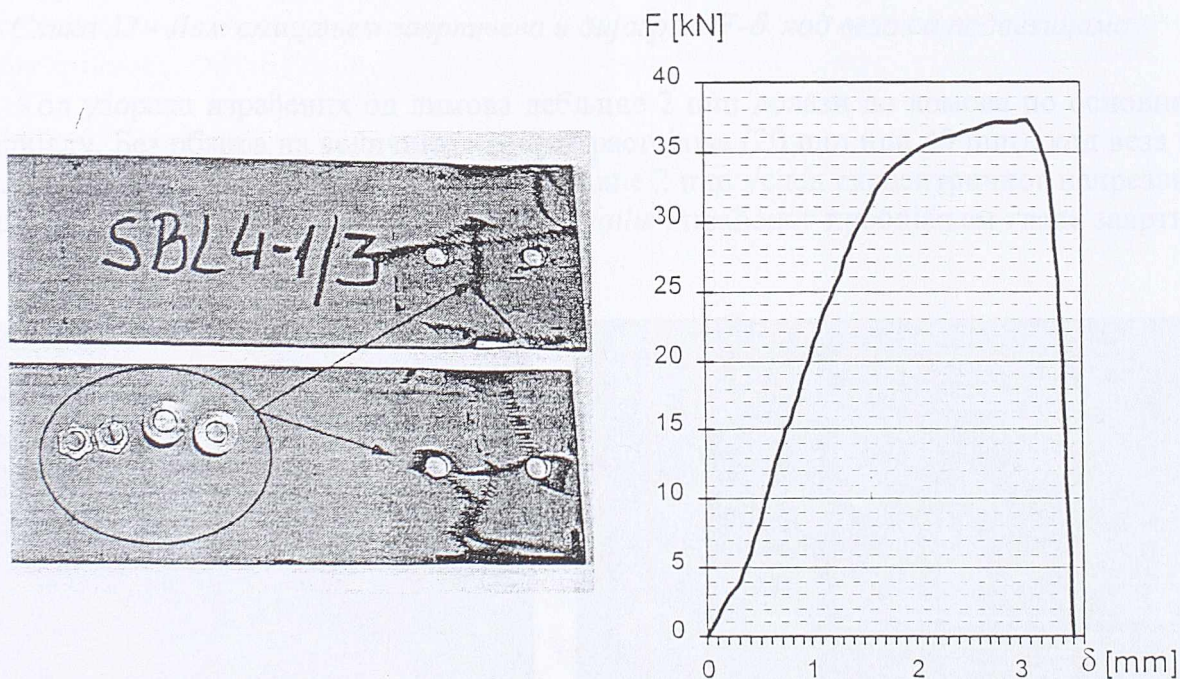
№	Серија	Узорак	$F_u$	$F_m$	$s$	$V$	Тип лома
			kN	kN	kN	%	
1	SBS2-1	1	27,40	27,85	0,42	1,51	Б
		2	27,60				
		3	28,30				
		4	28,10				
2	SBS2-2	1	43,20	41,92	1,33	3,17	Г
		2	42,80				Б
		3	40,30				
		4	41,40				
3	SBL2-1	1	23,50	24,03	0,36	1,50	А
		2	24,20				
		3	24,10				
		4	24,30				
4	SBL2-2	1	24,10	24,65	1,00	4,05	А
		2	23,90				
		3	26,10				
		4	24,50				
5	SBS4-1	1	63,10	61,90	1,62	2,60	В
		2	63,10				
		3	60,30				
		4	-				
6	SBS4-2	1	65,20	65,37	1,16	1,77	В
		2	64,30				
		3	66,60				
		4	-				
7	SBL4-1	1	-	36,93	0,55	1,49	В
		2	36,30				
		3	37,20				
		4	37,30				
8	SBL4-2	1	-	37,63	0,59	1,56	В
		2	37,20				
		3	38,30				
		4	37,40				

На основи приказаних вредности констатује се да су заступљени сви релевантни видови лома и да је расипање резултата мало, односно да су добијене вредности прилично уједначене.



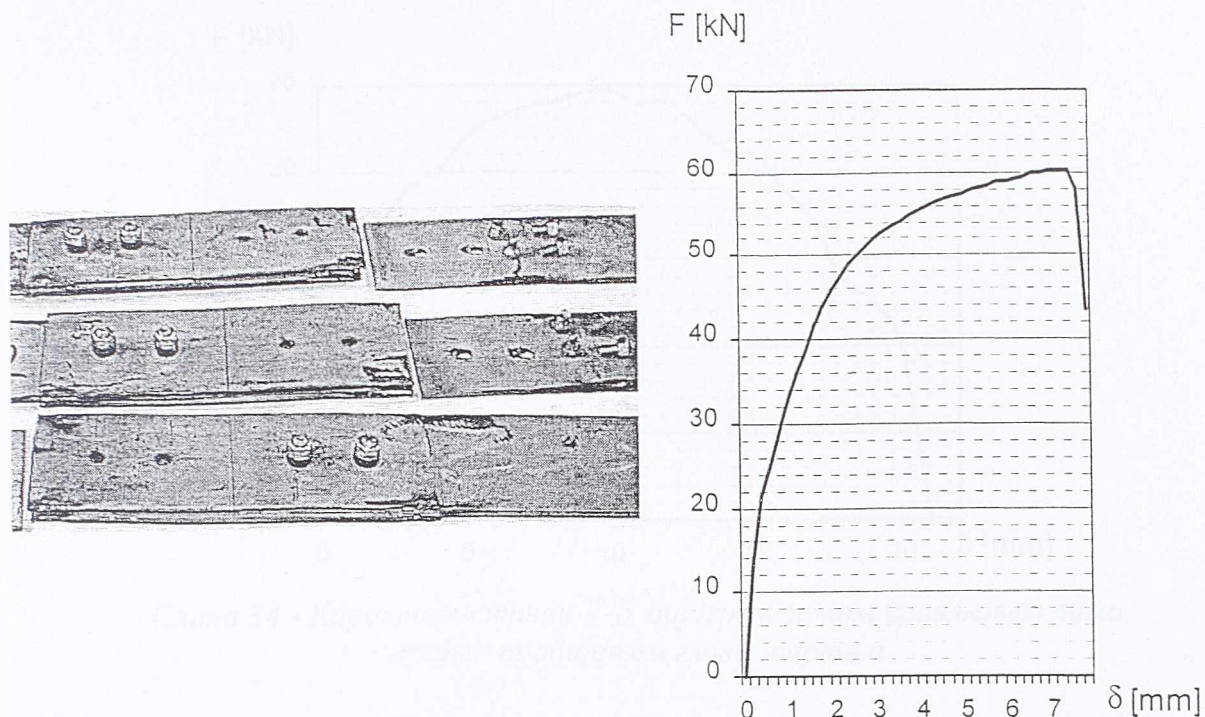
Слика 30 - Испитивање веза са обичним завртњевима

Резултати испитивања показују да код свих узорака израђених од лимова дебљине 4 mm до лома долази смицањем тела завртња (слика 31а). При овом типу лома деформације су релативно мале и крећу се око 3 mm, код веза на преклоп (слика 31б), односно око 7 mm код веза са подвезицама (слика 32).



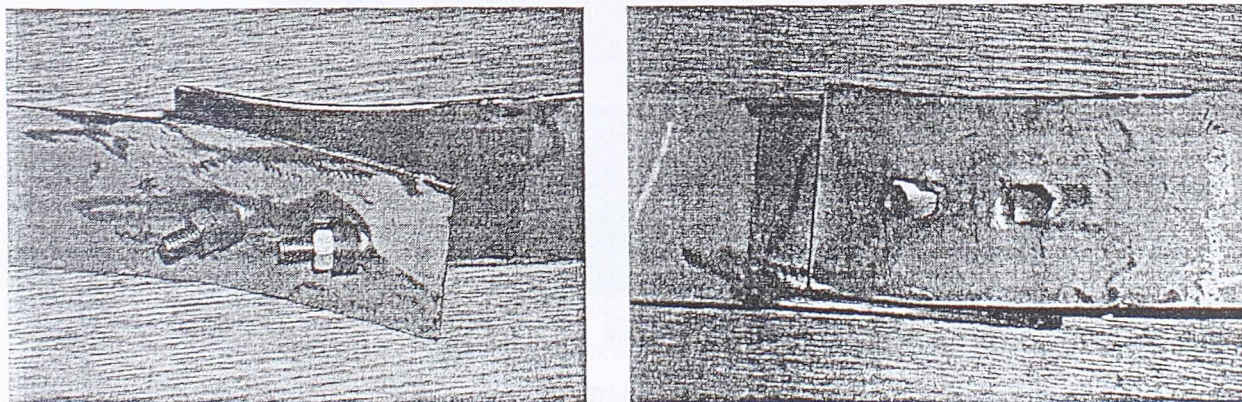
Слика 31 - Лом смицањем обичних завртњева код веза на преклоп:  
а) облик лома; б) дијаграм сила-деформација  $F$ - $\delta$

Код веза на преклоп на основном материјалу нема уочљивих трагова деформација, облик рупа за завртњеве и након лома остаје кружан. Како су код веза са подвезицама, завртњеви двосечни, напрезање у основном материјалу при лому је знатно веће, што доводи до деформације у основном материјалу у зонама око рупа за спојна средства, па је укупна деформабилност везе већа. Осим тога, треба напоменути да код двосечних завртњева једна равна смицања пролази кроз део тела завртња без навоја, а друга кроз део са навојем, па стога носивост двосечног завртња није двоструко већа од носивости једносечног код кога се смицање врши на делу тела без навоја.



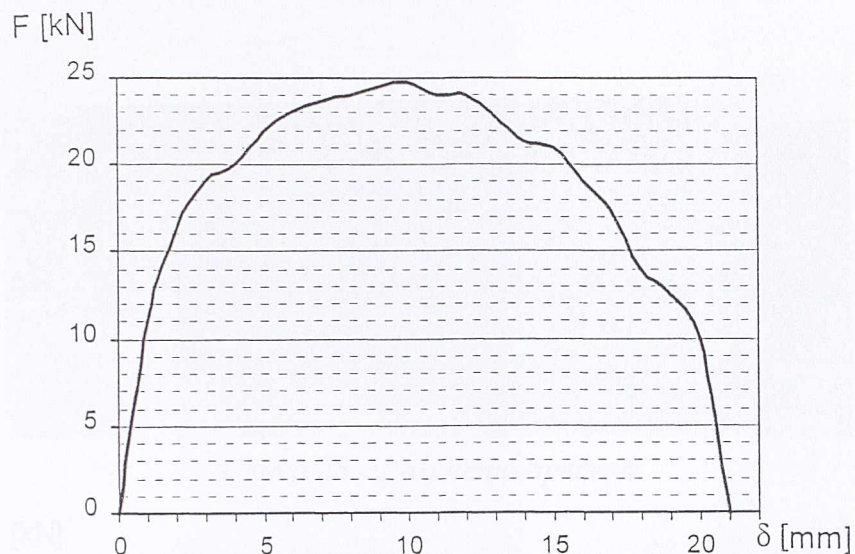
Слика 32 - Лом смицањем завртњева и дијаграм  $F$ - $\delta$  код веза са подвезицама

Код узорака израђених од лимова дебљине 2 mm долази до ломова по основном материјалу. Без обзира на величину ивичног растојања (20 mm или 40 mm), код веза на преклоп израђених од челичних лимова дебљине 2 mm услед ексцентричног напрезања долази до лома кривљењем лима (*inclination failur*) праћеног пробијањем главе завртња кроз основни материјал (слика 33).



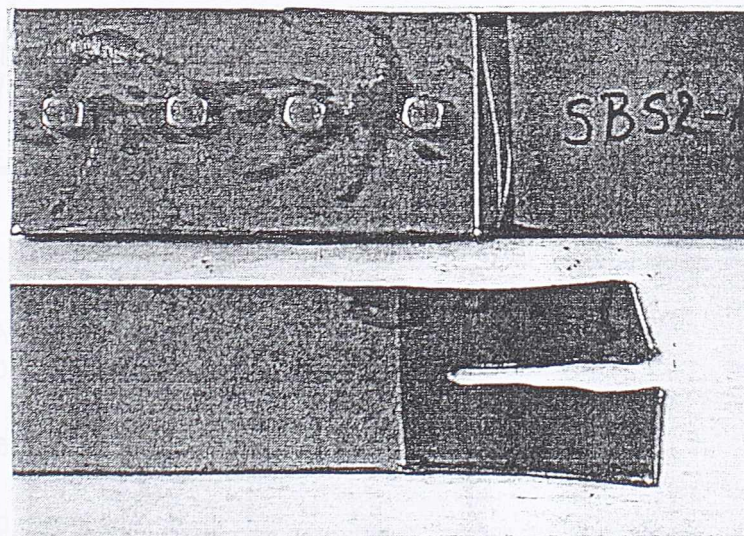
Слика 33 - Лом кривљењем лима код веза на преклоп

Наиме, због ексцентричног напрезања и мале крутости лим на савијање долази до знатних деформација основног материјала на месту везе. Завртњеви се ротирају и поред силе смицања у њима се јавља и сила затезања. Један од шпигеца шестоугаоне главе се урезује у релативно танак лим и тако почиње пробијање главе завртња кроз основни материјал. Деформације се прогресивно шире, а при самом лому завртњеви су окренути за скоро 90° у односу на првобитни положај. При оваком типу лома деформације су знатно веће него у случају лома смицањем завртњева и износе око 10 mm при максималној сили, односно 20 mm при самом лому (слика 34).



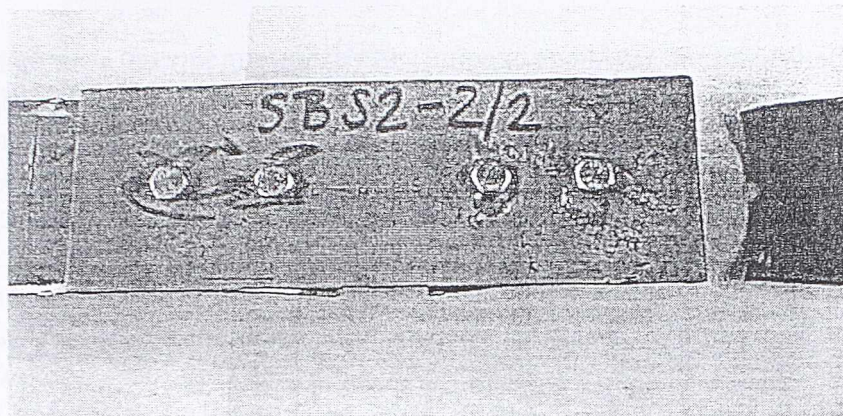
Слика 34 - Карактеристичан  $F$ - $\delta$  дијаграм за лом кривљењем лима праћен пробијањем главе завртња

Претходни вид лома није карактеристичан за везе са подвезицама јер је код њих оптерећење симетрично и центрисано. У случају веза са подвезицама до лома долази цепањем лима (слика 35) или исцрпљењем носивости нето пресека (слика 36).

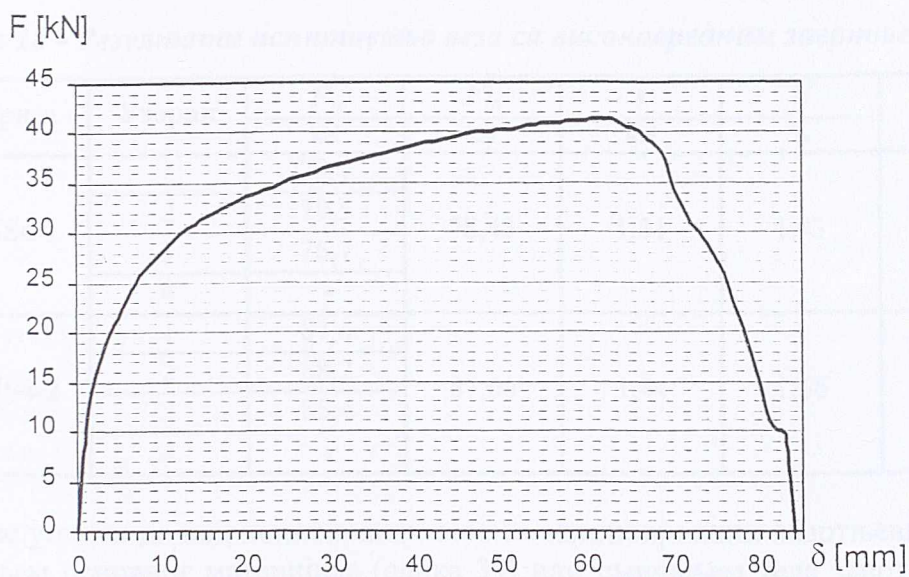


Слика 35 - Лом цепањем основног материјала

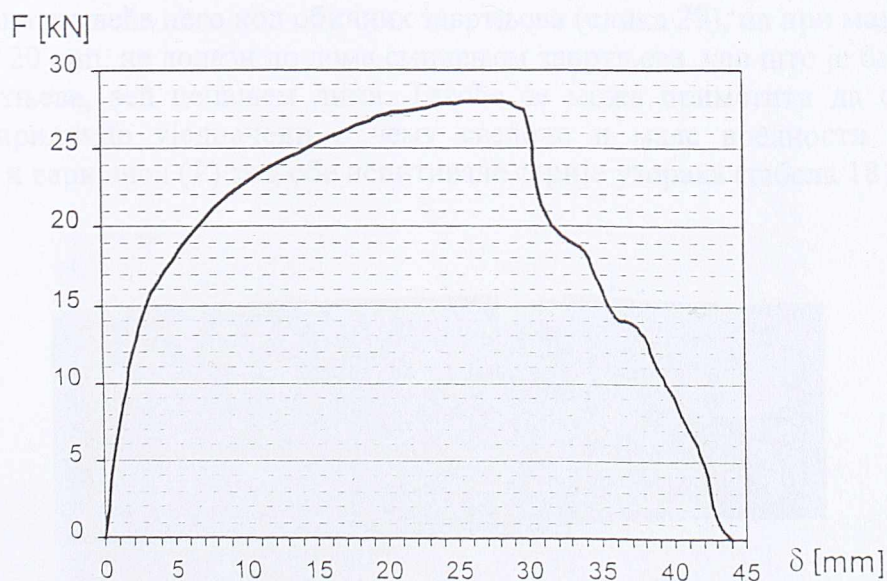
Када је ивично растојање мало ( $e_1=20$  mm) до лома долази цепањем у зони ивичних рупа, а када је реч о већем ивичном растојању долази до лома на месту нето пресека. У оба случаја деформације су вишеструко веће него при лому смицањем завртњева. Такође су знатно веће и од деформација при лому кривљењем. Посебно велике деформације су при лому нето пресека, када због пластификације челика долази до деформација од 65 mm (слика 37). Деформације при лому цепањем су мање и при максималној сили износе око 30 mm (слика 38). Такође треба истаћи да је у оба случаја веза између силе и деформације ( $F$ - $\delta$ ) после почетне линеарности изразито нелинеарна, што је последица еластопластичне природе основног материјала, али и концентрације напона у зонама око рупа за спојна средства.



Слика 36 - Лом нето пресека



Слика 37 - Карактеристичан  $F$ - $\delta$  дијаграм за лом нето пресека



Слика 38 - Карактеристичан  $F$ - $\delta$  дијаграм за лом цепањем лима

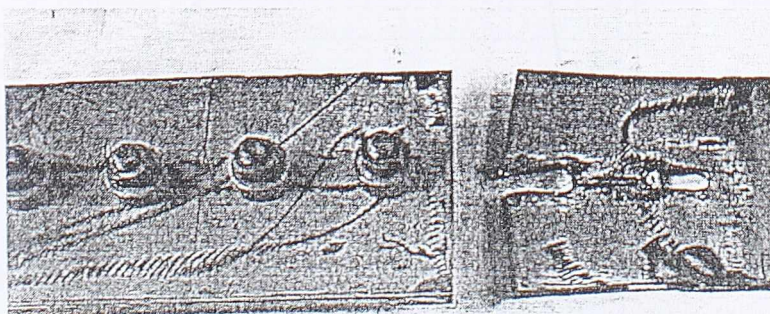
## 5.2 ВИСОКОВРЕДНИ ЗАВРТЊЕВИ

Испитивање веза са преднапрегнутим високовредним завртњевима вршено је на узорцима израђеним од лима дебљине 4 mm, и то само за случај веза са подвезицама, код којих је оптерећење центрично. Дакле, код високовредних завртњева вариран је само један параметар, то јест ивично растојање  $e_1$ . Као што је поменуто коришћени су високовредни завртњеви класе чврстоће 10.9, који су преднапрегнути силом  $F_p = 23,0$  kN. Вредност коефицијнта  $k$  од којег зависи момент притезања није посебно одређивана већ је усвојена на основу података произвођача ( $k=0,16$ ). Притезање је извршено моментним кључем до прописаног момента  $M_u = 23.000 \cdot 0,16 \cdot 0,008 = 29,5$  Nm. Тарне површине елемената везе нису посебно обрађиване у погледу повећања коефицијента трења. Брзина деформације приликом испитивања била је као и у случају обичних завртњева  $v = 15$  mm/min. Резултати испитивања приказани су у табели 18.

Табела 18 - Резултати испитивања веза са високовредним завртњевима

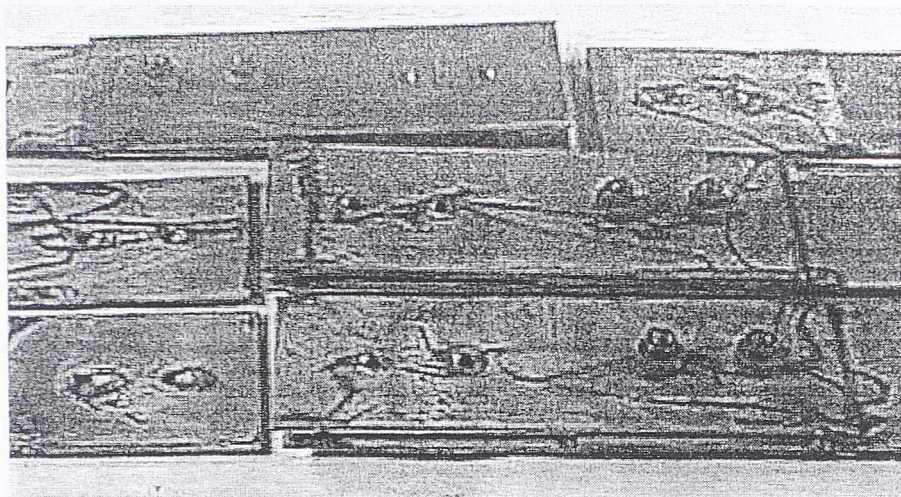
№	Серија	Узорак	$F_u$	$F_m$	$s$	$V$	Тип лома
			kN	kN	kN	%	
1	SHS4-1	1	79,1	78,43	1,51	1,93	Б
		2	79,5				
		3	76,7				
		4	-				
2	SHS4-2	1	87,4	87,00	1,44	1,66	В
		2	88,2				
		3	85,4				
		4	-				

Може се уочити да код испитиваних веза са високовредним завртњевима до лома долази цепањем основног материјала (слика 39) или смицањем тела завртњева (слика 40). Овакви типови лома су очекивани с обзиром да су везе центрично оптерећене, те се искључује појава лома кривљењем лима (тип А). Осим тога, носивост високовредних завртњева је знатно већа него код обичних завртњева (слика 29), па при малом ивичном растојању  $e_1 = 20$  mm, не долази до лома смицањем завртњева, као што је био случај код обичних завртњева, већ цепањем лима. Такође се може приметити да су резултати испитивања прилично уједначени о чему сведоче и мале вредности стандардних девијација ( $s$ ) и варијанси ( $V$ ) код обе испитиване серије узорака (табела 18).



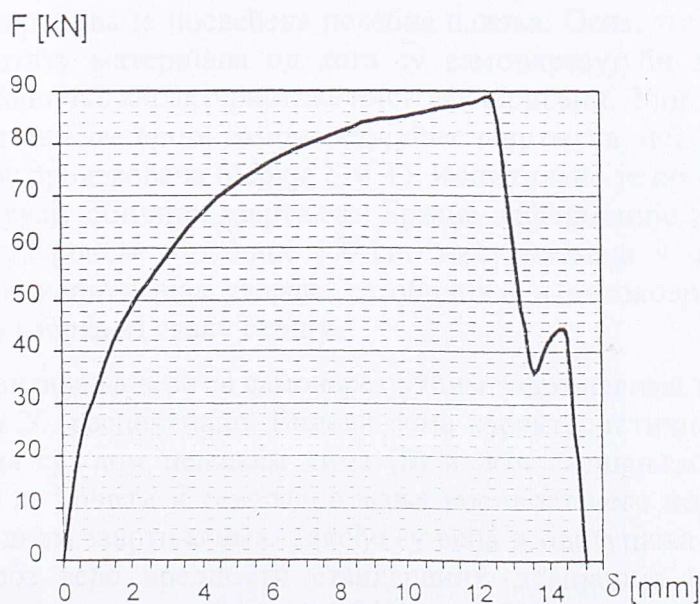
Слика 39 - Лом цепањем лима дебљине 4 mm код веза са високовредним завртњевима



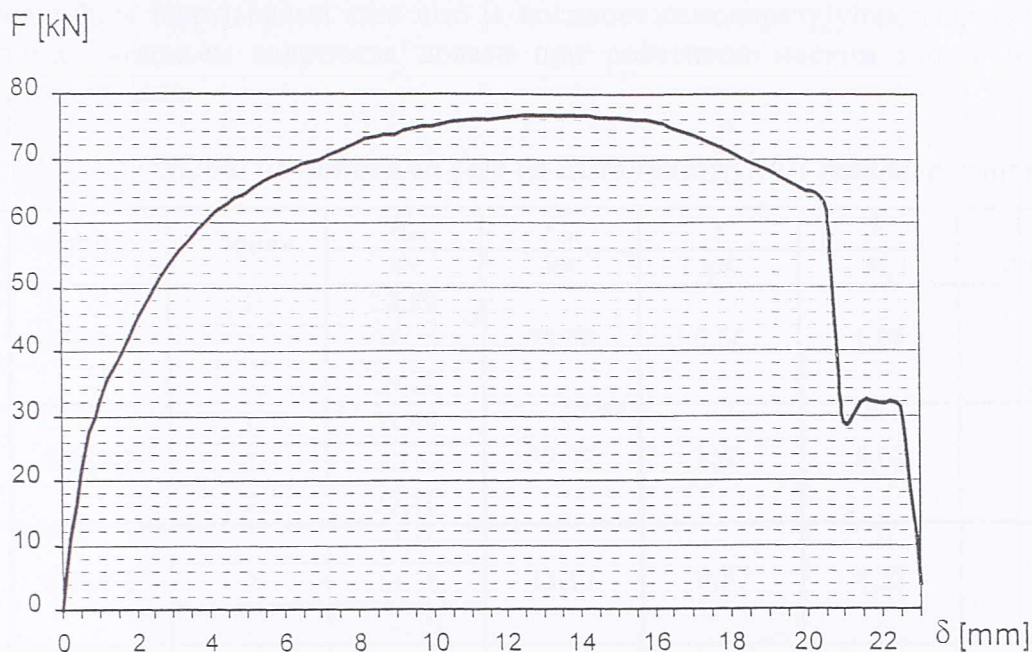


Слика 40 - Лом смицањем високовредних завртњева по две равни смицања

Поред тога треба истаћи да гранично стање носивости, без обзира о којем виду лома је реч, долази тек када силе достигну вредности знатно веће од силе проклизавања ( $F_s$ ). Проклизавање се може уочити као благи скок криве  $F-\delta$  и регистровано је при силама од око 30 kN код обе испитиване серије (слике 41 и 42). Према томе, с обзиром на силу преднапрезања ( $F_p = 23$  kN), број завртњева (2) и тарних равни (2), може се констатовати да је остварен коефицијен трења  $\mu \approx 0,3$ , што одговара стању површина лимова у спојевима. Такође се може приметити већа деформабилност узорака код којих до лома долази цепањем лима у ивичној зони у односу на оне код којих до лома долази смицањем завртњева. При лому смицањем централни део тела завртња остаје трајно, пластично утиснут у основни материјал. Ово је последица чињенице да су тела испитиваних високовредних завртњева снабдевена навојима по читавој својој висини, па су се навоји услед великих контактних сила урезали у знатно мекши основни материјал.



Слика 41 - Карактеристичан  $F-\delta$  дијаграм за лом смицањем завртњева



Слика 42 - Карактеристичан  $F$ - $\delta$  дијаграм за лом цепањем лима у ивичној зони

И један и друг вид лома карактеристише изузетно нелинеаран дијаграм сила-деформација ( $F$ - $\delta$ ), а нелинеарност је израженија код лома цепањем основног материјала у ивичној зони.

### 5.3 САМОНАРЕЗУЈУЋИ ЗАВРТЊЕВИ

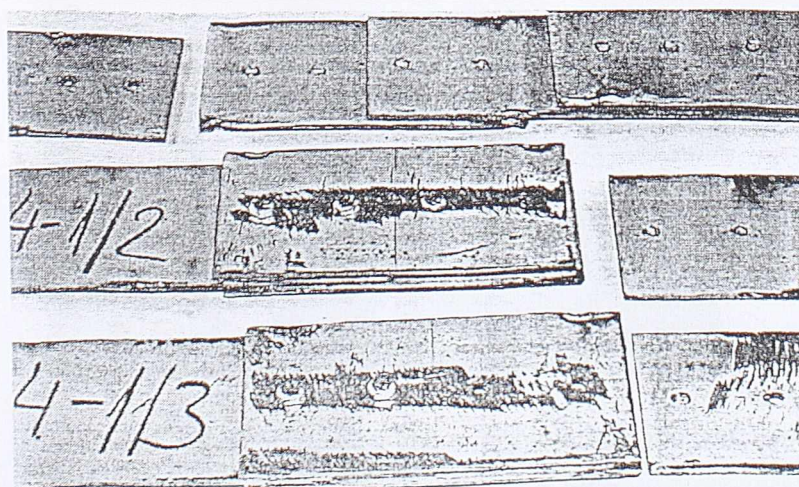
Имајући у виду да су самонарезујући завртњевии знатно мање примењивани у носећим челичним конструкцијама, те да су сазнања о њиховом понашању и особинама знатно мања него у случају обичних и високовредних завртњева, испитивању самонарезујућих завртњева је посвећена посебна пажња. Осим тога, треба напоменути да подаци о квалитету материјала од кога су самонарезујући завртњевии израђени, односно његове механичке карактеристике нису декларисани. Због тога су у оквиру ове дисертације испитиване две врсте самонарезујућих завртњева, истих димензија ( $d = 6.3$  mm) али различитог произвођача (серије S и T). Испитивано је по 8 идентичних серија узорака, као и у случају обичних завртњева. Брзина деформације ( $v=15$  mm/min), као и размак чељустии електронске кидалице (60 cm) нису мењани у односу на вредности подешене приликом испитивања узорака са обичним и високовредним завртњевима. Испитивана су по 3 узорка за сваку серију.

Резултати испитивања веза са самонарезујућим завртњевима типа S и T приказани су у табелама 19 и 20, респективно. Видови лома карактеристични за везе са оваквим спојним средствима су: лом цепањем лима (Б) и лом смицањем завртњева (В). Код оваквих веза може се уочити и генерално мања носивост него код веза са обичним и посебно високовредним завртњевима. Такође су већа и одступања добијених резултата што се огледа кроз веће вредности стандардних девијација ( $s$ ) и варијанси ( $V$ ). Варијанса ( $V$ ) се креће у границама од 1.94% до 8.03% за самонарезујуће завртњеве типа S, односно од 0.46% до 7.03% за самонарезујуће завртњеве типа T. Типови лома основног материјала као што су лом кривљењем (А) и лом нето пресека (Г), који су се јављали код веза са обичним завртњевима нису се појавили код веза са

самонарезујућим завртњевима зато што је носивост самонарезујућих завртњева мања, па до лома смицањем завртњева долази при релативно ниском нивоу напрезања основног материјала.

Табела 19 - Резултати испитивања веза са самонарезујућим завртњевима (тип S)

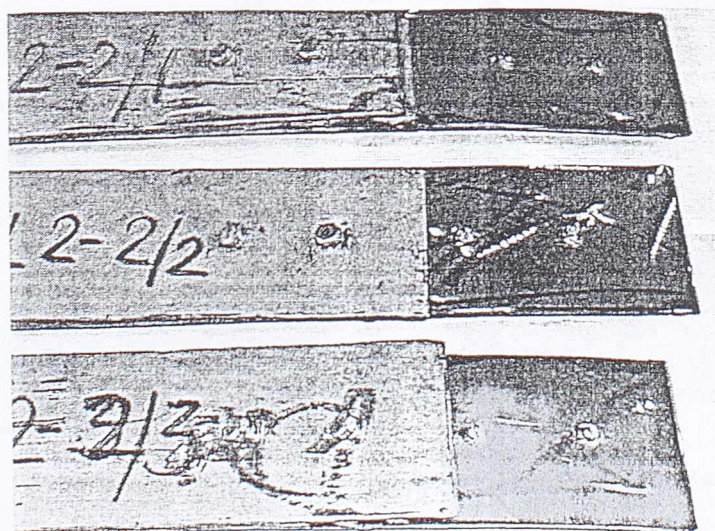
№	Серија	Узорак	$F_u$	$F_m$	$s$	$V$	Тип лома
			kN	kN	kN	%	
1	SSS2-1	1	28,80	28,70	0,56	1,94	Б
		2	28,10				
		3	29,20				
2	SSS2-2	1	31,40	32,77	2,63	8,03	В
		2	31,10				
		3	35,80				
3	SSL2-1	1	13,60	13,13	0,57	4,33	В
		2	13,30				
		3	12,50				
4	SSL2-2	1	14,30	14,23	1,10	7,74	В
		2	13,10				
		3	15,30				
5	SSS4-1	1	27,40	26,90	0,70	2,60	В
		2	26,10				
		3	27,20				
6	SSS4-2	1	29,10	27,33	1,54	5,62	В
		2	26,30				
		3	26,60				
7	SSL4-1	1	11,80	12,43	0,57	4,57	В
		2	12,60				
		3	12,90				
8	SSL4-2	1	13,50	12,60	0,79	6,30	В
		2	12,30				
		3	12,00				



Слика 43 - Лом смицањем самонарезујућих завртњева код веза са подвезицама ( $t = 4 \text{ mm}$ )

Табела 20 - Резултати испитивања веза са самонарезујућим завртњевима (тип T)

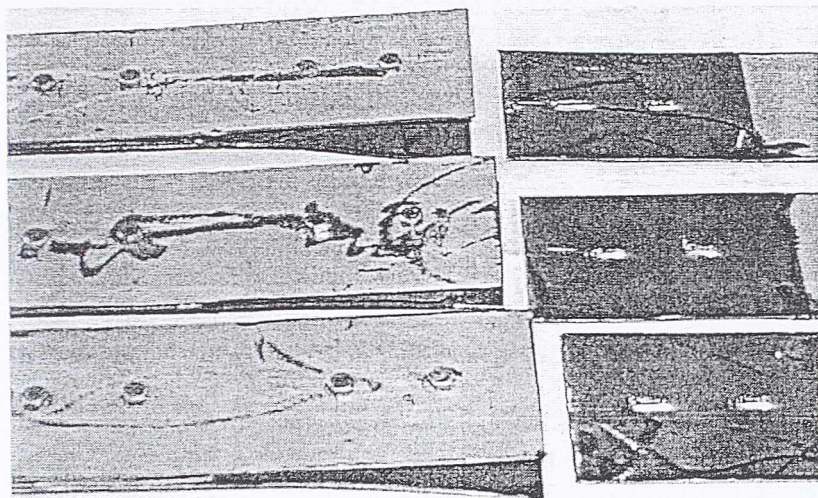
№	Серија	Узорак	$F_u$	$F_m$	$s$	$V$	Тип лома
			kN	kN	kN	%	
1	STS2-1	1	26,50	27,67	1,01	3,66	B
		2	28,20				
		3	28,30				
2	STS2-2	1	29,00	28,00	1,11	3,98	B
		2	28,20				
		3	26,80				
3	STL2-1	1	8,30	8,10	0,35	4,28	B
		2	7,70				
		3	8,30				
4	STL2-2	1	7,90	8,30	0,59	7,03	B
		2	8,10				
		3	9,00				
5	STS4-1	1	24,70	23,70	1,48	6,24	B
		2	24,40				
		3	22,00				
6	STS4-2	1	24,70	24,84	0,67	2,78	B
		2	23,80				
		3	23,40				
7	STL4-1	1	13,20	13,53	0,43	3,64	B
		2	13,30				
		3	14,10				
8	STL4-2	1	12,70	12,67	0,06	0,46	B
		2	12,60				
		3	12,70				



Слика 44 - Лом смицањем самонарезујућих завртњева код веза на преклоп ( $t = 2 \text{ mm}$ )

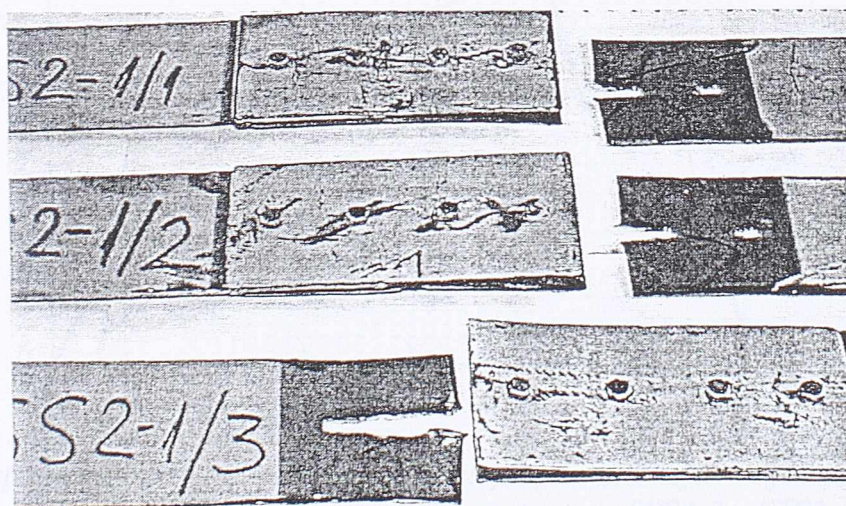
Код свих узорака израђених од лимова дебљине 4 mm до лома долази смицањем завртњева (слика 43), без обзира на вредност ивичног растојања и тип везе (на преклоп

или са подвезицама). Исти је случај и са узорцима дебљине 2 mm код веза на преклоп (серије SSL2-1, SSL2-2, STL2-1 и STL2-2) и веза са подвезицама и великим ивичним растојањем (SSS2-2, односно STS2-2). На сликама 44 и 45 приказане су фотографије карактеристичних видова лома узорака израђених од лимова дебљине 2 mm, код којих до лома долази смицањем самонарезујућих завртњева, по једној (слика 44) односно две (слика 45) равни смицања.



Слика 45 - Лом смицањем самонарезујућих завртњева код веза са подвезицама ( $t = 2 \text{ mm}$ )

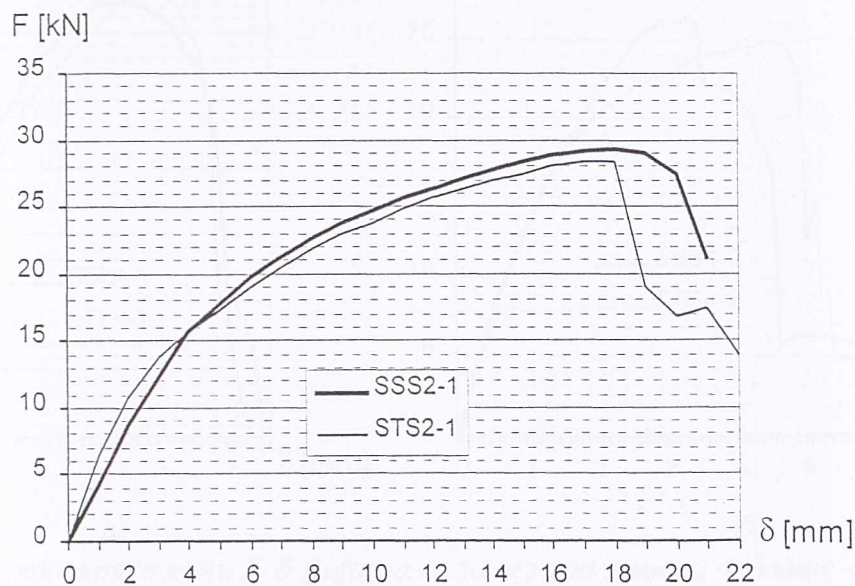
Код веза са подвезицама и малим ивичним растојањем (SSS2-1, односно STS2-1) долази до лома цепањем лима у ивичној зони (слика 46), на сличан начин као и код веза са обичним и високовредним вавртњевима.



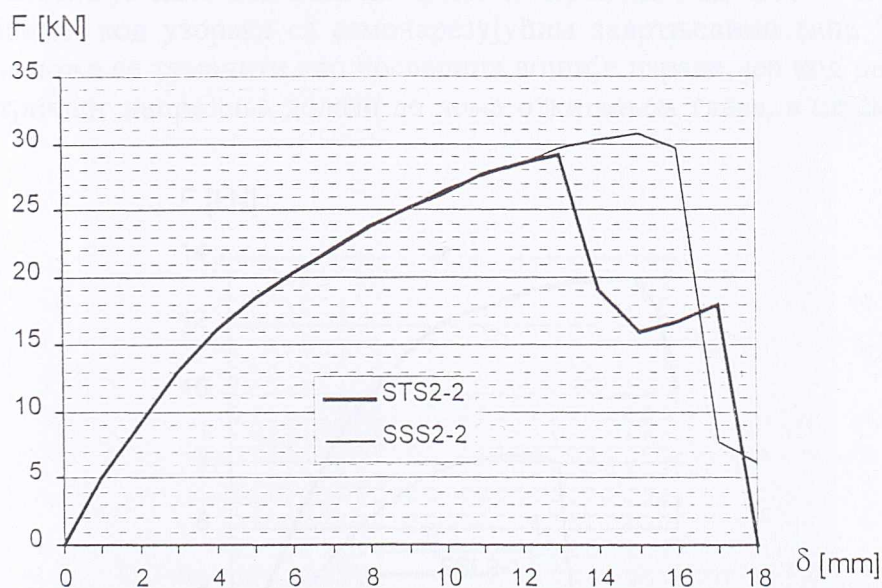
Слика 46 - Лом цепањем лима у ивичној зони код лимова дебљине 2 mm

Треба констатовати и да је слагање резултата серија S и T прилично добро, и то не само у погледу типова лома већ и добијених вредности граничне носивости ( $F_u$ ) што се може уочити и на основу дијаграма сила-деформација ( $F-d$ ) који су, за везе са подвезицама од лимова дебљине 2 mm, приказани на сликама 47 и 48. Граничне деформације код лома цепањем лима у ивичној зони (слика 47) су око 20 mm, колико је и износило ивично растојање првог завртња ( $e_1 = 20 \text{ mm}$ ). Код веза са већим ивичним

растојањем ( $e_1 = 40$  mm) укупна деформација при лому је нешто мања и износи око 17 mm (слика 48), али свакако недовољна да изазове лом цепањем ( $17 < 40$  mm), па долази до отказа смицањем самонарезујућих завртњева.

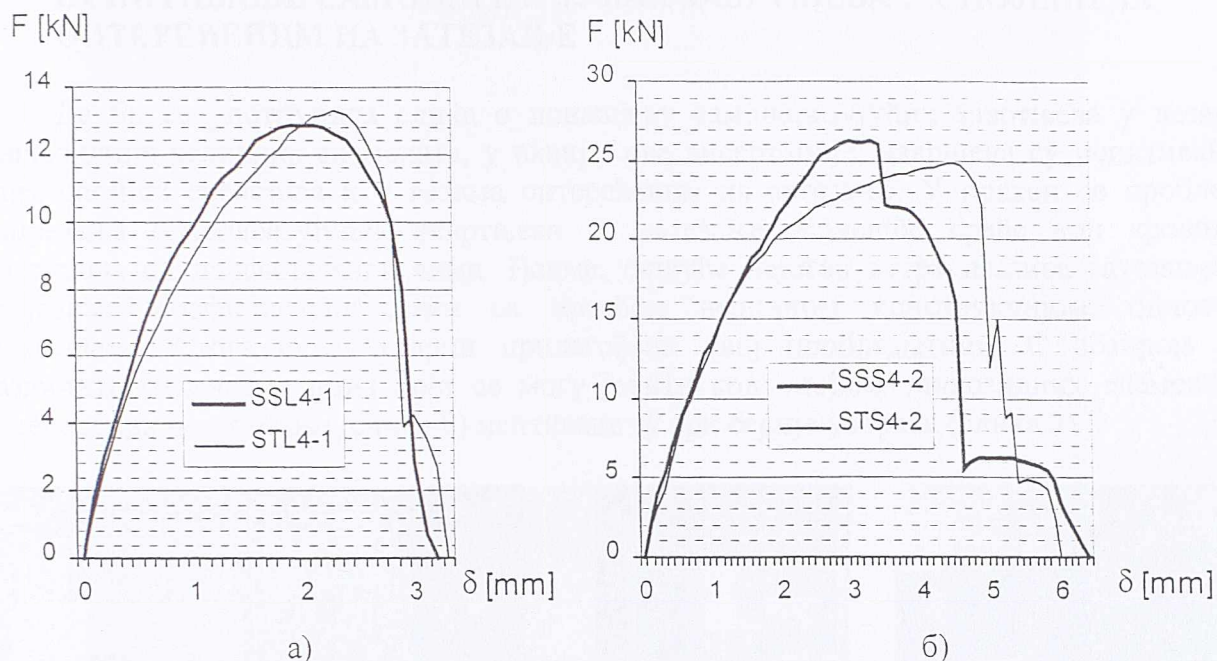


Слика 47 - Карактеристични  $F$ - $\delta$  дијаграми за узорке код којих се јавља лом цепањем лима (серије SSS2-1 и STS2-1)



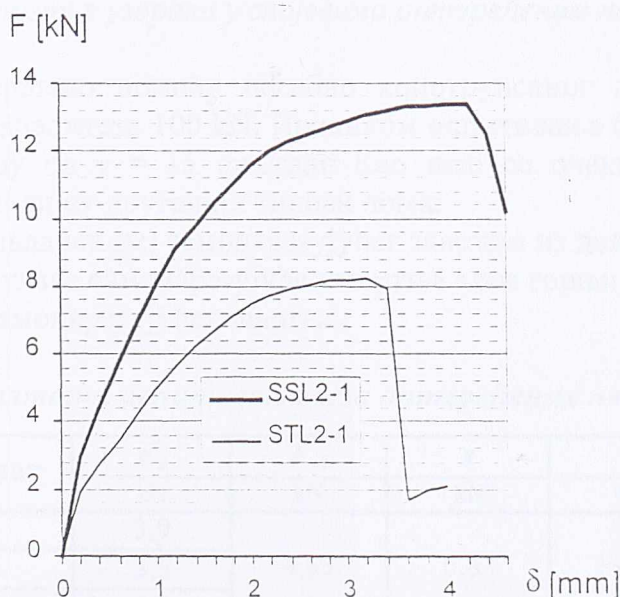
Слика 48 - Карактеристични  $F$ - $\delta$  дијаграми за узорке код којих се јавља лом смицањем завртњева уз гњечење околног лима (серије SSS2-2 и STS2-2)

И код лимова дебљине 4 mm понашање веза је слично за оба типа самонарезујућих завртњева (слика 49), али су, с обзиром на врсту лому и дебљину основног материјала, деформације у овом случају знатно мање. При максималној сили деформације везе су око 2 mm за везе на преклоп, односно између 3 и 5 mm код веза са подвезицама. Осим тога, с обзиром на две равни смицања завртњева, код веза са подвезицама, вредности силе лому су приближно двоструко веће него код веза на преклоп.



Слика 49 - Карактеристични  $F$ - $\delta$  дијаграми за везе од лимова дебљине 4 mm код којих долази до лома смицањем: а) по једној равни смицања; б) по две равни смицања

Битна разлика у резултатима испитивања различитих типова самонарезајућих завртњева приметна је само код веза на преклоп израђених од лимова дебљине 2 mm (слика 50). Наиме, код узорака са самонарезајућим завртњевима типа Т носивост је знатно мања и може се тумачити као последица лошије израде, јер код ових завртњева услед ексцентричног напрезања долази до лома откидањем главе, а не смицањем тела завртња.

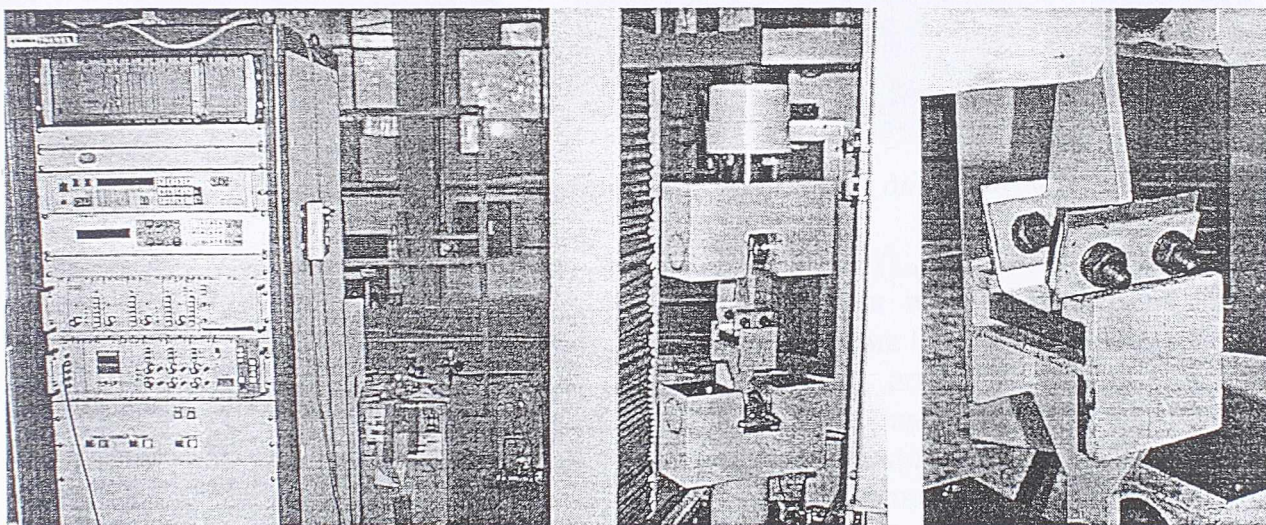


Слика 50 - Карактеристични  $F$ - $\delta$  дијаграми за серије SSL2-1 и STL2-1

Као и у случају веза са завртњевима код свих испитиваних узорака веза са самонарезајућим завртњевима уочено је више или мање нелинеарно понашање. Оно је посебно изражено код веза израђених од лимова дебљине 2 mm, код којих долази до лома по основном материјалу.

## 6 ИСПИТИВАЊЕ САМОНАРЕЗУЈУЋИХ ЗАВРТЊЕВА У СПОЈЕВИМА ОПТЕРЕЋЕНИМ НА ЗАТЕЗАЊЕ

Да би се употпунила слика о понашању самонарезајућих завртњева у везама танкозидних челичних елемената, у оквиру ове дисертације, извршена су испитивања ових спојних средстава и у везама оптерећеним на затезање. У пракси се проблем напрезања самонарезајућих завртњева на затезање најчешће среће код кровних покривача од профилисаног лима. Наиме, сишуће дејство ветра изазива затезање у спојевима профилисаног лима са носећом челичном конструкцијом, односно рожњачама. Стога су и узорци прилагођени овој проблематици. С обзиром на различите механизме лома који се могу јавити код спојева танкозидних елемената оптерећених на затезање (слика 8) испитиване су три серије узорака (слика 21).



Слика 51 - Испитивање узорака у спојевима оптерећеним на затезање

Испитивање је извршено помоћу посебно конструисаног алата (слика 22) и електронских кидалица капацитета 100 kN. Приликом испитивања брзина деформације је контролисана на нивоу од  $v = 15 \text{ mm/min}$ . Као што се очекивало, код све три испитиване серије наступили су другачији типови лома:

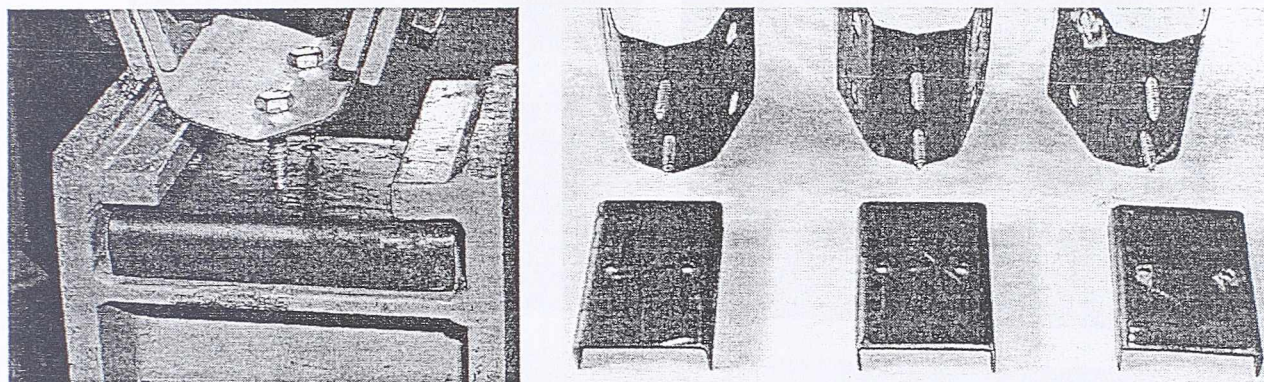
- А - лом чупањем (извлачењем) самонарезајућег завртња из доњег лима,
- Б - лом пробијањем главе самонарезајућег завртња кроз горњи лим и
- В - лом затезањем самонарезајућег завртња.

Табела 21 - Резултати испитивања веза оптерећених на затезање

N <sup>o</sup>	Серија	Узорак	$F_u$	$F_m$	$s$	$V$	Тип лома
			kN	kN	kN	%	
1	TS2	1	3,9	4,83	0,83	17,23	А
		2	5,5				
		3	5,1				
2	TS10	1	10,0	10,9	0,82	7,51	Б
		2	11,6				
		3	11,1				
3	TS10k	1	23,5	23,6	0,66	2,78	В
		2	23,0				
		3	24,3				

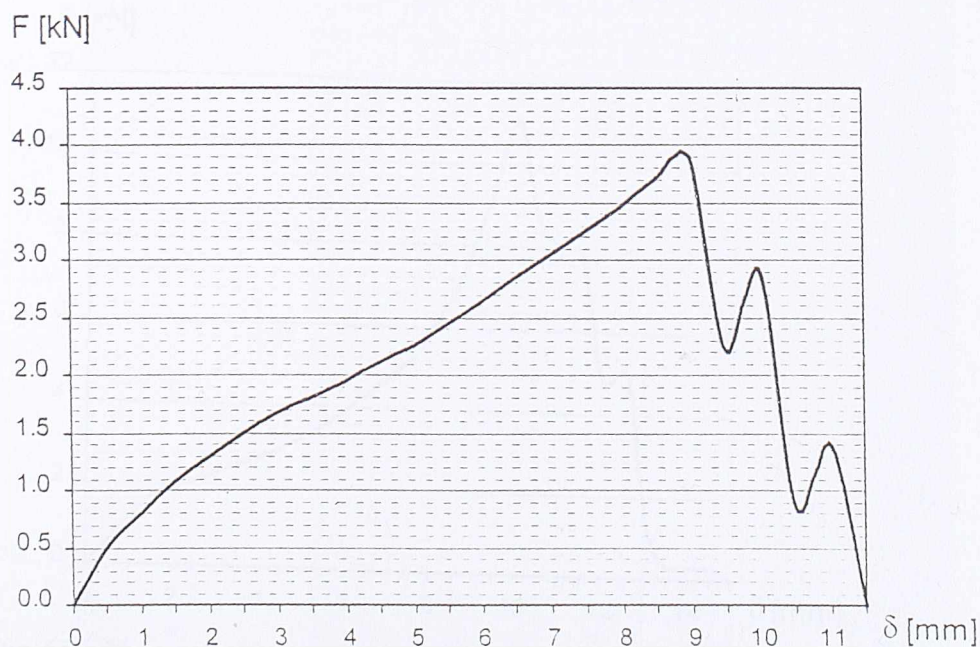


У табели 21 приказани су резултати испитивања узорака све три испитиване серије. На основу вредности варијансе ( $V$ ) може се уочити да су најмања одступања забележена код узорака серије TS10k код које до лома долази затезањем самонарезујућих завртњева. Овако мале вредности варијансе (2,78%) говоре о уједначеном квалитету испитиваних завртњева у погледу на лом исцрпљењем носивости на затезање.



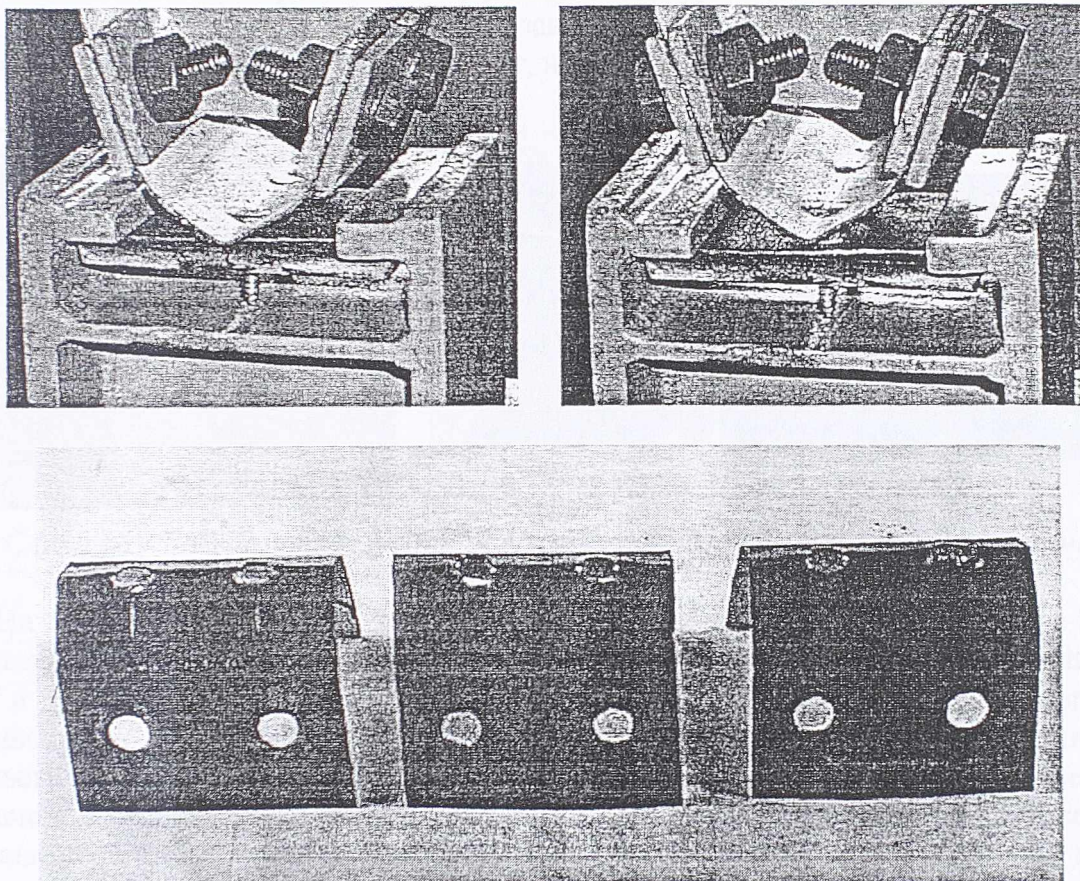
Слика 52 - Лом чупањем самонарезујућих завртњева из доњег лима ( $t=2\text{mm}$ )

Код узорака серије TS2 због мале дебљине доњег лима ( $t_{sup}=2\text{mm}$ ) до лома долази чупањем, односно извлачењем самонарезујућих завртњева из доњег, носећег лима (слика 52). Деформације настале приликом оваквог типа лома (слика 53) последица су, већим делом, флексибилности горњег профилисаног лима, што се може уочити и са фотографија приказаних на слици 52. На супрот горњем лиму, доњи лим у који су урезани самонарезујући завртњеви има мале, једва уочљиве деформације у виду испупчења. До лома, дакле долази, разарањем навоја урезаног у доњи, носећи лим. Приликом лома јасно су уочени метални опилци који су "изчупани" из доњег лима дебљине 2 mm. С обзиром на тврдоћу површинских слојева материјала од кога су израђени самонарезујући завртњеви, њихови навоји су остали неоштећени.

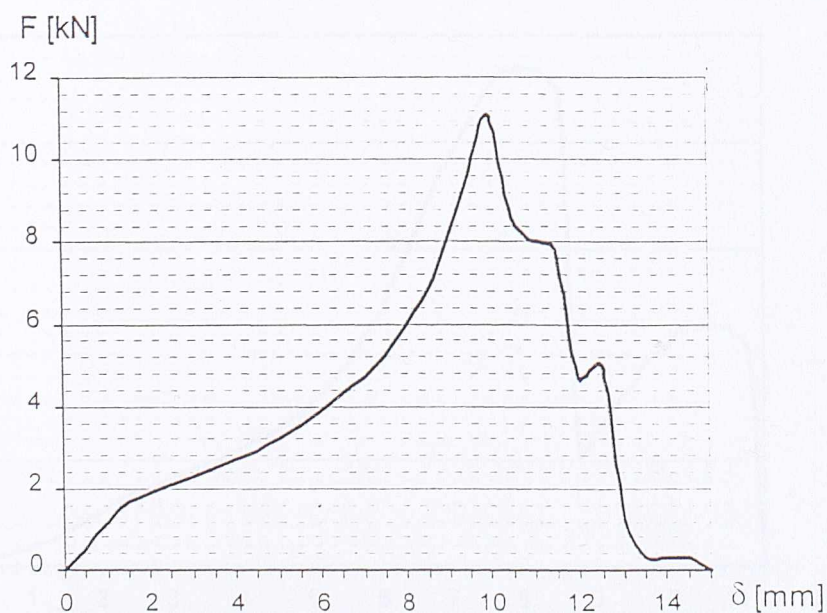


Слика 53 - Карактеристичан  $F$ - $\delta$  дијаграм за лом чупањем завртњева (серија TS2)

Када је доњи, носећи лим велике дебљине (на пример 10 mm), као што је то случај са узорцима серија TS10 и TS10k, до лома не долази чупањем самонарезајућих завртњева, као што је то био случај код доњег лима мале дебљине. За везе са дебелим носећим лимовима карактеристичан је лом пробијањем главе завртња (слика 54).

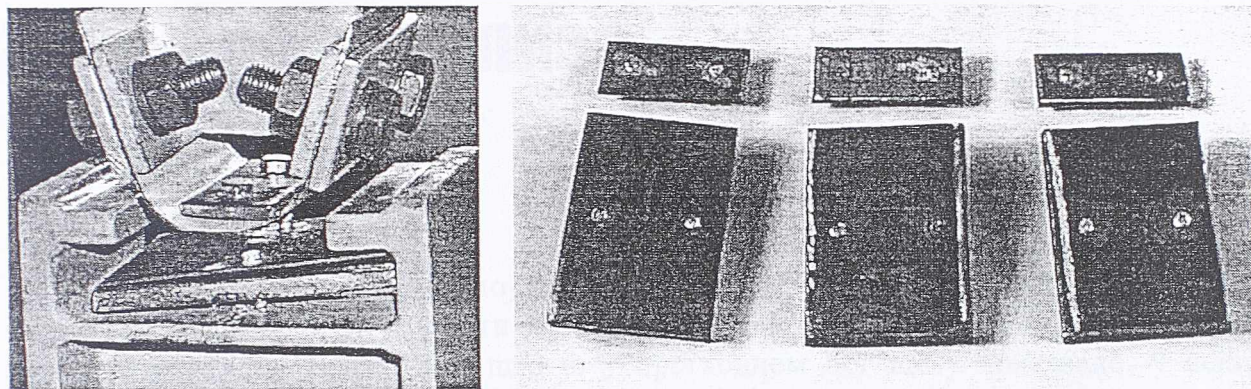


Слика 54 - Лом пробијањем глава самонарезајућих завртњева кроз горњи, профилисани лим дебљине 1 mm (серија TS10)



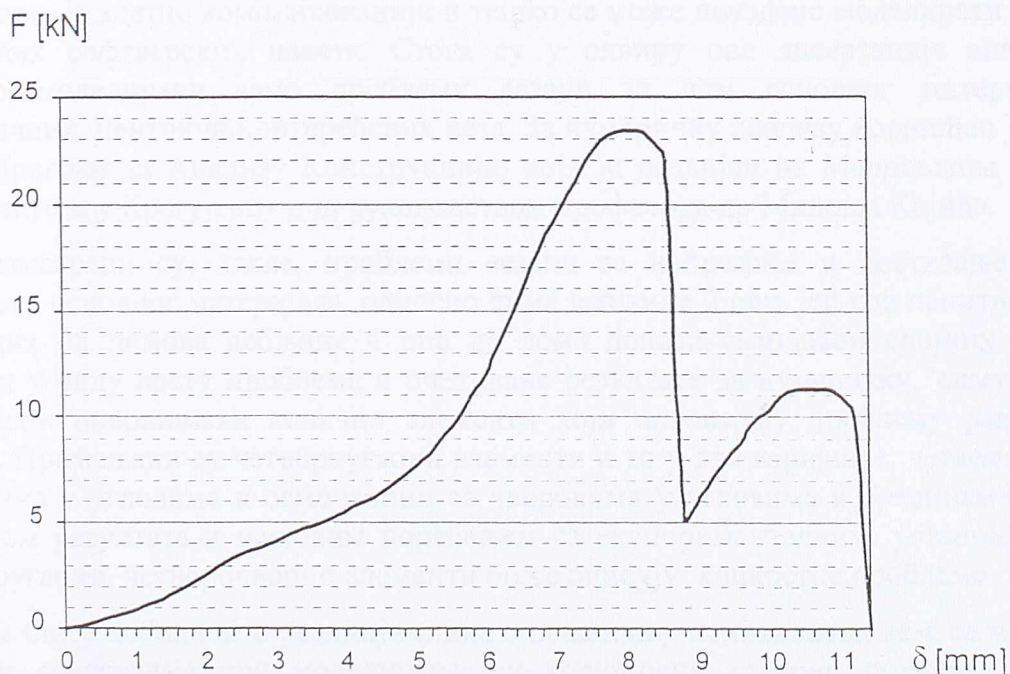
Слика 55 - Карактеристичан  $F$ - $\delta$  дијаграм за лом пробијањем глава самонарезајућих завртњева (серија TS10)

Деформације су код овог типа лома исте природе као и код претходног типа лома, али су вредности нешто веће (слика 55), као и вредности граничне силе (табела 21), док су одступања добијених резултата знатно мања. Да би се спречио лом пробијањем, узорци треће серије (TS10k) су снабдевени контра плочицом дебљине 4 mm, која се поставља испод глава завртњева. Стога је код ових узорака до лома дошло исцрпљењем затезне чврстоће самих самонарезајућих завртњева (слика 56), а не пробијањем глава завртњева или њиховим чупањем из доњег, носећег лима.



Слика 56 - Лом самонарезајућих завртњева затезањем и површине прелома

На слици 57 приказан је карактеристичан дијаграм сила-деформација за лом по завртњевима на коме се могу уочити две вршне вредности силе које дефинишу лом првог и другог завртња у вези. Такође се може приметити да је прва вршна вредност силе двоструко већа од друге, што указује на чињеницу да су носивости појединачних завртњева приближно исте. Ово, уз релативно мале вредности варијенсе, сведочи о уједначеном квалитету самонарезајућих завртњева. Деформације узорака ове серије су још мање због тога што контра плочица повећава крутост горњег профилисаног лима.



Слика 57 - Карактеристичан  $F$ - $\delta$  дијаграм за лом пробијањем глава самонарезајућих завртњева (серија TS10k)

## Поглавље 3:

# Нумеричка анализа

## 1 УВОД

Понашање механичких спојних средстава у везама танкозидних челичних елемената не може се посматрати независно од основног материјала од којег су ти елементи израђени. Наиме, као што је у претходном поглављу приказано, у неким случајевима долази до лома по основном материјалу, а не исцрпљењем носивости спојних средстава, на смицање или затезање. Моделирање понашања равних челичних лимова под оптерећењем у еластичној и постеластичној области може да се оствари применом различитих нумеричких метода. Данас се у свету највише примењује метода коначних елемената, па је она коришћена и у овом раду.

Типови лома основног материјала који су карактеристични за центрично оптерећене везе, као што су везе са обостраним подвезицама, су лом гњечењем лима, лом цепањем лима и лом нето пресека и они се успешно могу моделирати помоћу савремених софтверских пакета базираних на методи коначних елемената. Механизам лома кривљењем лима, који се јавља код ексцентрично оптерећених веза, какве су везе на преклоп, је знатно компликованији и тешко се може поуздано моделирати применом постојећих софтверских пакета. Стога су у оквиру ове дисертације анализирани, односно моделирани само проблеми везани за лом основног материјала код симетричних, центрично оптерећених веза. За нумеричку анализу коришћен је програм ПАК (Програм за Анализу Конструкција) који је развијен на Машинском факултету Универзитета у Крагујевцу под руководством професора др Милоша Којића.

Разматрани су, дакле, проблеми везани за напрезања и достизање граничне носивости основног материјала, односно лима дебљине 2 mm, јер код испитиваних веза израђених од лимова дебљине 4 mm до лома долази смицањем спојних средстава. Имајући у виду врсту проблема и очекиване резултате за нумеричку "симулацију" су коришћени површински коначни елементи који одговарају проблему равнотачног стања напона. Примењени су четвороугаони елементи и то у две варијанте: четворочворни са чворовима у угловима и осмочворни са чворовима у угловима и срединама страница. Анализом резултата и њиховим поређењем са експерименталним, установљено је да четвороугаони, четворочворни елементи боље описују конкретне проблеме.

Да би се добила што реалнија слика о понашању испитиваних веза са механичким спојним средствима при моделирању су коришћени стварни подаци о основном материјалу, односно његове реалне механичке карактеристике које су одређене експерименталним путем (видети поглавље 2). Репрезентативна  $\sigma$ - $\epsilon$  крива добијана приликом испитивања епрувета извађених из узорача израђених од лимова дебљине 2 mm је дигитализована и претворена у низ тачака у  $\sigma$ - $\epsilon$  координатном систему. На

основу ових тачака одређена је експоненцијална функција која оптимално описује експерименталну криву у њеном неоппадајућем сегменту. Опадајући део криве није анализиран с обзиром да коришћени софтвер (ПАК) још увек нема могућност разарања мреже коначних елемената у фази након потпуног исцрпљења носивости. Нелинеарна функција која описује ојачање материјала, за потребе нумеричке анализе, треба да буде дефинисана у следећем облику:

$$\sigma = f_y + C \cdot \varepsilon_{pl}^n \quad (18)$$

где су:

$f_y$  граница развлачења,

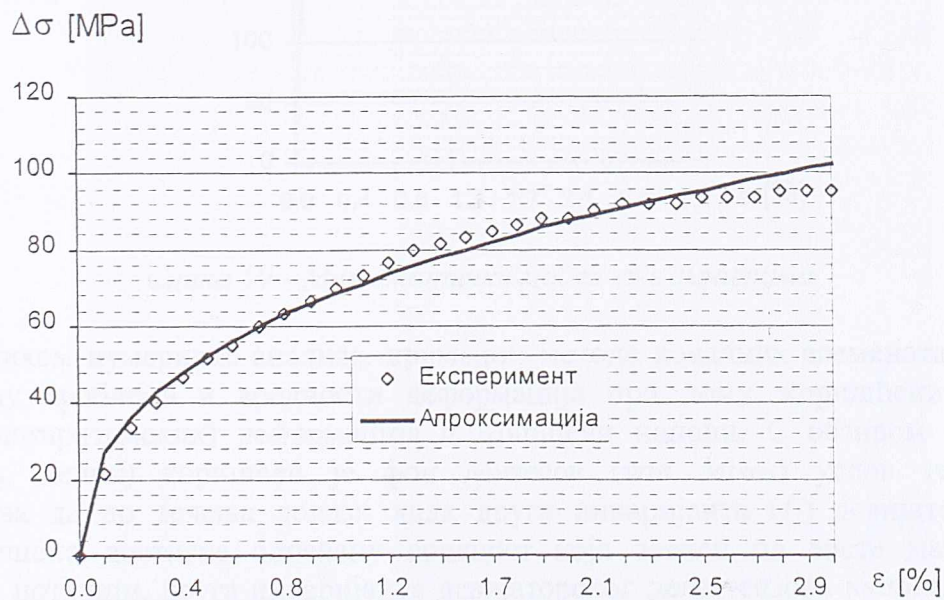
$\varepsilon_{pl}$  пластична компонента дилатације, а

$C$  и  $n$  параметри који зависе од основног материјала и одређују се експерименталним путем.

Пластична компонента дилатације може да се одреди на следећи начин:

$$\varepsilon_{pl} = \varepsilon - \varepsilon_{el} = \varepsilon - \frac{\sigma}{E} \quad (19)$$

где је  $\varepsilon$  укупна дилатација, а  $\varepsilon_{el}$  њен еластични део. На овај начин се на основу мерених вредности напона и дилатације за сваку дискретну тачку  $\sigma$ - $\varepsilon$  дијаграма може одредити вредност пластичне дилатације. Функција ојачања материјала одређена је нумеричком апроксимацијом низа тачака у координатном систему  $\sigma$ - $\varepsilon_{pl}$  помоћу програма *Mathcad* (слика 58).



Слика 58 - Одређивање функције ојачања материјала нумеричком апроксимацијом низа тачака

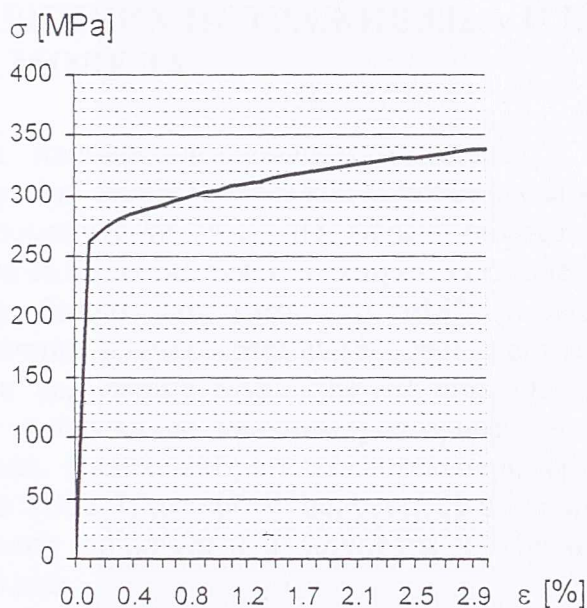
Треба напоменути да је, да би се добили тачнији резултати, приликом апроксимације коришћен локални координатни систем постављен у тачки у којој долази до почетка течења, односно развлачења. На тај начин је добијена функција која описује понашање материјала у области пластичног течења, при напонима већим од границе развлачења. У конкретном случају ова функција може да се напише у следећем облику:

$$\Delta\sigma = 79,931 \cdot \varepsilon_{pl}^{0,343} - 6,108 \quad (20)$$

где је  $\Delta\sigma$  прираштај напона у мегапаскалима, а  $\varepsilon_{pl}$  пластична дилатација у процентима. Ако се узме у обзир вредност напона на граници развлачења функција ојачања (закон течења) се трансформише у следећи облик:

$$\sigma = 79,931 \cdot \varepsilon_{pl}^{0,343} + 230,56 \quad (21)$$

У еластичној области, при напонима мањим од границе развлачења међусобна веза између напона и дилатације је линеарна у складу са утврђеним модулом еластичности ( $E$ ). Према томе, приликом нумеричке анализе понашање челика као изразито еластопластичног материјала описано је линеарном функцијом у еластичној области и експоненцијалном функцијом у области пластичног течења (слика 59).



Слика 59 - Математички модел  $\sigma$ - $\varepsilon$  дијаграма

Приликом нумеричке анализе, применом методе коначних елемената, с обзиром на природу проблема и вредности деформација при лому, коришћени су метода великих (логаритамских) деформација и Кошијеви напони. С обзиром на природу материјала (челик) коришћен је фон Мизесов (*von Mises*) услов течења, који подразумева да до течења долази када друга инваријанта ( $I_2$ ) девијаторског дела тензора напона достигне одређену вредност која зависи од врсте материјала. У тензорској нотацији, друга инваријанта девијаторског дела тензора напона може да се напише у следећем облику:

$$I_2 = \frac{1}{2} \sigma'_{ij} \cdot \sigma'_{ij} \quad (22)$$

где су:

$$\sigma'_{ij} = \sigma_{ij} - \frac{1}{3} \delta_{ij} \cdot \sigma_{kk} \quad (23)$$

$$\sigma_{kk} = \sum_{i=1}^3 \sigma_{ii} \quad (24)$$

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1 & i = j \\ 0 & i \neq j \end{cases} \quad \text{Кронекеров (Kronecker) делта симбол} \quad (25)$$

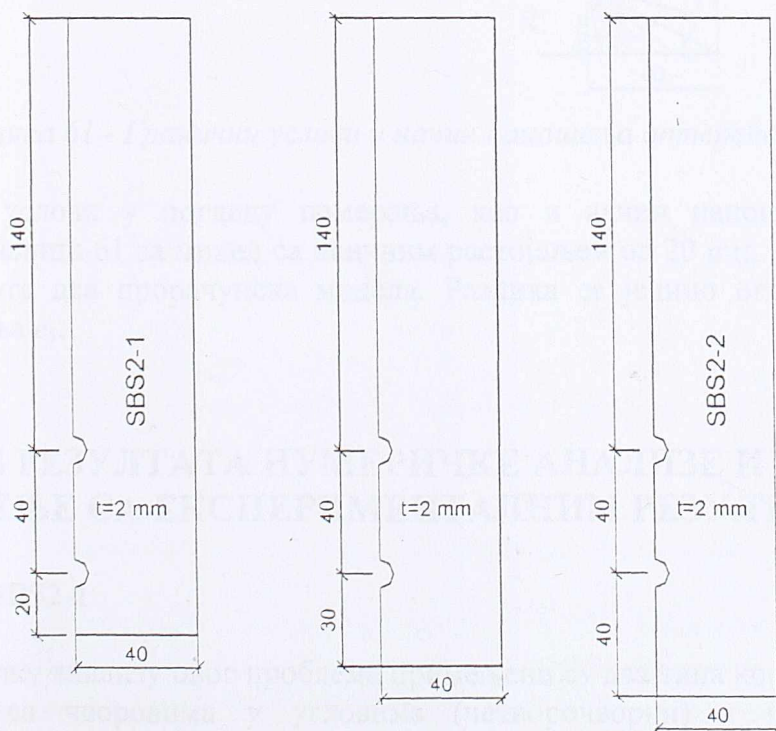
За случај равнoг стања напона, претходни изрази се могу поједноставити тако да се фон Мизесов услов течења може написати у следећем облику:

$$\sigma_u = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \cdot \sigma_y + 3\tau_{xy}^2} = f_y \quad (26)$$

где је  $\sigma_u$  упоредни, односно ефективни напон, а  $f_y$  граница развлачења основног материјала.

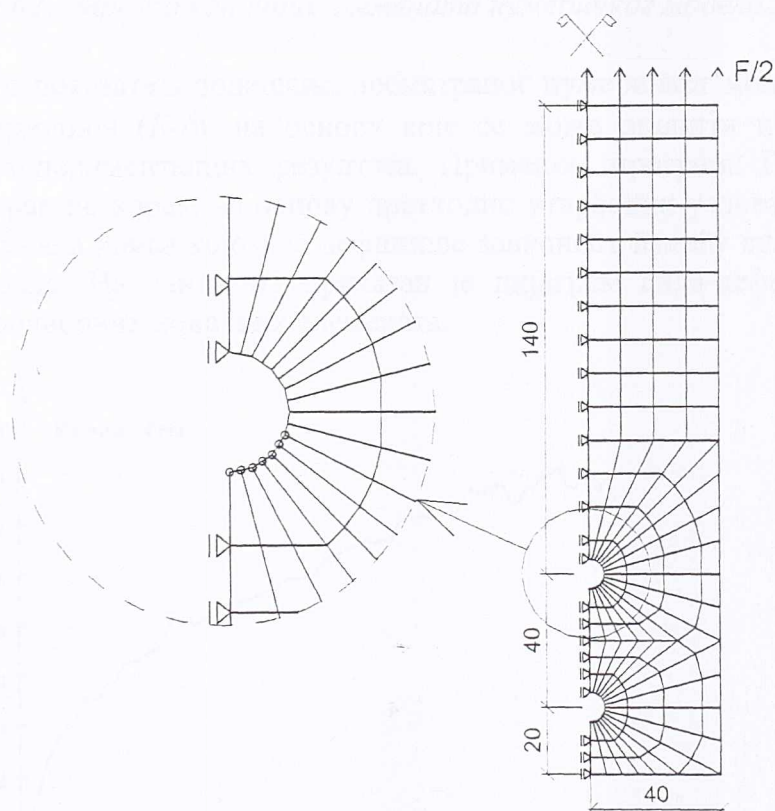
## 2 ПРИКАЗ НУМЕРИЧКИХ ИСТРАЖИВАЊА И КОНЦЕПЦИЈЕ НУМЕРИЧКИХ МОДЕЛА

Нумеричка анализа напонско-деформацијског стања у основном челичном материјалу спроведена је за оне серије узорака код којих се јављају ломови по основном материјалу. Како је већ поменуто то су серије узорака веза са центрично уношеним оптерећењем, односно веза са подвезицама. Као репрезентативне су издвојене серије са везама оствареним помоћу обичних завртњева и то: SBS2-1 и SBS2-2. Поменуте серије разликују се само по величини ивичног растојања првог завртња ( $e_1$ ), које код серије SBS2-1 износи 20 mm, а код серије SBS2-2 је 40 mm. Осим тога, нумерички је моделиран и анализиран и случај са ивичним растојањем  $e_1 = 30$  mm, који није експериментално испитиван. Наиме, добро слагање експерименталних и нумеричких резултата серија SBS2-1 и SBS2-2, потврђују исправност нумеричких модела, те се са великом вероватноћом могу прихватити и резултати нумеричке анализе модела са ивичним растојањем од 30 mm.



Слика 60 - Геометрија прорачунских модела

С обзиром на симетрију везе и у подужном и у попречном смислу, у циљу поједностављења и убрзања поступка нумеричке анализе испитивани су модели са геометријом приказаном на слици 60, која не угрожава тачност добијених резултата. Моделирани су, дакле, само основни елементи (лимови) који су изложени максималним утицајима у вези и који доживљавају лом при граничном стању носивости. Обостране подвезице су дебљине као и основни лим (по 2 mm) па су стога изложене двоструко мањим напонима, те код њих при лому везе не долази до значајних напрезања и деформација. Стога оне нису укључене у прорачунски модел, као ни завртњеве, који су у овом случају третирани као места ослањања, односно контакта. Деформације тела завртња су занемарене.



Слика 61 - Гранични услови и начин наношења оптерећења

Гранични услови у погледу померања, као и начин наношења оптерећења приказани су на слици 61 за модел са ивичним растојањем од 20 mm. На исти начин су третирана и друга два прорачунска модела. Разлика се једино огледа у вредности ивичног растојања  $e_1$ .

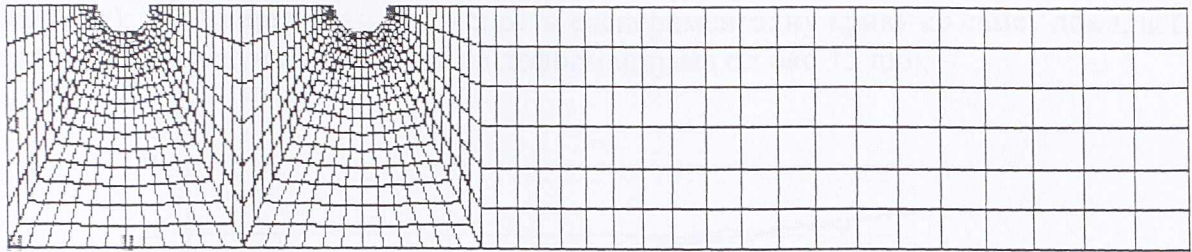
### 3 ПРИКАЗ РЕЗУЛТАТА НУМЕРИЧКЕ АНАЛИЗЕ И ЊИХОВО ПОРЕЂЕЊЕ СА ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИМ РЕЗУЛТАТИМА

#### 3.1 СЕРИЈА SBS2-1

За нумеричку анализу овог проблема примењена су два типа коначних елемената: четвороугаони са чворовима у угловима (четворочворни) и четвороугаони са чворовима у угловима и срединама страница (осмочворни), како би се поређењем са експерименталним резултатима установило који од поменутих коначних елемената

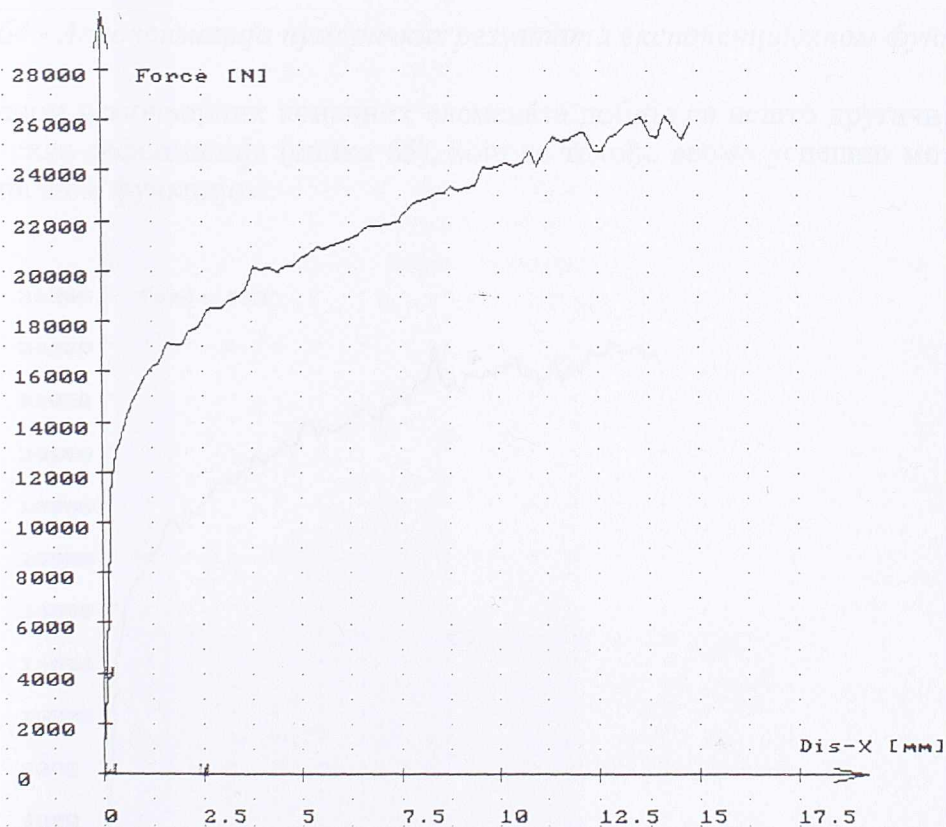


боље описује конкретни проблем. У оба случаја коришћена је иста мрежа коначних елемената (слика 62)



Слика 62 - Мрежа коначних елемената нумеричког модела SBS2-1

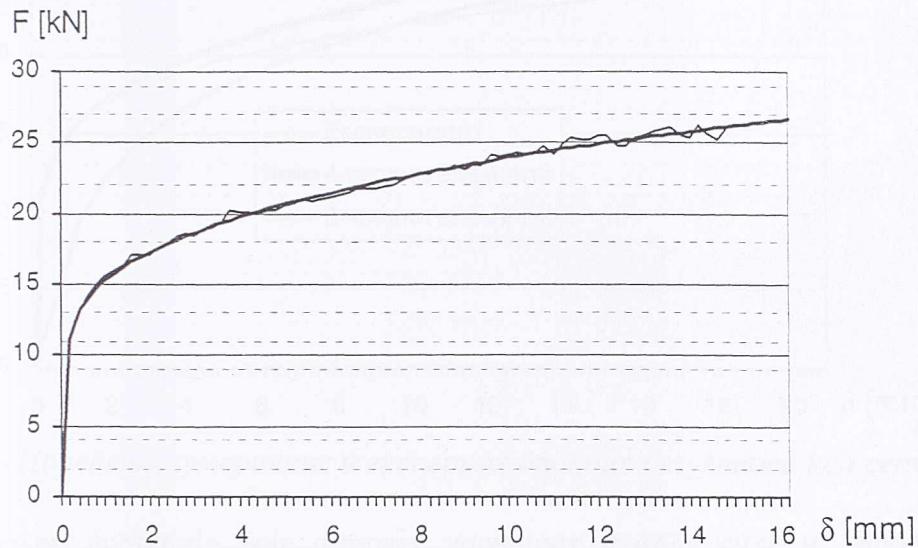
Као основни показатељ понашања посматраног нумеричког модела послужила је крива сила-деформација ( $F-\delta$ ), на основу које се може оценити и компатибилност нумеричких и експерименталних резултата. Применом програма ПАК нумеричком интеграцијом, корак по корак, на основу претходно утврђених услова и закона течења добијена је нумеричка крива којом се дефинише зависност између силе и деформација посматраног модела. На слици 63 приказан је дијаграм сила-деформација добијен применом четворочворних коначних елемената.



Слика 63 - Дијаграм сила-деформација добијен нумеричком анализом, применом четворочворних коначних елемената

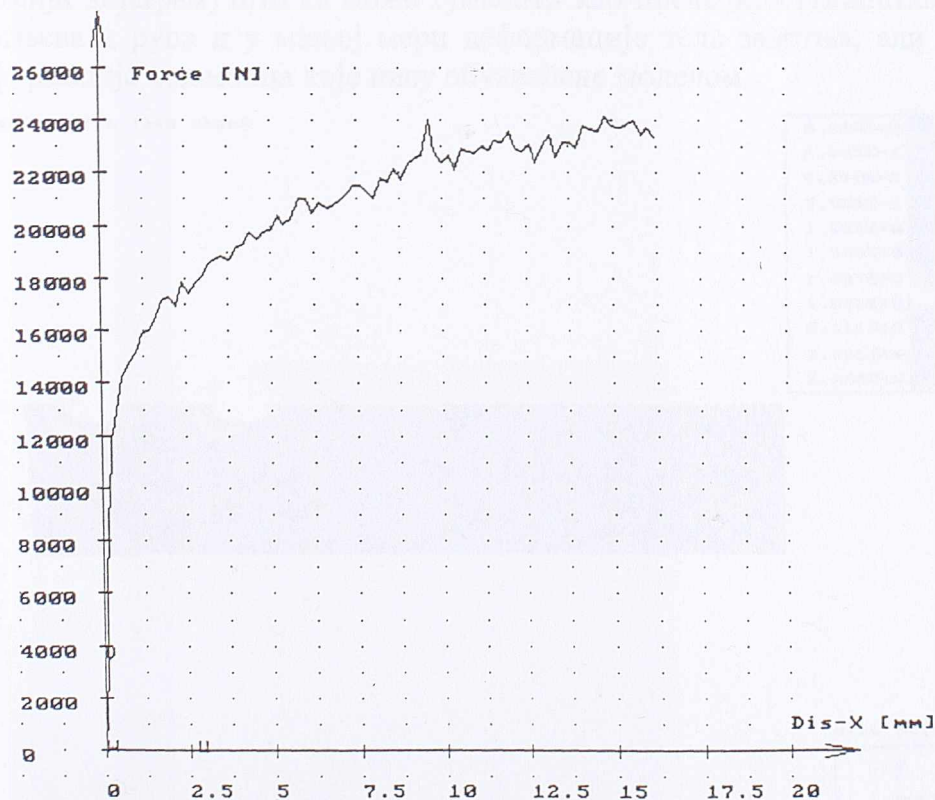
Осцилације (пулсирање) нумеричких вредности око замишљене глатке криве у постеластичној области понашања последица су нумеричке интеграције - корак по корак и не утичу на граничне вредности силе лома ( $F_u$ ). Овако добијени нумерички резултати могу веома успешно да се апроксимирају глатком кривом у експоненцијалном облику (слика 64). С обзиром на добро слагање резултата, које се

може уочити са слике, ова крива може се користити и за предвиђање даљег понашања нумеричког модела, односно за екстраполацију резултата. Ово је посебно важно ако се има у виду да програм ПАК нема могућност разарања мреже коначних елемената (*remashing*), те да није у стању да испрати експерименталну криву до самог лома, већ се прорачун у овом случају завршава са деформацијама од око 15 mm.

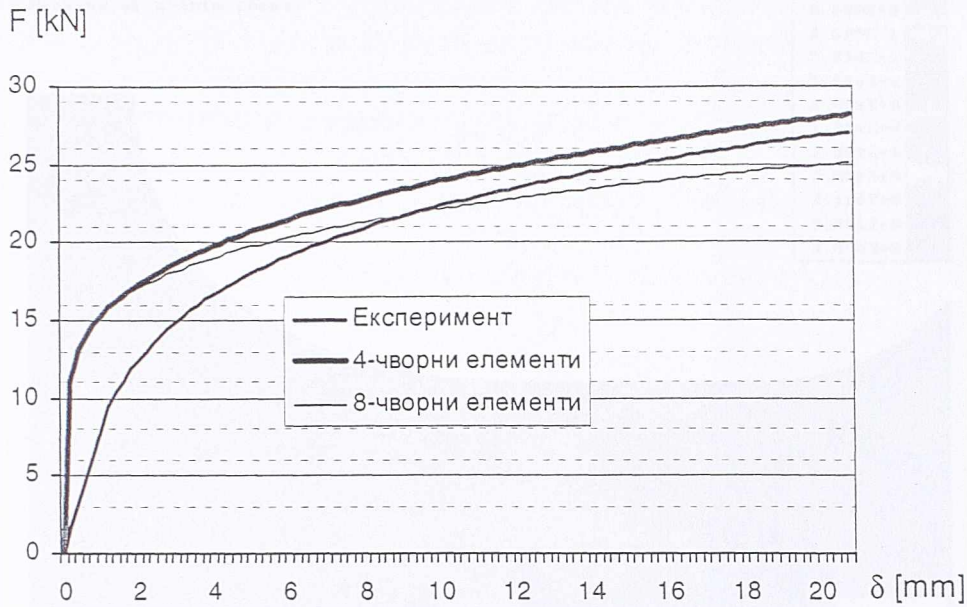


Слика 64 - Апроксимација нумеричких резултата експоненцијалном функцијом

Применом осмочворних коначних елемената добија се нешто другачији дијаграм зависности сила-деформација (слика 65), који се такође веома успешно може описати експоненцијалном функцијом.



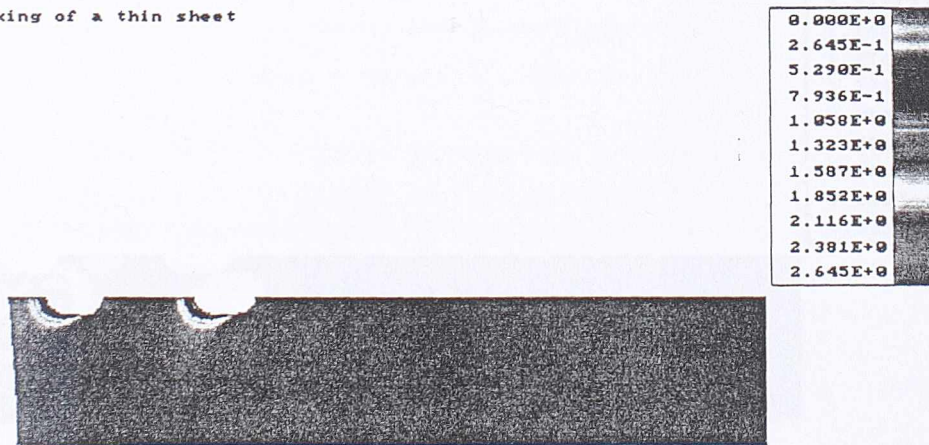
Слика 65 - Дијаграм сила-деформација добијен нумеричком анализом, применом осмочворних коначних елемената



Слика 66 - Поређење нумеричких и експерименталних резултата код серије SBS2-1

Поређењем функција које описују зависност између силе и деформације ( $F-\delta$  криве) добијених применом четворочворних и осмочворних четвороугаоних коначних елемената, са експерименталном  $F-\delta$  кривом уочено је да четворочворни елементи боље описују конкретан проблем (слика 66), па су при даљој анализи других серија примењивани само четворочворни коначни елементи. Код оба прорачунска модела може да се уочи извесно одступање од експерименталних резултата у еластичној области (стрмији дијаграм) што се може тумачити као последица поништавања зазора између завртњева и рупа и у мањој мери деформације тела завртња, али најпре као резултат деформација подвезица које нису обухваћене моделом.

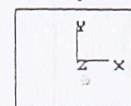
Necking of a thin sheet



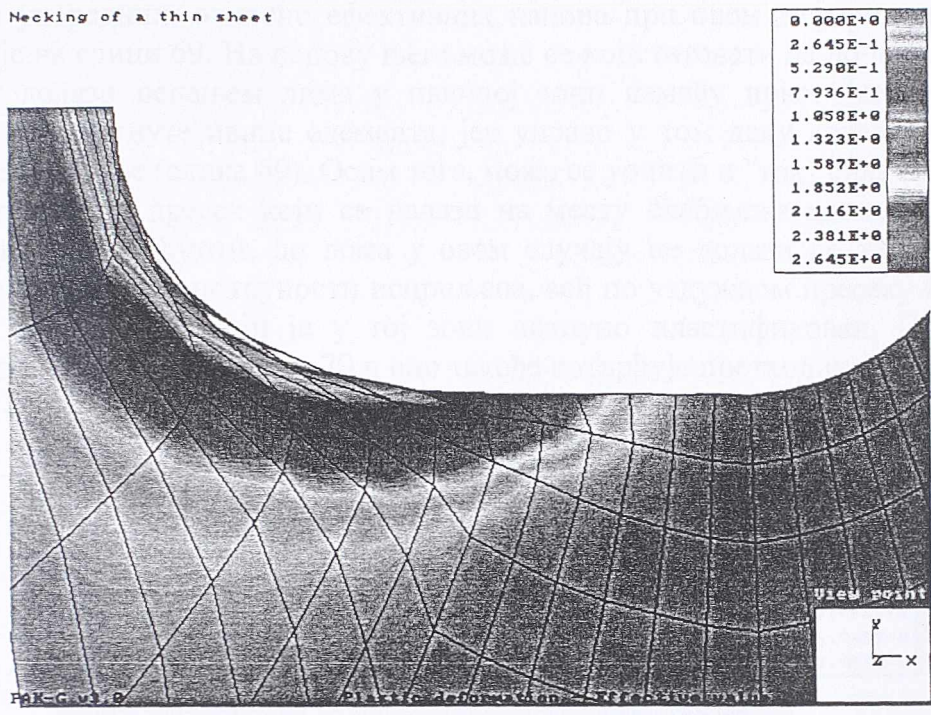
PAK-G v3.0

Plastic deformation - Effective value

View point

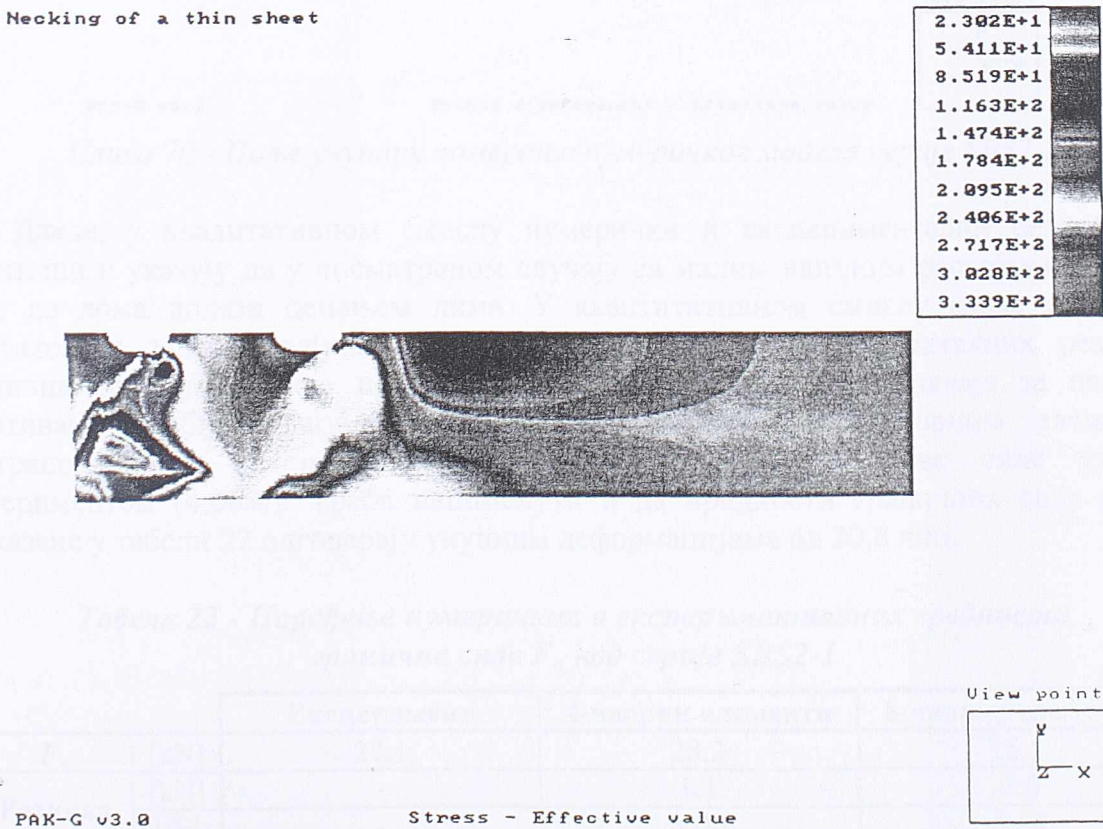


Слика 67 - Поље пластичних деформација непосредно пре лома



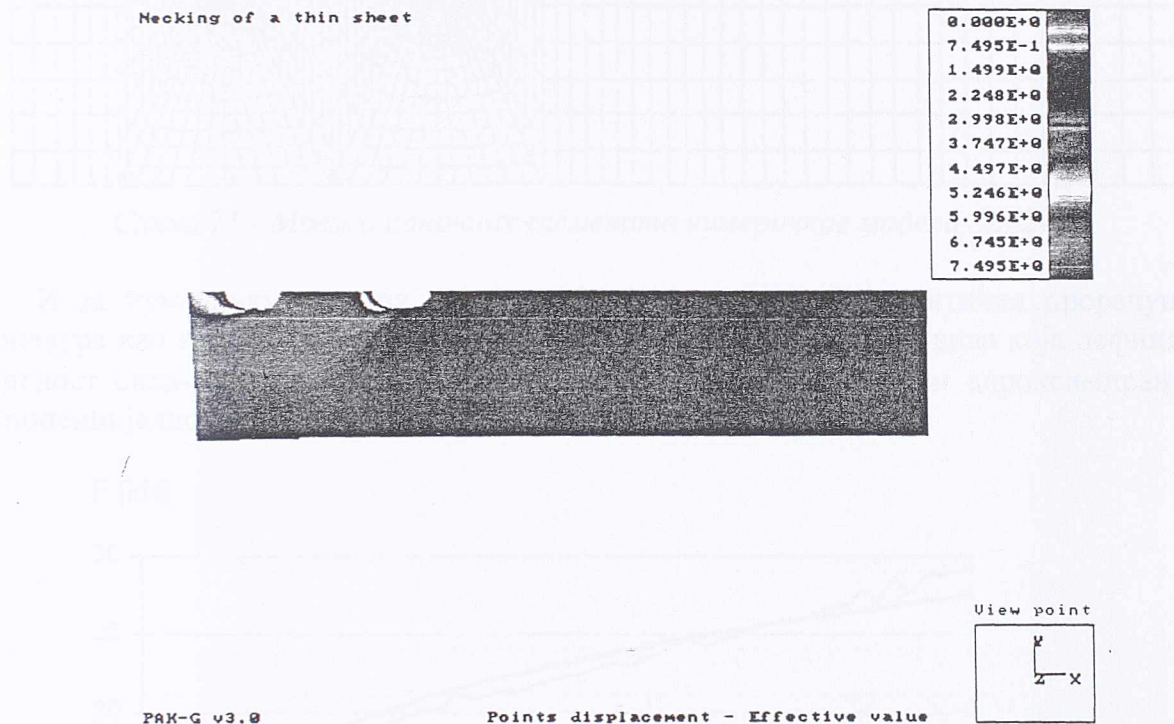
Слика 68 - Пластичне деформације у зони прве рупе за спојна средства

Прорачунски модели указују на значајне пластичне деформације у зони рупа за спојна средства чијим прогресивним ширењем долази и до лома основног материјала цепањем лима у ивичној зони. На сликама 67 и 68 приказане су пластичне деформације посматраног модела непосредно пре исцрпљења његове носивости, односно у крајњем стадијуму пластичног понашања који се може испратити применом програма ПАК.



Слика 69 - Поље упоредних (ефективних) напона непосредно пре лома

Поље упоредних, односно ефективних напона при овом деформацијском стању приказано је на слици 69. На основу њега може се констатовати да до лома у основном материјалу долази цепањем лима у ивичној зони између првог (левог) завртња и слободне, ненапрегнуте ивице елемента, јер управо у том делу долази до достизања чврстоће на затезање (слика 69). Осим тога, може се уочити и "ток" сила (напона), као и критичан попречни пресек који се налази на месту слабљења елемента код другог (десног) завртња. Међутим, до лома у овом случају не долази по нето пресеку, јер његова носивост није у потпуности исцрпљена, већ по уздужном пресеку између првог завртња и ивице лима који је у тој зони потпуно пластификован. Поље укупних померања приказано је на слици 70 и оно такође потврђује претходну констатацију.



Слика 70 - Поље укупних померања нумеричког модела серије SBS2-1

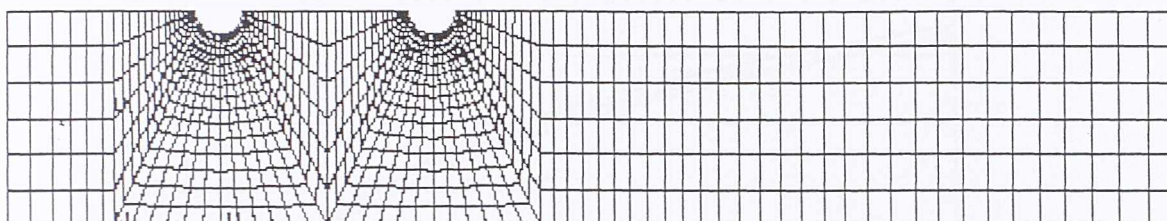
Дакле, у квалитативном смислу нумерички и експериментални резултати су идентични и указују да у посматраном случају са малим ивичним растојањем ( $e_1 = 20$  mm), до лома долази цепањем лима. У квантитативном смислу може се, такође, констатовати задовољавајуће слагање нумеричких и експерименталних резултата. Гранична сила лома, која представља величину од највећег значаја за поменуто испитивање, добијена нумеричким поступком са четворочворним елементима (екстраполацијом) не разликује се битно од вредности ове силе утврђене експериментом (4,06%). Треба напоменути и да вредности граничних сила које су приказане у табели 22 одговарају укупним деформацијама од 20,8 mm.

Табела 22 - Поређење нумеричких и експерименталних вредности граничне силе  $F_u$  код серије SBS2-1

		Експеримент	4-чворни елементи	8-чворни елементи
$F_u$	[kN]	27,1	28,2	25,1
Разлика	[kN]	-	1,1	-2,0
	[%]	-	4,06	-7,54

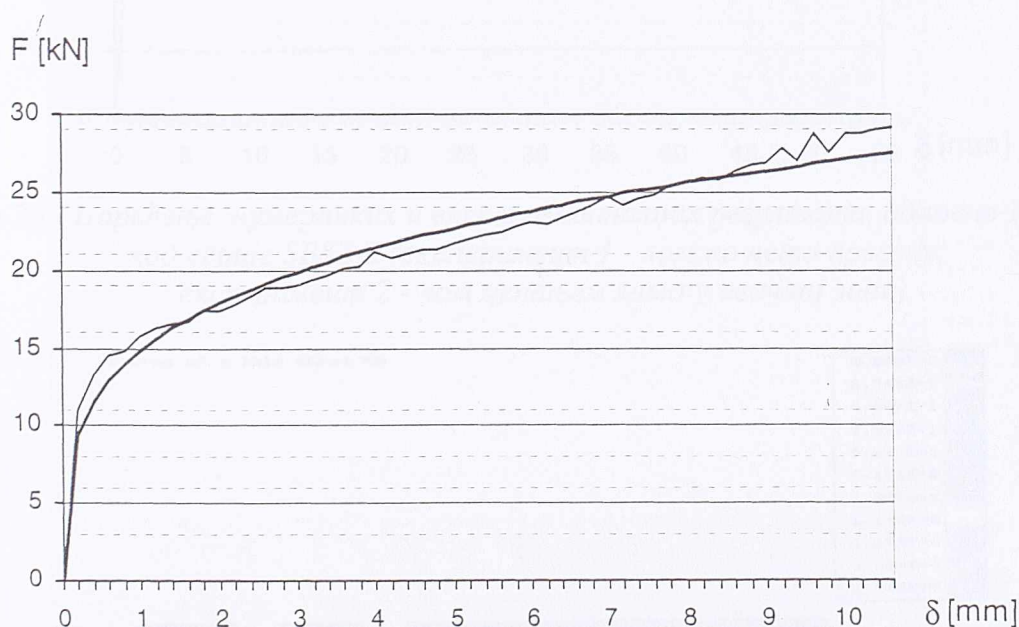
### 3.2 СЕРИЈА SBS2-2

С обзиром на искуства стечена на претходном нумеричком моделу (SBS2-1), приликом нумеричке анализе ове серије узорака коришћени су четворочворни четвороугаони коначни елементи чија је мрежа незнатно измењена у односу на нумерички модел претходне серије (слика 71). Измена се односи само на ивичну зону од првог завртња до ненапрегнуте ивице, која је проширена у складу са геометријом испитиване серије ( $e_1 = 40 \text{ mm}$ ).



Слика 71 - Мрежа коначних елемената нумеричког модела SBS2-2

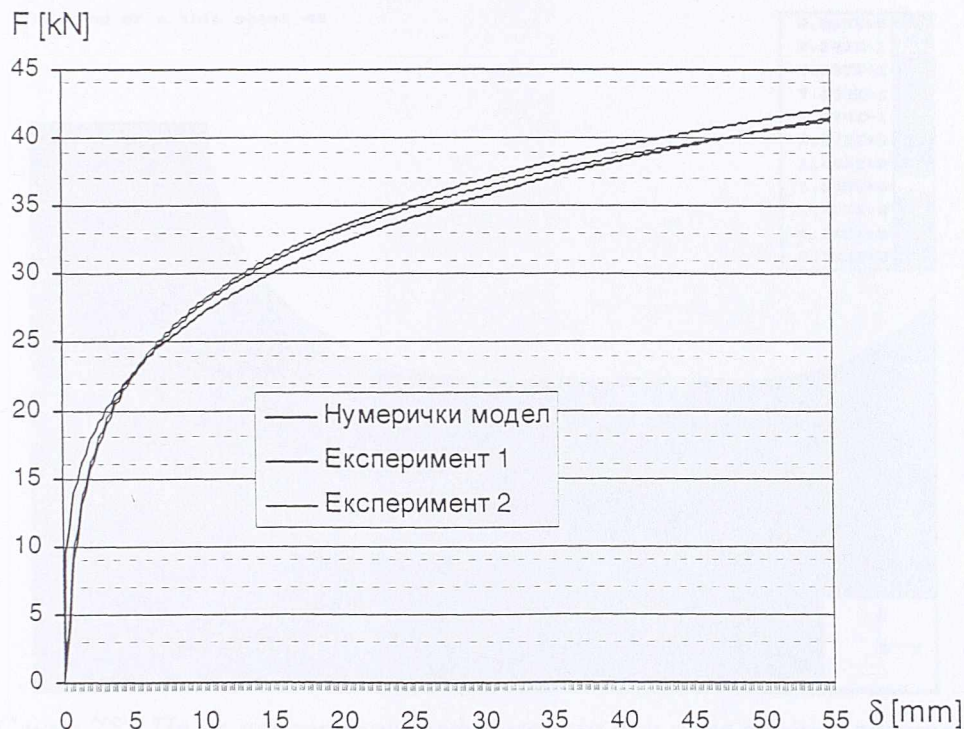
И за нумеричку анализу серије SBS2-2 примењена је идентична прорачунска процедура као и код серије SBS2-1. Као и у претходном случају крива која дефинише зависност сила-деформација ( $F-\delta$ ), добијена нумеричком анализом апроксимирана је експоненцијалном функцијом (слика 72).



Слика 72 - Дијаграм сила-деформација добијен нумеричком анализом и његова апроксимација експоненцијалном функцијом

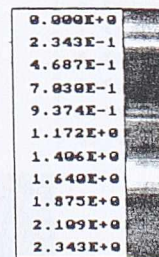
Функција је одређена на основу минималних оступања од задатог низа тачака, применом одговарајућег софтвера. Експоненцијална функција добијена на овај начин може успешно да се користи и за екстраполацију нумеричких резултата, односно предвиђање понашања нумеричког модела до самог лома. Ово је посебно важно ако се има у виду да нумерички модел, због немогућности разарања мреже коначних елемената, не може да прикаже зависност сила-деформација за деформације преко 11 mm, а гранична стања лома, како показују експериментална испитивања, наступају тек при укупним вредностима деформација од 55 до 65 mm. Међутим, поређењем

експоненцијалне функције која описује понашање нумеричког модела са експерименталним кривама установљено је веома добро слагање и у обалсти великих деформација од 11 до 55 mm. Код узорака серије SBS2-2 је дошло до појаве два различита типа лома: лом нето пресека (2 узорка) и лом цепањем лима у ивичној зони (2 узорка), па је стога на слици 73 приказано поређење нумеричких резултата са експерименталним резултатима карактеристичним за оба типа лома. Очито је да се резултати нумеричких и експерименталних испитивања веома добро слажу.

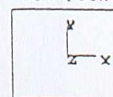


Слика 73 - Поређење нумеричких и експерименталних резултата, односно  $F$ - $\delta$  кривих код серије SBS2-2 (експеримент 1 - лом по нето пресеку; експеримент 2 - лом цепањем лима у ивичној зони)

Necking of a thin sheet 40



View point



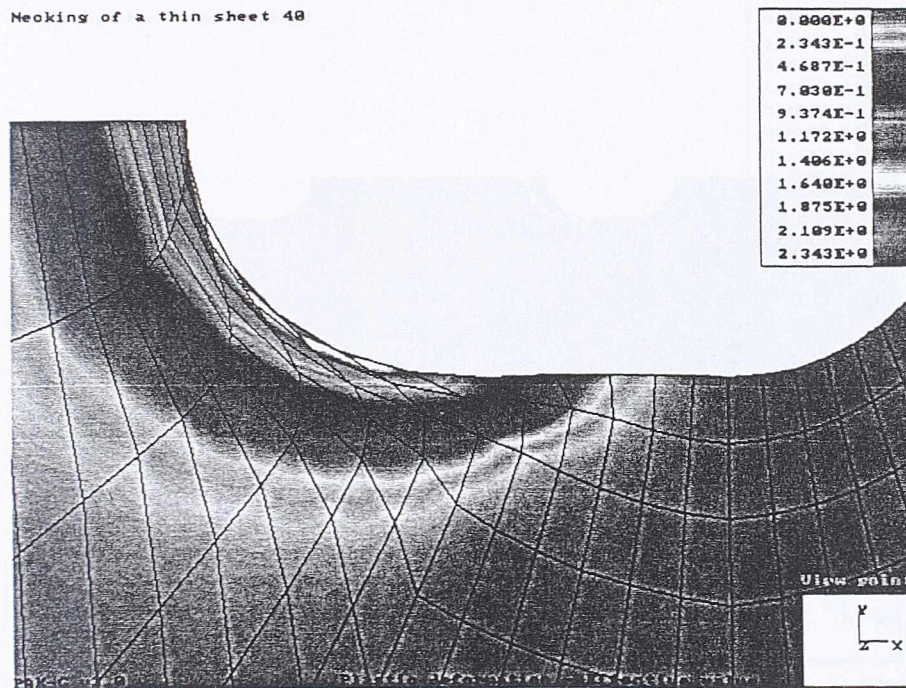
PAK-G v3.0

Plastic deformation - Effective value

Слика 74 - Поље граничних пластичних деформација

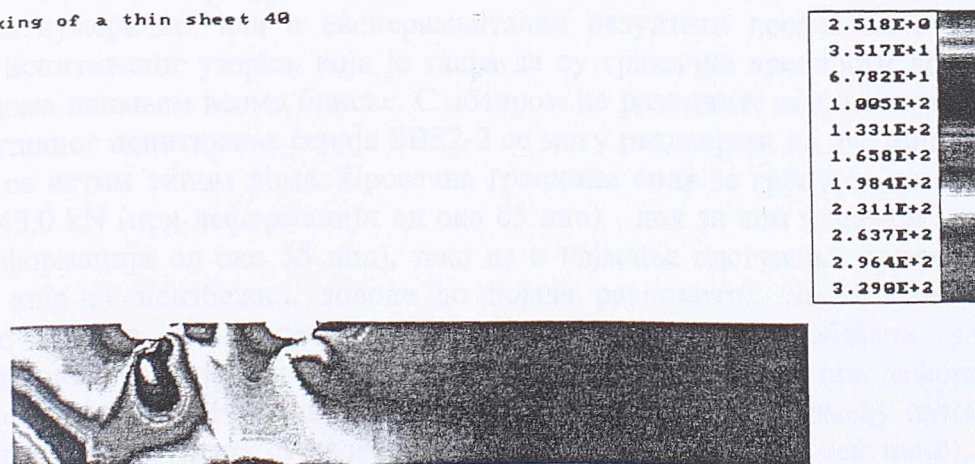
Поред података о зависности између силе и деформације нумерички модел пружа информације и о напонско деформацијском стању у моделу у свим фазама напрезања. На сликама 74 и 75 приказано је поље пластичних деформација нумеричког модела при укупним деформацијама од 11 mm. Као и у претходном примеру (серија SBS2-1) приметне су значајне пластичне деформације основног материјала у зони контакта са завртњевима, али су оне генерално мање него код серије SBS2-1, а посебно у односу на деформације у зони првог завртња до ненапрегнуте, слободне ивице.

Necking of a thin sheet 40



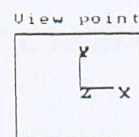
Слика 75 - Поље пластичних деформација око рупе за први завртња

Necking of a thin sheet 40



PAK-G v3.0

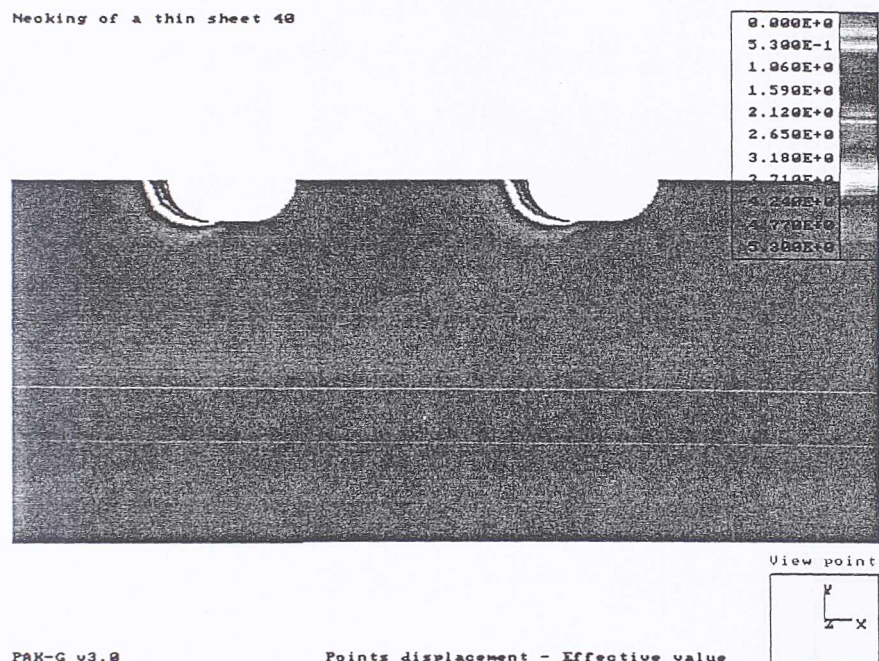
Stress - Effective value



Слика 76 - Поље упоредног (фон Мизесовог) напона при граничним деформацијама оствареним на моделу



На основу поља упоредног (фон Мизесовог) напона (слика 76), може да се уочи да постоје две зоне прогресивне пластификације основног материјала. Једна се налази на месту карактеристичног нето пресека у зони рупе за други завртвањ, а друга на месту ивичног пресека, између првог завртвања и слободне ивице елемента. Како се ова напонска слика односи на стање деформација од 11 mm, не може се са сигурношћу проценити који ће од потенцијалних видова лома наступити. То се не може учинити ни на основу поља укупних деформација (слика 77).



Слика 77 - Поље укупних деформација

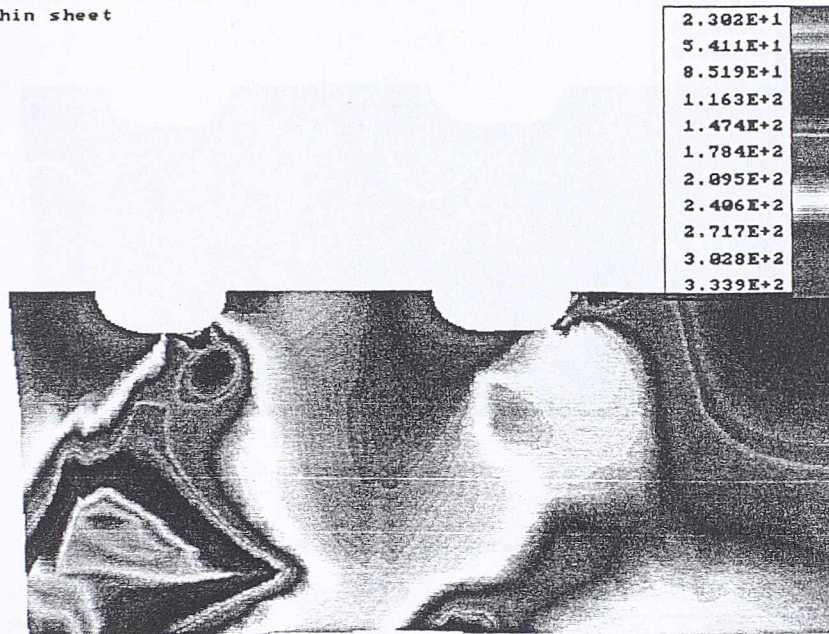
Овакви нумерички, али и експериментални резултати последица су пре свега геометрије испитиваног узорка, која је таква да су граничне вредности лома по нето пресеку и лома цепањем веома блиске. С обзиром на различите типове лома резултати експерименталног испитивања серије SBS2-2 се могу раздвојити на две подгрупе од по два узорка са истим типом лома. Просечна гранична сила за групу са ломом по нето пресеку је 43,0 kN (при деформацији од око 65 mm) , док за лом цепањем износи 40,7 kN (при деформацији од око 55 mm), тако да и најмања одступања приликом израде узорака, а која су неизбежна, доводе до појаве различитих типова лома. Што се нумеричког модела тиче, гранична вредност силе лома добијена на основу екстраполационе функције при деформацији од 55 mm је 41,5 kN, а при деформацији од 65 mm износи 43,2 kN. И у једном и у другом случају разлике између нумеричких и експерименталних резултата су веома мале (2%, односно 0,5%, респективно), али се на основу ових одступања може наслутити да је вероватнији лом по нето пресеку, јер су разлике мање. Међутим, вредности граничне силе носивости, што је можда и најважније, не варирају значајно без обзира на вид лома који ће се појавити.

### 3.3 УПОРЕДНА АНАЛИЗА НАПОНСКО ДЕФОРМАЦИЈСКОГ СТАЊА НУМЕРИЧКИХ МОДЕЛА СЕРИЈА SBS2-1 И SBS2-2

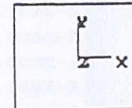
Разлике у понашању узорка серија SBS2-1 и SBS2-2 најбоље се могу уочити директним поређењем напонско деформацијских стања добијених на основу

одговарајућих нумеричких модела. На тај начин се може уочити значај ивичног растојања и његов утицај на тип лома и носивост читаве везе. На слици 78 приказани су дијаграми упоредних напона за обе испитиване серије, док су на слици 79, такође за обе анализиране серије, приказана поља пластичних деформација.

Necking of a thin sheet



View point

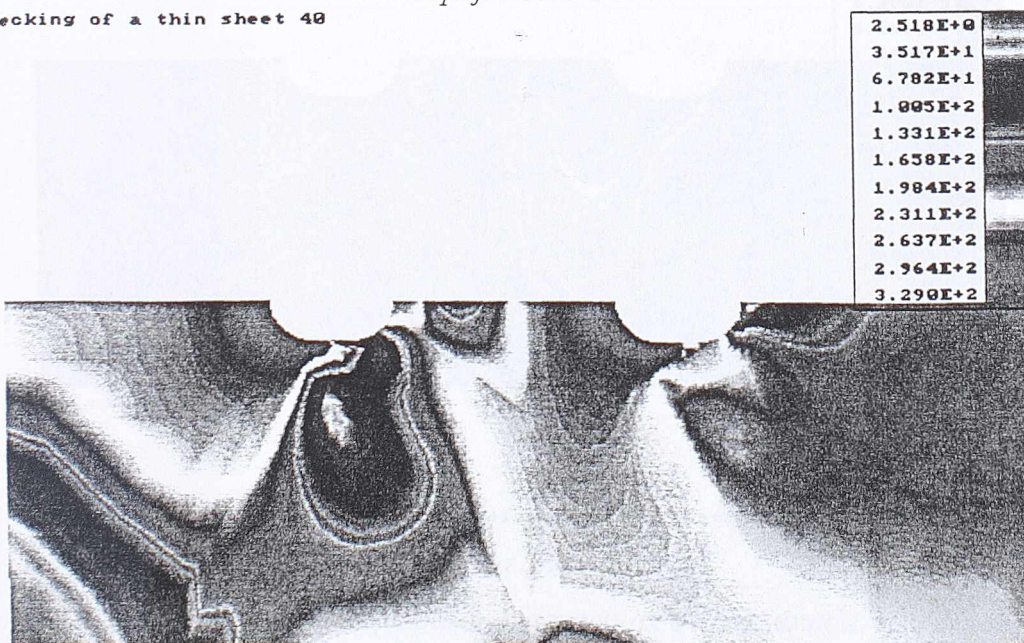


PAK-G v3.0

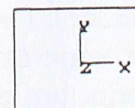
Stress - Effective value

Серија SBS2-1

Necking of a thin sheet 40



View point



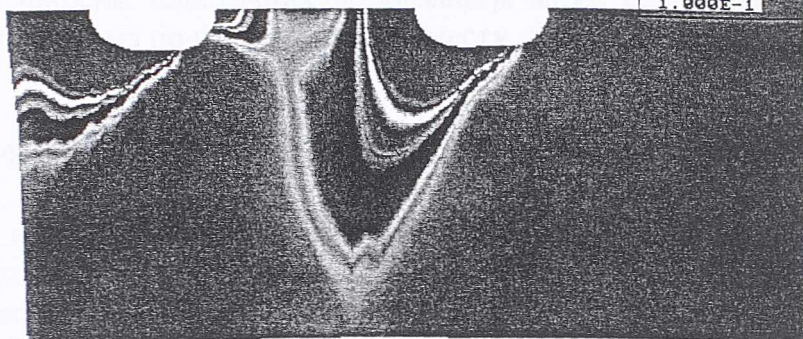
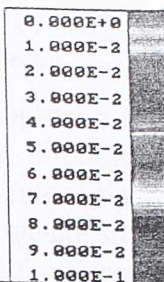
PAK-G v3.0

Stress - Effective value

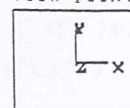
Серија SBS2-2

Слика 78 - Дијаграми упоредних (фон Мизесових) напона

Necking of a thin sheet



View point

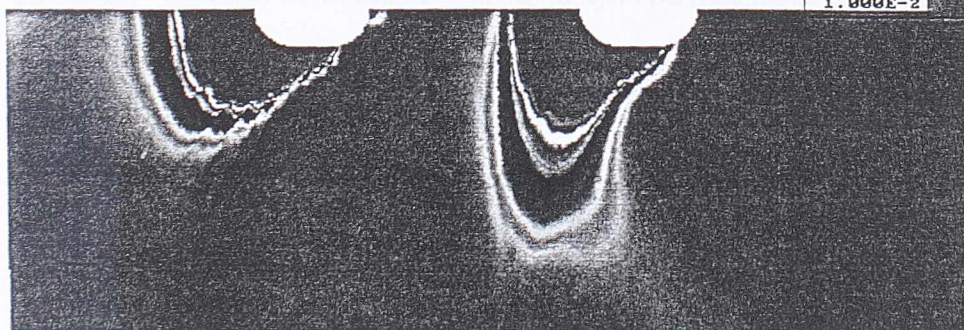
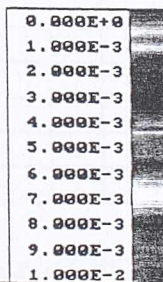


PAK-G v3.0

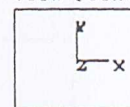
Plastic deformation - Effective value

Серија SBS2-1

Necking of a thin sheet 40



View point



PAK-G v3.0

Plastic deformation - Effective value

Серија SBS2-2

Слика 79 - Дијаграми пластичних деформација

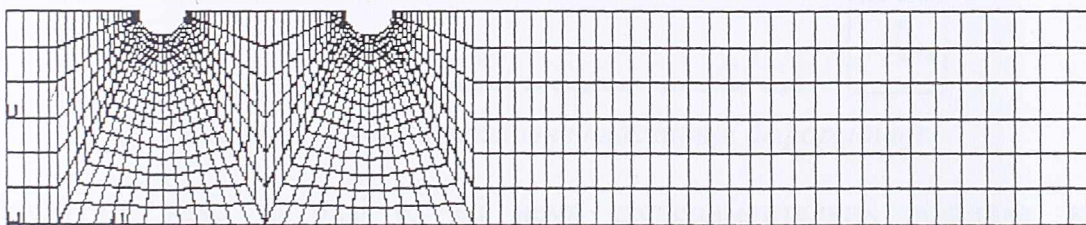
У случају серије узорак са малим ивичним растојањем (SBS2-1) долази до лома цепањем лима у ивичној зони, јер се напони у пресеку између рупе за први завртањ и слободне ивице крећу у опсегу од 270 МПа до 330 МПа, дакле тај пресек је у потпуности пластификован ( $f_y = 247$  МПа), а ивична влакна већ достижу и чврстоћу на затезање ( $f_u = 332$  МПа). Према томе, у овом случају нема неизвесности у погледу типа

лома, што поткрепљује и дијаграм пластичних деформација, на основу кога се јасно може навестити цепање основног материјала у зони првог завртња.

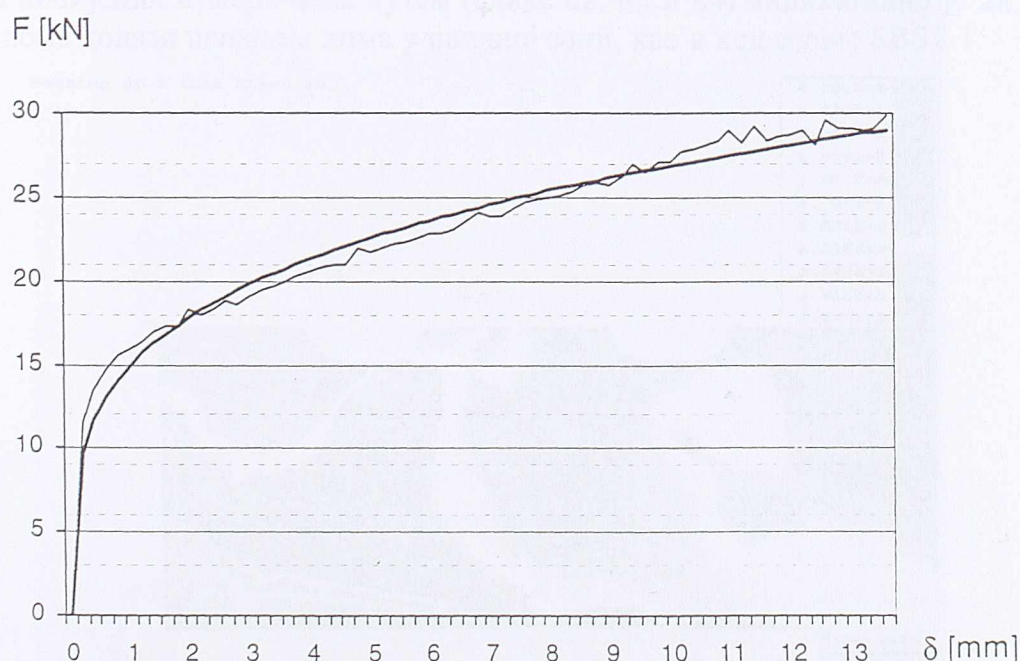
Када је ивично растојање велико, као што је то случај са узорцима серије SBS2-2 ( $e_1 = 40 \text{ mm}$ ), долази до затварања зоне пластификације уз слободну ивицу уз истовремену појаву пластичне зоне на месту нето пресека. Напони у овим зонама се крећу од око 230 МПа до 330 МПа. На основу слике пластичних деформација, а према облику и тенденцији ширења пластичних деформација може се очекивати да даља пластификација доведе до лома по нето пресеку на месту другог завртња.

### 3.4 МОДЕЛ СА СРЕДЊОМ ВЕЛИЧИНОМ ИВИЧНОГ РАСТОЈАЊА - SBS2-3

Имајући у виду веома добро слагање нумеричких и експерименталних резултата добијених код претходних серија, нумеричким поступком је анализирана још једна серија са ивичним растојањем које је једнако средњој вредности ивичних растојања серија SBS2-1 и SBS2-2 и износи 30 mm. На овај начин, без експерименталног испитивања анализиран је још један интересантан случај, чији резултати могу да буду прихваћени без велике резерве, с обзиром да су исправност и поузданост нумеричког модела потврђени на претходно анализираним серијама.

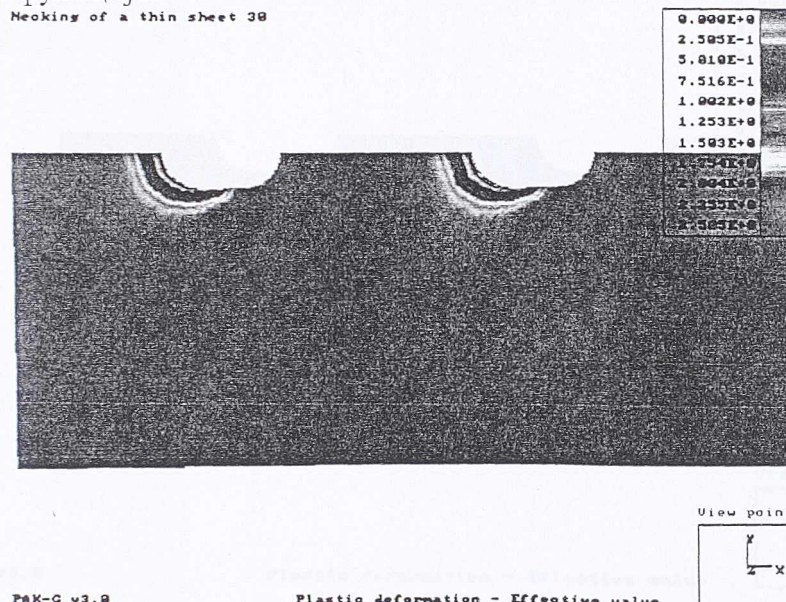


Слика 80 - Мрежа коначних елемената нумеричког модела SBS2-3



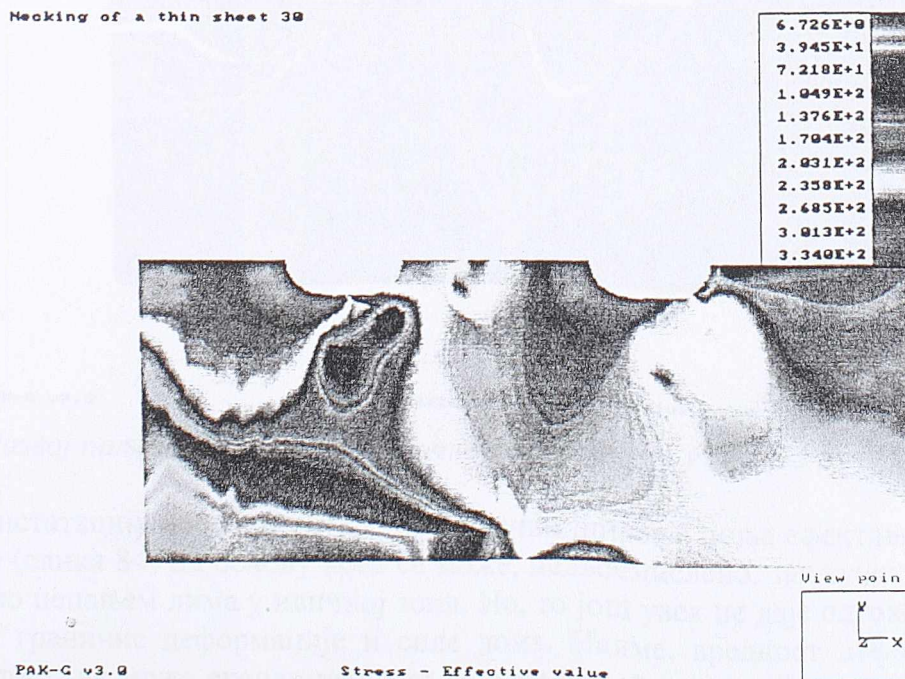
Слика 81 - Дијаграм сила-деформација добијен нумеричком анализом и његова апроксимација експоненцијалном функцијом

Као и у претходним случајевима, као главни показатељ понашања везе анализирана је крива  $F-\delta$  која је апроксимирана одговарајућом експоненцијалном функцијом (слика 81). Нумерички модел је, као што је то био случај код претходних серија исцрпео своје могућности пре самог лома елемента, односно у овом, конкретном примеру при деформацијама од око 14 mm. Гранична сила лома која се достиже тек при већим деформацијама може се екстраполацијом одредити на основу одговарајуће експоненцијалне функције.



Слика 82 - Поље ефективне пластичне деформације

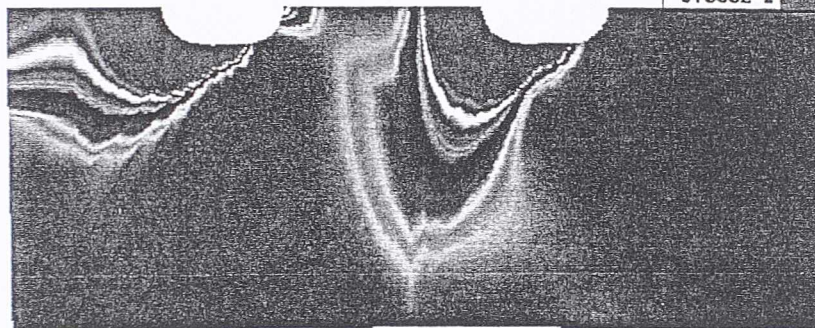
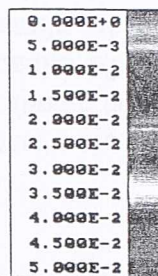
Међутим, како за овај случај нема експерименталних података, као код претходних, не може се једноставно одредити вредност деформације при лому која је неопходна да би се срачунала гранична сила лома. На основу напонско деформацијских показатеља добијених нумеричким путем (слике 82, 83 и 84) индикативно је да у овом случају до лома долази цепањем лима у ивичној зони, као и код серије SBS2-1.



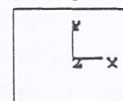
Слика 83 - Дијаграм упоредних напона

До овакве констатације може се доћи и на основу чињенице да се код узорака SBS2-2 појављују оба типа лома, што значи да је ивично растојање  $e_1=40$  mm на неки начин гранично у погледу типа лома код испитиваних изорака.

Necking of a thin sheet 38



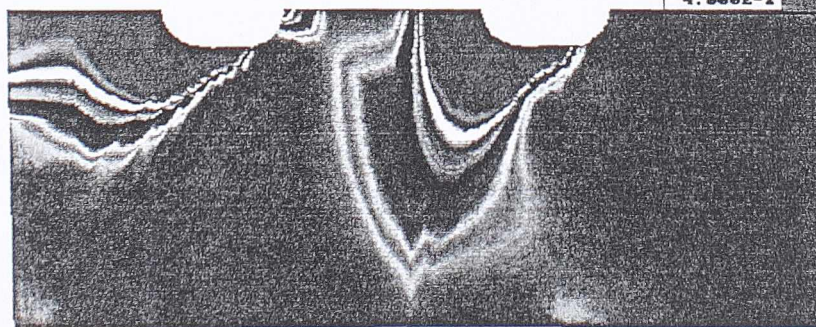
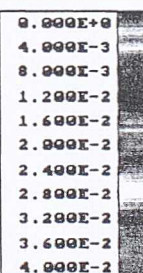
View point



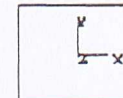
PAK-G v3.0

Plastic deformation - Effective value

Necking of a thin sheet 38



View point



PAK-G v3.0

Plastic deformation - Effective value

Слика 84 - Развој поља ефективне пластичне деформације у зонама рупа за завртњеве

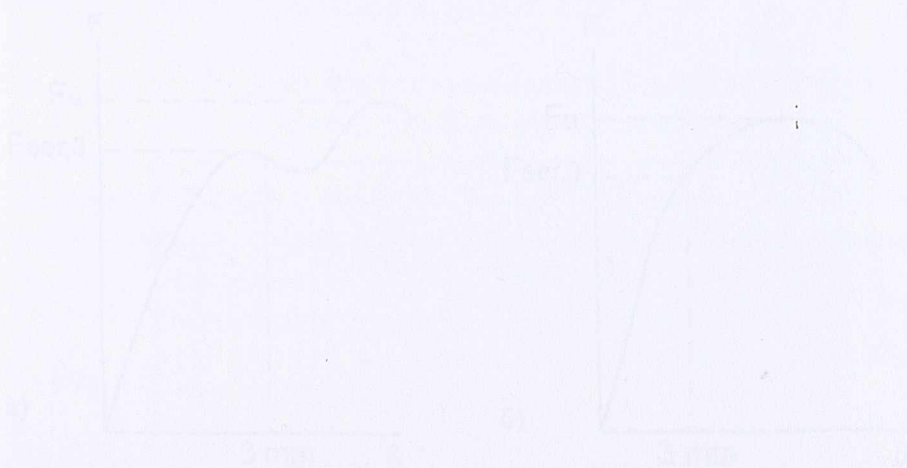
Ову констатацију посебно поткрепљује начин ширења поља ефективне пластичне деформације (слика 84) на основу кога се може, недвосмислено, закључити да до лома долази управо цепањем лима у ивичној зони. Но, то још увек не даје одговор на питање о вредности граничне деформације и силе лома. Наиме, вредност деформације при лому, на жалост, не може експлицитно да се одреди већ се мора проценити на основу искуства стеченог анализом претходних нумеричких модела који су имали потпору у

експерименталном испитивању. С обзиром да је приликом испитивања серије SBS2-1 код које је до лома дошло на истоветан начин гранична вредност деформација износила 20,8 mm што је приближно једнако ивичном растојању ( $e_1 = 20$  mm), може се очекивати да ће и у овом случају (SBS2-3) гранична вредност деформација при лому бити приближно једнака ивичном растојању од 30 mm. На основу овако претпостављене вредности деформације при лому, помоћу дефинисане експоненцијалне функције може екстраполацијом доста поуздано одредити и гранична вредност силе, која у конкретном случају износи 35,3 kN.

## 1 УВОД

Овај прилог представља резултате испитивања на носивост механичких спојних средстава код танкозидних челичних елемената у случају деформације при лому. Испитивања су извршена у складу са стандардом EN 12512, који дефинише метод испитивања на носивост механичких спојних средстава код танкозидних челичних елемената. Испитивања су извршена у складу са стандардом EN 12512, који дефинише метод испитивања на носивост механичких спојних средстава код танкозидних челичних елемената.

Поступак испитивања је описан у стандарду EN 12512, који дефинише метод испитивања на носивост механичких спојних средстава код танкозидних челичних елемената. Испитивања су извршена у складу са стандардом EN 12512, који дефинише метод испитивања на носивост механичких спојних средстава код танкозидних челичних елемената.



Слика 13 - Гранична вредност силе при лому код механичких спојних средстава код танкозидних челичних елемената

Овај прилог представља резултате испитивања на носивост механичких спојних средстава код танкозидних челичних елемената у случају деформације при лому. Испитивања су извршена у складу са стандардом EN 12512, који дефинише метод испитивања на носивост механичких спојних средстава код танкозидних челичних елемената.

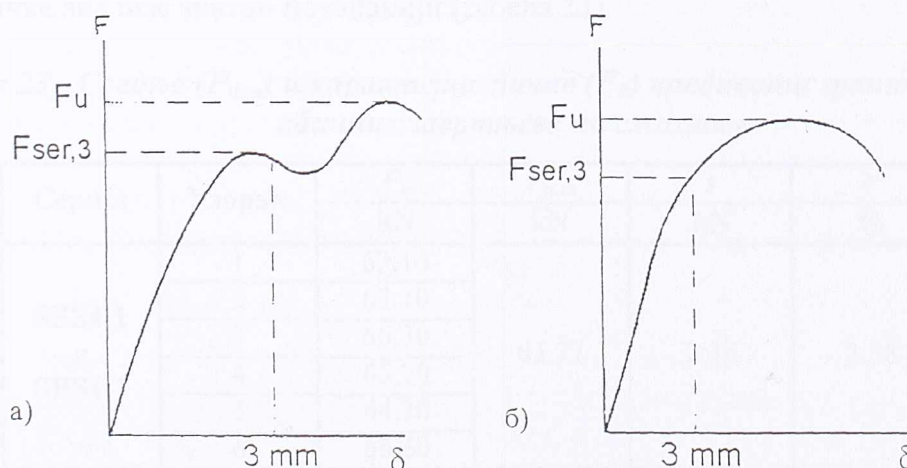
## Поглавље 4:

# Понашање механичких спојних средстава у смичућим спојевима

## 1 УВОД

Ово поглавље обрађује проблематику везану за носивост анализираних механичких спојних средстава (обични, високовредни и самонарезујући завртњевци) у спојевима танкозидних челичних елемената оптерећених на смицање. Изложени ставови и препоруке изведени су на основу властитих експерименталних испитивања и одговарајућих нумеричких анализа карактеристичних проблема, описаних у претходним поглављима, али делом и на основу најновијих испитивања спроведених у оквиру европских институција које се баве овом проблематиком [47].

Посебно су анализирани сви потенцијални видови лома карактеристични за везе са појединим спојним средствима. Поред тога, да би се извели одговарајући закључци, спроведена је упоредна анализа истих веза са различитим спојним средствима, али су вршена и друга, по мишљењу аутора интересантна поређења у оквиру испитиваних серија узорка које припадају једној истој врсти спојних средстава.



Слика 85 - Гранична носивост везе и носивост при прописаној деформацији:

а) Дијаграм карактеристичан за лом кривљењем;

б) Дијаграм карактеристичан за цепање лима

Осим граничних вредности сила при лому, које карактеришу гранично стање носивости, анализиране су и силе које одговарају деформацијама од 3 mm. Наиме, сматра се [47] да при деформацијама веза већим од 3 mm долази до прекомерних



деформација конструкције и нарушавања њене функционалности, па се може сматрати да силе при поменутој вредности деформација карактеришу гранично стање употребљивости. Ово је илустровано на слици 85 где се јасно могу уочити разлике између граничне носивости ( $F_u$ ) и силе при деформацији од 3 mm ( $F_{ser,3}$ ).

## 2 ОБИЧНИ ЗАВРТЊЕВИ

Код испитиваних веза са завртњевима уочени су, као што је аутор и предвидео, следећи видови лома:

- лом кривљењем лима и пробијањем главе завртња,
- лом цепањем лима,
- лом смицањем тела завртња и
- лом нето пресека.

Који ће од поменутих типова лома наступити зависи од типа везе (веза на преклоп или са подвезицама), дебљине лима, вредности ивичног растојања ( $e_1$ ), квалитета челика и класе чврстоће и пречника завртњева.

### 2.1 НОСИВОСТ ЗАВРТЊЕВА НА СМИЦАЊЕ

Код лимова дебљине 4 mm до лома долази смицањем завртњева, независно од типа везе (веза на преклоп или са подвезицама) и вредности ивичног растојања ( $e_1 = 20$ , односно 40 mm). Разлика постоји у носивости и деформабилности везе с обзиром на то да су код веза са подвезицама завртњеви двосечни. Имајући у виду да вредност ивичног растојања не утиче на носивост завртњева, односно везе, могу да се обједине резултати испитивања по две серије узорака (SBS4-1 и SBS4-2, као и SBL4-1 и SBL4-2). На овај начин се повећава број узорака исте серије (6 уместо 3) па су самим тим и резултати статистичке анализе знатно поузданији (табела 23).

Табела 23 - Средње ( $F_{u,m}$ ) и карактеристичне ( $F_k$ ) вредности граничне носивости обичних завртњева на смицање

№	Серија	Узорак	$F_u$	$F_{u,m}$	$s$	$V$	$F_k$
			kN	kN	kN	%	kN
1	SBS4-1 и SBS4-2	1	63,10	63,77	2,16	3,38	59,06
		2	63,10				
		3	60,30				
		4	65,20				
		5	64,30				
		6	66,60				
2	SBL4-1 и SBL4-2	1	36,30	37,28	0,64	1,71	35,89
		2	37,20				
		3	37,30				
		4	37,20				
		5	38,30				
		6	37,40				

Напомена:  
Карактеристична вредност за серију од 6 испитиваних узорака одређује се према изразу:  $F_k = F_{u,m} - 2.18 \cdot s$

Треба посебно напоменути да код веза на преклоп до лома долази при деформацијама које не премашују 3 mm, што заправо значи да је при граничној носивости задовољен критеријум деформабилности и да отпада потреба за посебном анализом граничног стања употребљивости. Код веза са подвезицама, завртњеве су двосечни и самим тим имају већу носивост, па до лома везе долази при вишем нивоу напрезања, што проузрокује и веће деформације. Оне се крећу између 6,5 и 9,7 mm, па је у овом случају неопходна и анализа граничног стања употребљивости.

Гранична носивост завртња на смицање се одређује на основу израза који се може написати у следећем облику:

$$F_v = C_1 \cdot A \cdot f_{ub} \quad (27)$$

где су:

- $C_1$  коефицијент,
- $A$  активна (радна) површина попречног пресека завртња и
- $f_{ub}$  чврстоћа на затезање материјала од кога је израђен завртњ.

Код веза на преклоп до лома долази смицањем тела завртња и то кроз део завртња без навоја, па је радна површина завртња једнака бруто површини његовог попречног пресека, која за случај испитиваних завртњева (M8) износи 50,27 mm<sup>2</sup>. Како су површина попречног пресека и квалитет основног материјала ( $f_{ub}=747,3$  МПа) познати, као и гранична носивости везе ( $F_{u,m}=37,28$  kN), која је експериментално утврђена (табела 23), на основу претходног израза може да се одреди вредност коефицијента  $C_1$  на следећи начин:

$$37,28 / 2 = C_1 \cdot 50,27 \cdot 747,3 / 1000 = C_1 \cdot 37,57 \Rightarrow C_1 = 18,64 / 37,57 = 0,496.$$

Код испитиваних веза са подвезицама ситуација је нешто другачија. Наиме, њихова носивост није двоструко већа од носивости веза на преклоп због тога што једна раван смицања пролази кроз део завртња са навојем. Када обе равни смицања пролазе кроз део врата завртња без навоја, онда је носивост везе са двосечним завртњевима двоструко већа. Међутим, код танкозидних елемената то често није лако остварити. У конкретном случају, када једна површ смицања пролази кроз део тела завртња са навојем, укупна радна смичућа површина завртња може да се одреди као збир бруто површине попречног пресека и површине испитног пресека посматраног завртња. Код завртња M8 површина испитног пресека је 36,6 mm<sup>2</sup>, па је укупна радна површина 36,6+50,27=86,87 mm<sup>2</sup>. Са овако одређеном површином може се на истоветан начин као и у претходном случају, код веза на преклоп, одредити вредност коефицијента  $C_1$ :

$$63,77 / 2 = C_1 \cdot 86,87 \cdot 747,3 / 1000 = C_1 \cdot 64,92 \Rightarrow C_1 = 31,88 / 64,92 = 0,491.$$

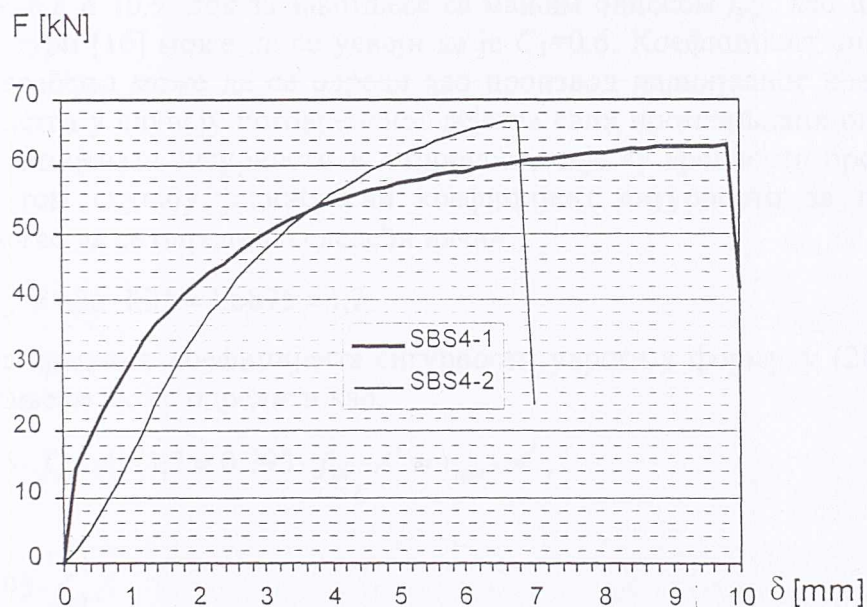
У литератури [16] за завртњеве ове класе чврстоће препоручује се вредност коефицијента  $C_1 = 0,5$ , што је веома блиско експериментално одређеним вредностима. Треба истаћи да су одступања релативно мала, а посебно код веза на преклоп у којима су завртњеве једносечни, код којих варијанса износи свега 1,71%. Такође и однос карактеристичне и средње вредности 35,89/37,28= 0,963 (разлика испод 4%) говори у прилог поузданости резултата ових испитивања.

Међутим, код веза са преклопом треба водити рачуна и о граничном стању употребљивости, то јест треба узети у обзир и силе при деформацијама од 3 mm (видети табелу 24). Поред средњих и карактеристичних вредности носивости испитиваних веза при деформацијама од 3 mm у табели 24 су дате и вредности деформација при лому ( $\delta_u$ ). Може се уочити да код узорака са мањим ивичним

растојањем до лома долази при већим деформацијама (7,4 до 9,7 mm), него код узорака са већим ивичним растојањем (6,5 до 6,9 mm), али је њихова крутост већа што показује стрмији нагиб криве  $F-\delta$  (слика 86). Због тога су и вредности сила при деформацији од 3 mm нешто веће код узорака серије SBS4-1.

Табела 24 - Средње ( $F_{ser,3,m}$ ) и карактеристичне ( $F_k$ ) вредности носивости обичних завртњева на смицање при граничним деформацијама од 3mm

N°	Серија	Узорак	$F_{ser,3}$	$\delta_u$	$F_{ser,3,m}$	$s$	$V$	$F_k$
			kN	mm				
1	SBS4-1 и SBS4-2	1	50,00	9,7	48,30	3,26	6,76	41,18
		2	51,00	9,4				
		3	52,20	7,4				
		4	44,30	6,5				
		5	45,00	6,9				
		6	47,30	6,7				



Слика 86 - Поређење дијаграма  $F-\delta$  карактеристичних за серије SBS4-1 и SBS4-2

Варијације вредности сила при деформацијама од 3 mm су нешто веће него у претходном случају ( $V=6,76\%$ ), што је последица различите крутости, али и даље нису значајне, тако да се резултати могу прихватити са задовољавајућом поузданошћу. Разлика између средње и карактеристичне вредности је у овом случају 14,7%. Такође је интересно упоредити карактеристичне вредности граничне носивости и силе при прописаној деформацији од 3 mm ( $59,06/41,18=1,43$ ), као и одговарајуће средње вредности ( $63,77/48,30=1,32$ ). Разлике су значајне, али су реда величине парцијалних коефицијената сигурности за гранична стања носивости (1,35 до 1,5), па се са правом може очекивати да при сервисном, односно радном оптерећењу деформације везе неће угрозити гранично стање употребљивости.

Наши прописи за прорачун челичних конструкција су, на жалост, још увек засновани на концепту допуштених напона, па не праве разлику између граничних стања носивости и употребљивости. Постоје јединствени коефицијенти сигурности

који се односе само на отпорност елемената или спојних средстава, односно на основу којих се одређују допуштени напони, док се оптерећења комбинују у зависности од случаја оптерећења, али се не пондеришу, то јест не множе коефицијентима сигурности за дејства као што је случај код теорије граничних стања. Стога постоји проблем како, на основу познатих граничних сила носивости завртњева на смицање одредити допуштене вредности, односно како одредити вредности коефицијената сигурности. Имајући у виду све претходне анализе, израз за одређивање допуштене силе, односно носивости завртња према теорији допуштених напона може се написати у облику:

$$F_{v,dop} = C_1 \cdot A^* \cdot f_{ub} / \gamma \quad (28)$$

где је  $A^*$  радна површина завртња, а  $\gamma$  коефицијент сигурности. Радна површина завртња оптерећеног на смицање једнака је бруто површини попречног пресека када раван смицања пролази кроз део тела завртња без навоја, односно површини испитног пресека када раван смицања пролази кроз део тела са навојем. У случају двосечних или вишесечних завртњева радна површина је једнака збиру одговарајучих површина. Може да се усвоји да је вредност коефицијента  $C_1$  једнака 0,5 за завртњеве класе чврстоће 4.8, 5.8, 6.8 и 10.9, док за завртњеве са мањим односом  $f_y/f_u$  као што су 4.6 и 5.6 према литератури [16] може да се усвоји да је  $C_1=0,6$ . Коефицијент сигурности за први случај оптерећења може да се одреди као производ парцијалног коефицијената сигурности за дејства у случају истовременог дејства свих променљивих оптерећења и парцијалног коефицијената сигурности за отпорност, чије су вредности препоручене у Еврокоду 3. У том случају јединствени коефицијент сигурности за први случај оптерећења би могао да се одреди на следећи начин:

$$\gamma = \gamma_F \cdot \gamma_M = 1,35 \cdot 1,25 = 1,6875 \approx 1,7. \quad (29)$$

Када се ова вредност коефицијента сигурности уврсти у формулу (28), носивост завртња на смицање се може одредити као:

$$F_{v,dop} = 0,5 \cdot f_{ub} \cdot A^* / 1,7 = 0,295 \cdot f_{ub} \cdot A^* = \tau_{dop} \cdot A^*, \quad (30)$$

где је:

$$\tau_{dop} = 0,295 \cdot f_{ub}. \quad (31)$$

За други и трећи случај оптерећења вредности коефицијента сигурности могу да се одреде на основу просте пропорције. У поређењу са важећим домаћим стандардом за прорачун носивости обичних завртњева (ЈУС У.Е7.145/1/1991), овако добијене вредности допуштеног смичућег напона су око 5% веће (према ЈУС-у је за необрађене завртњеве  $\tau_{dop} = 0,280 \cdot f_{ub}$ ).

Треба истаћи и да са овако одређеном вредношћу коефицијанта сигурности практично нема опасности од прекомерних деформација везе које би угрозиле функционалност, односно употребљивост, јер се вредности допуштених сила налазе у области деформација испод 3 mm.

Када се прорачун врши према теорији граничних стања онда прорачунска носивост завртња на смицање може довољно поуздано да се одреди на основу израза датог у Еврокоду 3:

$$F_{v,Rd} = 0,5 \cdot f_{ub} \cdot A^* / \gamma_{M2}. \quad (32)$$

где је  $\gamma_{M2}$  парцијални коефицијент сигурности ( $\gamma_{M2}=1,25$ ). Поређењем прорачунске носивости завртња на смицање, одређене претходним изразом (32) са карактеристичном вредности добијеном испитивањем може се констатовати да би парцијални коефицијенти сигурности за одређивање носивости завртњева на смицање помоћу испитивања могли бити нешто мањи од препоручених. Наиме, Еврокод 3, препоручује да се приликом одређивања прорачунске носивости помоћу експеримента, односно испитивањем, користе исте вредности парцијалног коефицијента сигурности за опторност материјала, као и у случају рачунског одређивања истих величина. Ово је, у неку руку, конзервативан приступ с обзиром да карактеристична вредност одређена експерименталним путем даје веродостојније податке, односно носи са собом мању дозу ризика у односу на одговарајућу прорачунску вредност.

Табела 25 - Поређење прорачунских са средњим и карактеристичним вредностима носивости завртња на смицање одређеним испитивањем

Серија	$F_u$	$F_k$	$F_{v,Rd}$	$F_u/F_{v,Rd}$	$F_k/F_{v,Rd}$
	kN	kN	kN	-	-
SBS4-1 и SBS4-2	63,77	59,06	51,93	1,23	1,13
SBL4-1 и SBL4-2	37,28	35,89	30,05	1,24	1,19

У табели 25 приказана је упоредна анализа прорачунских вредности носивости завртњева на смицање, средњих и карактеристичних вредности добијених експерименталним путем. Однос  $F_u/F_{v,Rd}$  заправо представља стварно остварену вредност коефицијента сигурности, док однос  $F_k/F_{v,Rd}$  представља вредност коефицијента сигурности за експериментално одређивање носивости завртњева, одређену тако да поузданост експерименталног и прорачунског поступка одређивања носивости буде иста.

## 2.2 НОСИВОСТ ОСНОВНОГ МАТЕРИЈАЛА

Код веза танкозидних челичних елемената остварених помоћу обичних завртњева до лома углавном долази по основном материјалу. Ово је посебно изражено када је пречник завртња предимензионисан, односно непримерен дебљини танкозидног елемента. Пре свега потребно је прецизно дефинисати која је то дебљина лима при којој се елементи израђени од њега могу сматрати танкозидним. Еврокод као горњу границу прописује дебљину лима од чак 8 mm, мада се у поглављу о спојним средствима углавног барата са дебљинама до 6 mm. Међутим, овај проблем се не може квалитетно анализирати а да се не води рачуна о односу дебљине лима и пречника завртња.

Ако се примењују традиционални завртњеви за челичне конструкције у грађевинарству (минимални дозвољен пречник је 12 mm) онда се с правом може сматрати да се елементи израђени од лимова дебљине до 6 mm понашају као танкозидни. Међутим ово би се могло рећи на пример и за лимове дебљине 10 mm који су спојени завртњевима непримереног пречника (M30 или већи). Стога су у овом раду примењивани завртњеви мањег пречника (M8) који су рационални за спајање елемената малих дебљина. Код оваквих спојних средстава, по мишљењу аутора дебљина лима треба да буде мања од 4 mm, да би се елемент понашао као танкозидни, односно да би се јавили феномени који нису уобичајени код веза у класичним челичним конструкцијама. Један од битних закључака овог рада је да и у нашој земљи, за израду

веза код танкозидних челичних елемената, треба дозволити примену завртњева мањег пречника као што су M10 и M8 (Еврокод 3 допушта примену и завртњева M6).

Код лимова дебљине 2 mm и завртњева M8 до лома долази по основном материјалу. У случају веза са подвезицама јављају се лом цепањем лима у ивичној зони и лом по нето пресеку, док се код веза на преклоп јавља лом кривљењем и пробијањем главе завртња. Сви поменути типови лома праћени су изразито великим деформацијама, које се крећу у границама од 20 до скоро 70 mm. Према томе, када је у питању лом по основном материјалу посебно је важан податак у вредности силе при деформацији од 3 mm.

Треба поменути да се у литератури често среће појам лома гњечењем омотача рупе (*hole bearing failure*). Међутим, гњечење омотача рупе заправо није прави лом већ само почетна фаза у којој долази до локалне пластификације основног материјала у зонама контакта са завртњем (по омотачу рупе) праћеног значајним издужењем рупе, али до правог, формалног лома долази или цепањем лима у ивичној зони или кривљењем лима и пробијањем главе завртња. Дакле "лом" гњечењем омотача рупе је само почетна фаза и појаљујесе само у комбинацији са неким од поменутих стварних типова лома. Но, појам гњечења омотача рупе, као и њему одговарајућег притиска по омотачу рупе нису случајно уведени у стручну терминологију, као и у многе, па и наше прописе. Како је већ поменуто, због превеликих деформација које се јављају при достизању граничне силе носивости код лома цепањем лима или кривљењем и пробијањем главе завртња, може се сматрати да до отказа везе долази управо због гњечења основног материјала у зони контакта са завртњевима, односно у зони омотача рупе, које изазива прекомерно издужење рупа и прекорачење допуштених деформација. У већини савремених прописа [9], [16] су лом цепањем лима и лом гњечењем омотача рупе интегрисани у један заједнички тип лома који се означава термином лом гњечењем омотача рупе.

### 2.2.1 Лом цепањем лима и гњечењем омотача рупе

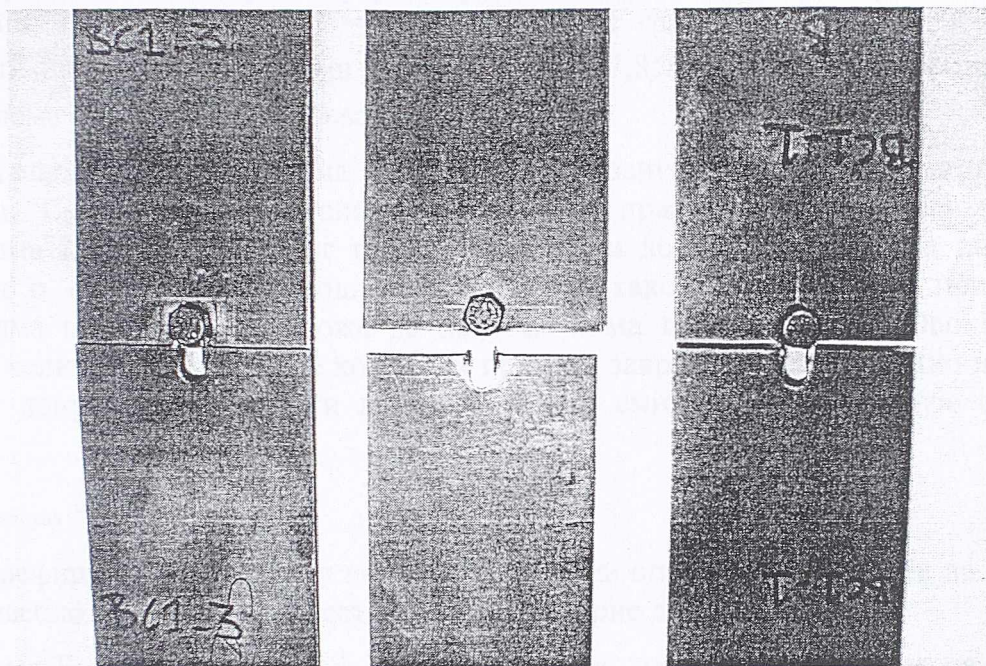
Овакав тип лома карактеристичан је за везе са подвезицама које су израђене од лимова малих дебљина, али и за везе на преклоп са изразито малим ивичним растојањем, поготову када су изведене само са једним завртњем (слика 87). Код готово свих испитиваних узорака веза са подвезицама израђених од лимова дебљине 2 mm дошло је управо до оваквог типа лома, са изузетком 2 узорка код којих је настао лом нето пресека.

Носивост елемента на цепање лима у зони ивичног завртња зависи од ивичног растојања, дебљине лима и квалитета основног материјала, односно његове чврстоће на затезање, док је носивост на гњечење омотача рупе које се манифестује гужвањем лима у зони испред завртња у функцији пречника завртња, дебљине лима и наравно чврстоће на затезање. Уочава се да у оба случаја фугуришу дебљина лима и чврстоћа на затезање као заједнички параметри од значаја за одређивање носивости. Исто тако треба приметити да носивост на цепање лима не зависи од пречника завртња, као и да носивост на гњечење омотача рупе не зависи од вредности ивичног растојања. Однос ове две независне величине треба да се одреди тако да носивости на цепање и гњечење омотача рупе буду приближно једнаке.

Израз за одређивање носивости лима на цепање може се, дакле, написати у следећем облику:

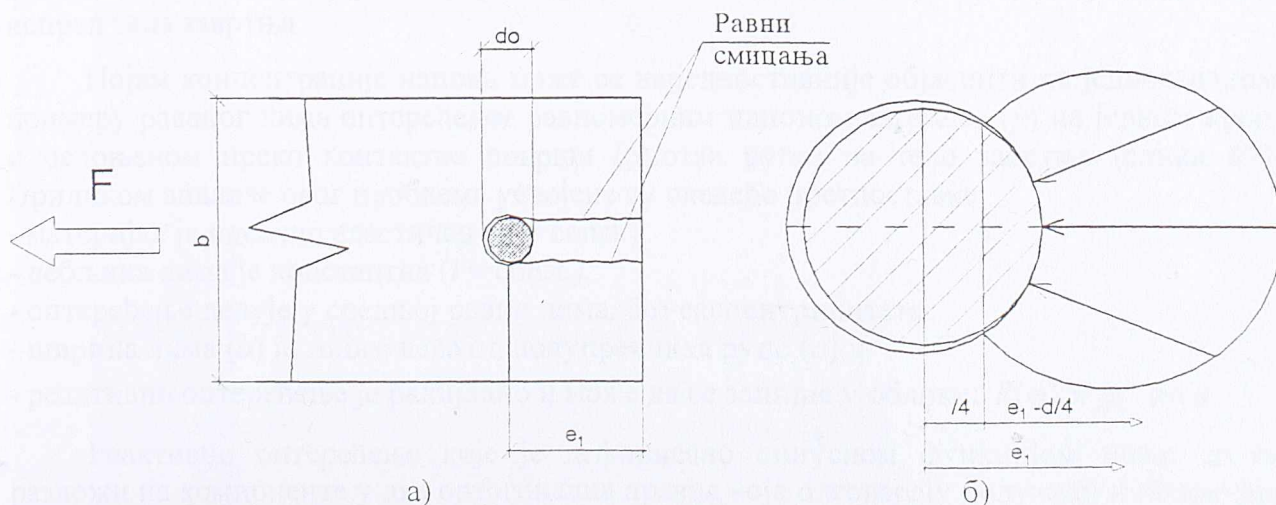
$$F_s = C_2 \cdot e_1 \cdot t \cdot f_u \quad (33)$$

где је  $C_2$  коефицијент,  $t$  дебљина лима,  $e_1$  ивично растојање првог завртња, а  $f_u$  чврстоћа на затезање основног материјала.



Слика 87 - Лом цепањем лима код веза на преклоп ( $t=1,5$  mm;  $e_1=8$  mm;  $b=80$  mm; завртњањ M8; испитивање спроведено у Холандији)

Лом цепањем, или како се још у литератури среће лом смицањем основног материјала настаје цепањем основног материјала у две блиске, често паралелне равни које се формирају паралелно са током сила у посматраном елементу. Цепање почиње у ивичним зонама прве рупе и пропада све до слободне ивице елемента (слике 87 и 88). Почетак равни смицања налази се негде између средине рупе и њене спољашње ивице и зависи од односа пречника завртња и рупе. Прецизније речено до цепања долази на спољашњим ивицама контактне површине између завртња и основног материјала, односно омотача рупе (слика 88б). Код малих зазора, какви се углавном јављају у челичним конструкцијама може се претпоставити да ће се смичуће равни формирати негде око четвртине пречника рупе, то јест да је дужина смичуће равни једнака  $e_1 - d/4$ .



Слика 88 - Шематски приказ цепања лима смицањем у ивичној зони првог завртња

Код оваквих типова лома, како је већ напоменуто регистроване су значајне деформације, стога, као и у случају лома смицањем завртњева, треба водити рачуна о вредностима сила при прописаној деформацији од 3 mm. Код узорака серије SBS2-1 средња вредност силе при деформацији од 3 mm износи  $F_{ser,3,m} = 15,20$  kN, а карактеристична вредност  $F_{ser,3,k} = 13,65$  kN. Однос граничне вредности и вредности силе при прописаној деформацији је  $F_{u,m} / F_{ser,3,m} = 27,85/15,20 = 1,83$ , што је знатно више него код лома смицањем завртњева.

У нашим прописима нема правила за прорачун носивости лима на цепање смицањем. Сматра се да, уколико се поштују правила о минималним ивичним растојањима завртњева, до овог типа лома неће ни доћи. Међутим, код танкозидних елемената о овом се мора водити рачуна, јер како је показано и при ивичним растојањима већим од  $2,5d$  може да дође до лома цепањем лима. Ово важи и за класичне челичне конструкције код којих пречник завртња није прикладно изабран. За прорачун допуштене носивости лима на цепање смицањем препоручује се следећи израз:

$$F_{tear,dop} = e_1 \cdot t \cdot f_u / \gamma \quad (38)$$

где је  $\gamma$  коефицијент сигурности који за први случај оптерећења не треба да буде мањи од 1,7, посебно ако је елемент осетљив на прекомерне деформације.

Према Еврокоду 3 - Део 1.3, носивост лима на цепање треба да се одреди на основу следећег израза:

$$F_{b,Rd} = e_1 \cdot t \cdot f_u / 1,2 / \gamma_{M2} = 0,83 \cdot e_1 \cdot t \cdot f_u / \gamma_{M2} \quad (39)$$

где је  $\gamma_{M2}$  коефицијент сигурности који има вредност 1,25. На основу претходне анализи може се констатовати да је овај израз помало конзервативан, поготово у случају већих ивичних растојања, мада се, с обзиром на тенденције да се смање вредности ивичних растојања завртњева, може разумети и овакав приступ прорачуну.

Носивост или отпорност на гњечење омотача рупе, како је већ поменуто, зависи од дебљине лима, пречника завртња и чврстоће на затезање основног материјала. До гњечења омотача рупе долази услед концентрације напона на месту контакта између тела завртња и основног материјала. У овој релативно уској зони, услед поремећаја равномерног тока сила, долази до концентрације напона. Даљим повећањем оптерећења ове зоне се пластификују и деформишу, а код тањих лимова долази и до гужвања лима испред тела завртња.

Појам концентрације напона може се најједноставније објаснити на једноставном примеру раваног лима оптерећеног равномерним напоном затезања ( $p$ ) на једном крају и ослоњеном преко контактне површи (омотач рупе) на тело завртња (слика 89). Приликом анализе овог проблема усвојене су следеће претпоставке:

- материјал је идеално еластичан ( $E = \text{const.}$ ),
- дебљина лима је константна ( $t = \text{const.}$ ),
- оптерећење делује у средњој равни лима, без ексцентрицитета,
- ширина лима ( $b$ ) је много већа од полупречника рупе ( $a$ ) и
- реактивно оптерећење је радијално и може да се запише у облику:  $R(\varphi) = p_0 \cdot \sin \varphi$

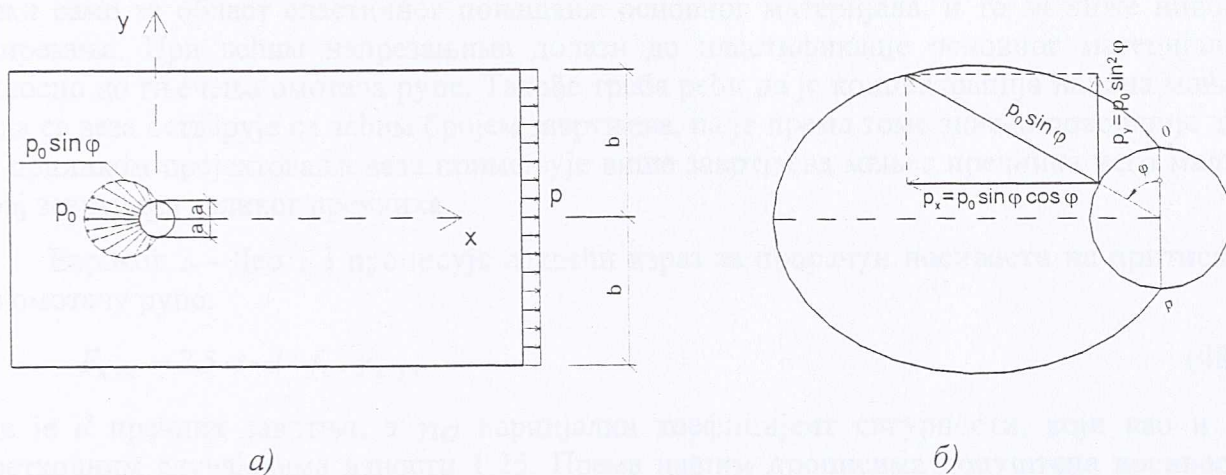
Реактивно оптерећење које је дефинисано синусном функцијом може да се разложи на компоненте у два ортогонална правца која одговарају подужној и попречној оси елемента (слика 89):



$$p_x(\varphi) = p_0 \cdot \sin \varphi \cdot \cos \varphi \quad (40)$$

$$p_y(\varphi) = p_0 \cdot \sin^2 \varphi \quad (41)$$

где је  $p_0$  амплитуда функције реактивног оптерећења, а  $\varphi$  кордината угла која се мери како је приказано на слици 89б.



Слика 89 - Полазне поставке проблема анализе концентрације напона у зони рупе

Услов равнотеже активних и реактивних сила у подужном правцу ( $\sum X = 0$ ) може да се напише на следећи начин:

$$p \cdot 2b = \int_0^{\pi} p_0 \cdot \sin \varphi \cdot \cos \varphi \cdot ds \quad (42)$$

Имајући у виду да је  $ds = a \cdot d\varphi$ , те да су амплитуда синусне функције ( $p_0$ ) и полупречник рупе за завртањ ( $a$ ) константне величине, претходни услов (42) трансформише се у:

$$p \cdot 2b = p_0 \cdot a \int_0^{\pi} \sin \varphi \cdot \cos \varphi \cdot d\varphi. \quad (43)$$

Непозната амплитуда ( $p_0$ ), која уједно представља екстремну вредност контактнoг напона притиска између тела завртња и омотача рупе може да се одреди на следећи начин:

$$p_0 = \frac{p \cdot 2b}{a \int_0^{\pi} \sin \varphi \cdot \cos \varphi \cdot d\varphi} = 2p \cdot \frac{b}{a} \cdot \frac{1}{\int_0^{\pi} \sin \varphi \cdot \cos \varphi \cdot d\varphi} = 2p \cdot \frac{b}{a} \cdot \frac{1}{I} \quad (44)$$

где је:

$$I = \int_0^{\pi} \sin \varphi \cdot \cos \varphi \cdot d\varphi. \quad (45)$$

Претходни интеграл (45) може да се реши применом смене  $\sin \varphi \cos \varphi = 1/2 \sin 2\varphi$ :

$$I = \frac{1}{2} \int_0^{\pi} \sin 2\varphi \cdot d\varphi = \frac{1}{2} \cdot \left( -\frac{1}{2} \cos 2\varphi \right)_0^{\pi} = -\frac{1}{4} \cdot 2(\cos 2\varphi)_0^{\pi/2} = -\frac{1}{2} \cdot (-1 - 1) = 1, \quad (46)$$

па се коначно добија амплитуда синусне функције:

$$p_0 = 2 \cdot p \cdot \frac{b}{a} \quad (47)$$

Када се узме у обзир да минималан однос  $b/a$  који произилази из правила за конструисање веза са завртњевима износи 3, то значи да је амплитуда реактивног оптерећења једнака шестострукој вредности напона затезања ( $p_0 = 6p$ ). Наравно ово важи само за област еластичног понашања основног материјала, и то за ниже нивое напрезања. При већим напрезањима долази до пластификације основног материјала односно до гњечења омотача рупе. Такође треба рећи да је концентрација напона мања када се веза остварује са већим бројем завртњева, па је према томе знатно повољније да се приликом пројектовања веза примењује више завртњева мањег пречника него мали број завртњева великог пречника.

Еврокод 3 - Део 1.3 прописује следећи израз за прорачун носивости на притисак по омотачу рупе:

$$F_{b,Rd} = 2,5 \cdot t \cdot d \cdot f_u / \gamma_{M2}, \quad (48)$$

где је  $d$  пречник завртња, а  $\gamma_{M2}$  парцијални коефицијент сигурности, који као и у претходним случајевима износи 1,25. Према нашим прописима допуштена носивост необрађених завртња на притисак по омотачу рупе треба да се одреди на следећи начин:

$$F_{b,dop} = t \cdot d \cdot \sigma_{b,dop} = t \cdot d \cdot 1,7 \cdot f_y / \nu \quad (49)$$

где је  $\nu$  коефицијент сигурности који за први случај оптерећења износи 1,5. Поређењем претходна два израза уочава се битна разлика. Да би се спровело квалитетно поређење неопходно је најпре да се изрази на неки начин сведу на исту форму, односно на исти принцип прорачуна (допуштени напони или гранична стања). То се, на пример, постиже тако што се десна страна израза (48) подели са вредношћу парцијалног коефицијента сигурности за дејства ( $\gamma_F$ ), који се, према Еврокоду 3, креће у границама од 1,35 до 1,5 (нпр. 1,45). Тада се, узимајући у обзир и препоручене вредности парцијалног коефицијента сигурности за отпорност  $\gamma_{M2}$  добија:

$$F_{b,dop,EC3} = 2,5 \cdot t \cdot d \cdot f_u / 1,25 / 1,45 = 1,379 \cdot t \cdot d \cdot f_u \quad (50)$$

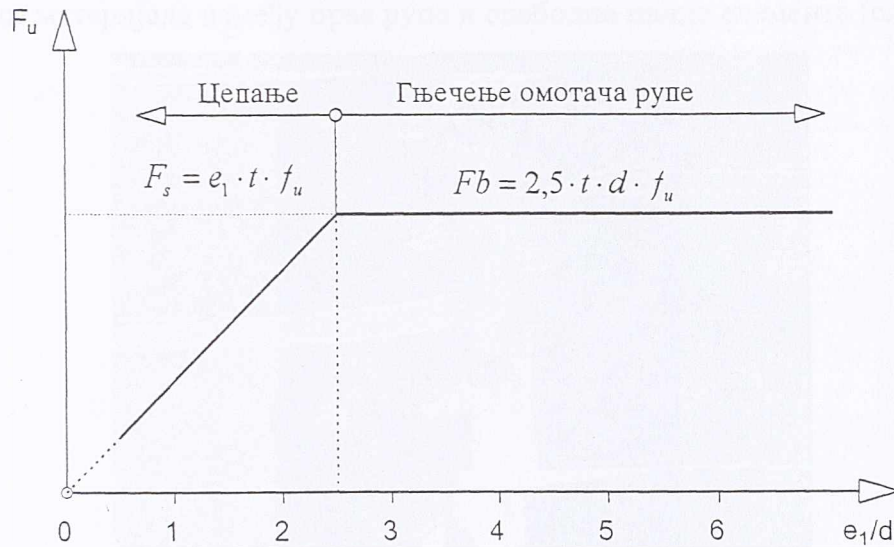
Ако се у израз (49) уврсти вредност коефицијента сигурности за први случај оптерећења и граница развлачења  $f_y$  изрази у функцији  $f_u$  (за конструкционе челике однос  $f_y/f_u$  у најповољнијем случају износи 0,7) добија се:

$$F_{b,dop,JUS} = t \cdot d \cdot 1,7 \cdot 0,7 \cdot f_u / 1,5 = 0,793 \cdot t \cdot d \cdot f_u \quad (51)$$

Када се овако трансформисани изрази упореде, уочава се битна квантитативна разлика (скоро 74%). Међутим, треба истаћи да у нашем стандарду нема посебних ограничења која се односе на носивост лима на цепање, која су саставни део Еврокода 3 - Део 1.3, као и чињеницу да се наш стандард не бави проблематиком танкозидних челичних елемената. Према томе, овако конзервативне вредности носивости на притисак по омотачу рупе последица су необухватања свих феномена који се могу јавити у основном материјалу у зонама спојних средстава. Еврокод 3 - Део 1.1 који се бави проблематиком класичних челичних конструкција даје могућност редукације носивости на притисак по омотачу рупе у функцији геометрије саме везе.

Анализом израза за носивост лима на цепање смицањем и за носивост на гњечење омотача рупе може да се утврди вредност ивичног растојња  $e_1$  испод које долази до лома цепањем, односно изнад које долази до лома гњечењем омотача рупе. Изједначавањем израза за одређивање носивости лима на цепање и израза за носивост на притисак по омотачу рупе добија се:

$$e_1 \cdot t \cdot f_u = 2,5 \cdot t \cdot d \cdot f_u \Rightarrow e_1 = 2,5 \cdot d \quad (52)$$

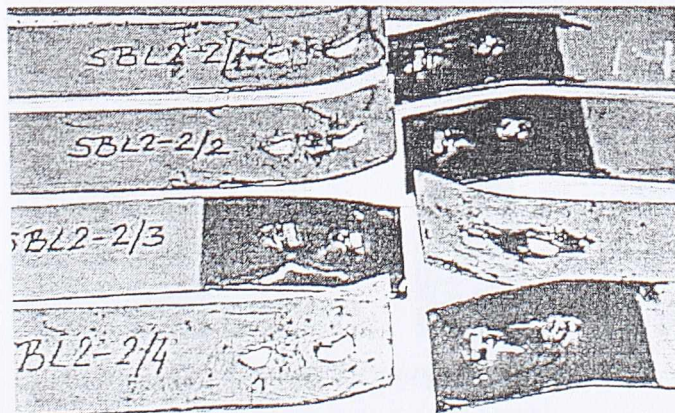


Слика 90 - Одређивање релевантног вида лома основног материјала

Ово се најбоље може уочити на основу дијаграма приказаног на слици 90. Треба истаћи и то да је према Еврокоду 3 - Део 1.3 ова граница нешто мања  $e_1 = 2,08 \cdot d$ , али, с озиром на резултате експерименталних и нумеричких испитивања спроведених у овом раду, вредност дата изразом (52) се може сматрати довољно поузданом.

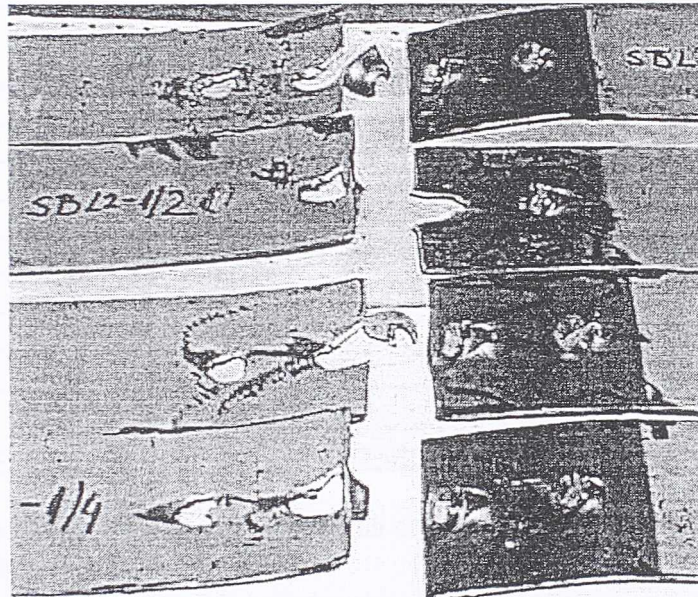
### 2.2.2 Лом кривљењем лима и пробијањем главе завртња

Код свих испитиваних узорака веза на преклоп израђених од танких лимова ( $t=2$  mm) услед ексцентричног напрезања долази до кривљења лима, ротације завртњева, који се окрећу приближно у правцу деловања силе затезања и коначно, после значајних деформација до пробијања главе завртња кроз лим основног материјала.



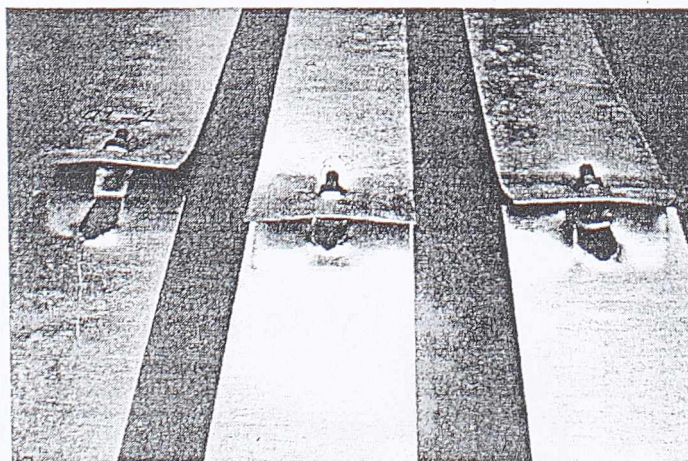
Слика 91 - Пробијање главе завртња у случају великог ивичног растојања - пробој приближно кружног облика

До пробијања завртња долази по правилу испод шестоугаоне главе и то постепено, тако што један по једно по једно теме главе завртња пробија, релативно танак, лим. Кружне подложне плочице које се постављају испод навртки немају оштру ивицу која би иницирала почетак цепања. Када је ивично растојање првог завртња довољно велико онда се омогућава формирање комплетне, приближно кружне слике пласичног пробоја испод глава завртњева (слика 91). У случају малог ивичног растојања, слика пробоја се деформише, јер након пробоја долази до одвајања (кидања) дела основног материјала између прве рупе и слободне ивице елемента (слика 92).



*Слика 92 - Пробијање главе завртња у случају малог ивичног растојања - пробој деформисаног облика проширен према слободној ивици*

Када је, поред тога и дебљина лима мала, пробој главе завртња праћен је и цепањем лима у ивичној зони. Један овакав пример лома дат је на слици 93 на којој су приказани узорци веза на преклоп, остварених са по једним завртњем (испитивање је спроведено у Холандији)



*Слика 93 – Пробој лима праћен цепањем*

Ни у нашим ни у било којим савременим прописима, који су били доступни аутору, нема препорука за прорачун носивости кривљењем лима и пробијањем главе. Анализом резултата серија узорака SBL2-1 и SBL2-2, код којих је дошло до оваквог типа лома може се утврдити врло мало одступање граничних вредности сила. С

обзиром на исти тип лома и врло сличне вредности граничних сила, као и истоветне облике дијаграма  $F-\delta$ , ове две серије се приликом статистичке обраде могу сјединити у једну, чиме се добија на поузданости резултата (табела. 26). На основу овако формиране, релативно велике серије узорака (8) могу се одредити квалитетније средње вредности, варијансе и карактеристичне вредности носивости.

Табела 26 – Средње и карактеристичне вредности носивости лима на кривљење и пробијање

N°	Серија	Узорак	$F_u$	$F_{u,m}$	$s$	$V$	$F_k$
			kN	kN	kN	%	kN
1	SBL2-1 и SBL2-2	1	23,50	24,34	0,77	3,17	22,80
		2	24,20				
		3	24,10				
		4	24,30				
		5	24,10				
		6	23,90				
		7	26,10				
		8	24,50				
<p>Напомена:                      Карактеристична вредност за серију од 8 испитиваних узорака одређује се према изразу: <math>F_k = F_{u,m} - 2.0 \cdot s</math></p>							

На основу есперименталних испитивања спроведених у оквиру овог рада може се констатовати следеће:

- до лома кривљењем лима и пробијањем главе завртња долази само код веза на преклоп и то када је дебљина лима релативно мала;
- када је ивично растојање веће од  $2,5d$  долази до формирања пробоја кружног облика, а даље повећање ивичног растојања ( $e_1$ ) не доводи до повећања носивости;
- носивост лима на пробој зависи од дебљине лима, пречника завртња и квалитета основног материјала, одосно његове границе развлачења и може да се одреди као производ површине пробоја ( $A_p$ ) и смичућег напона развлачења:

$$F_p = A_p \cdot \tau_y \quad (53)$$

Може се претпоставити да је облик пробоја приближно кружан и да је једнак кругу описаном око главе завртња. Ако се, поред тога, има у виду да је:

$$\tau_y = f_y / \sqrt{3} = 0,577 \cdot f_y \quad (54)$$

коначно се добија:

$$F_p = D \cdot \pi \cdot t \cdot 0,577 \cdot f_y = 1,813 \cdot D \cdot t \cdot f_y \quad (55)$$

где су:

$D$  пречник описаног круга око главе завртња,

$f_y$  граница развлачења основног материјала.

Ако се у претходни израз унесу конкретне вредности дебљине лима (2 mm), границе развлачења (247,6 МПа) и пречника главе завртња (14,20 mm) за испитиване узорке, добија се:

$$F_p = 1,813 \cdot 14,2 \cdot 2 \cdot 247,6 / 1000 = 12,72 \text{ kN}$$

Измерена гранична носивост по једном завртњу је  $24,34/2 = 12,17$  kN, па је разлика у односу на вредност добијену према изразу (55) свега 4,3%, што је сасвим задовољавајуће. Међутим, с обзиром да је прорачунска вредност нешто већа од експериментално одређене препоручује се незнатна корекција израза (55) тако што ће бити помножен односом  $12,17/12,72 = 0,957$ , па би, коначно, требало да гласи:

$$F_p = 1,73 \cdot D \cdot t \cdot f_y. \quad (56)$$

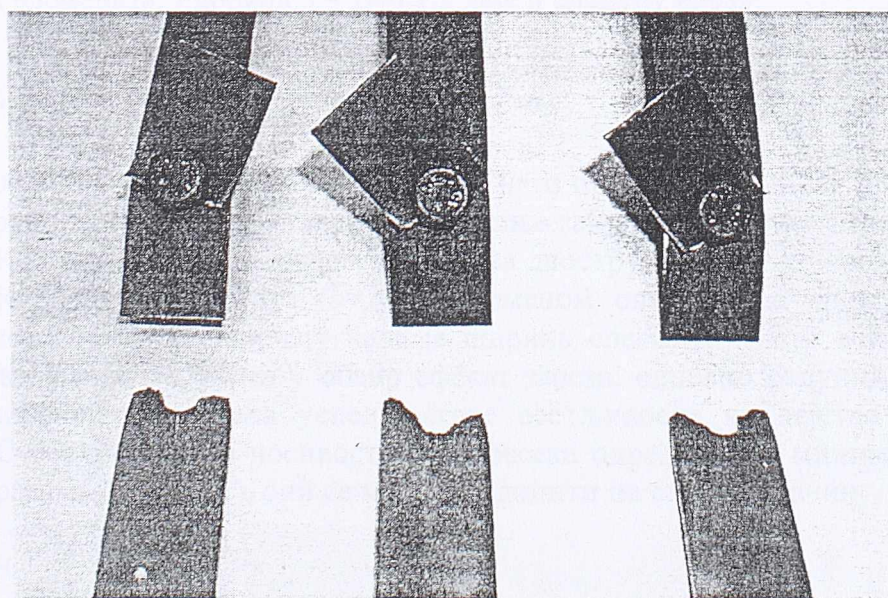
У погледу допуштене вредности носивости на кривљење и пробијање треба се држати принципа изложених у претходним разматрањима везаним за носивост основног материјала ( $\nu=1,7$ ). Према томе вредност допуштене носивости на пробој може да се одреди на следећи начин:

$$F_{p,dop} = 1,73 \cdot D \cdot t \cdot f_y / \nu = 1,02 \cdot D \cdot t \cdot f_y \approx D \cdot t \cdot f_y. \quad (57)$$

При деформацијама од 3 mm силе се крећу од 16,5 до 18,9 kN, што је више од прорачунске допуштене вредности одређене на основу претходног израза ( $F_{p,dop} = 14,2 \cdot 2 \cdot 247,6 = 7,03$  kN <  $16,5/2 = 8,25$ ). Значи да се с правом може очекивати да ће се, при прорачунским вредностима сила, деформације задржати на нивоу мањем од 3 mm.

### 2.2.3 Лом нето пресека

До лома по нето попречном пресеку долази када су ивична растојања завртњева довољно велика тако да се не може остварити лом цепањем основног материјала и када је ширина лима ( $b$ ) релативно мала. У случају испитиваних узорака до лома по нето попречном пресеку је дошло код узорака серије SBS2-2 код које је ивично растојање  $e_1=40$  mm. Према испитивањима спроведеним у оквиру ове дисертације, али и подацима о узорцима испитиваним под окриљем Техничког комитета Комисије европске зајнице може се закључити да лом нето пресека није чест облик лома код веза танкозидних челичних елемената остварених обичним завртњевима. Од близу 900 узорака који су испитвани у истраживачким центрима широм Европе само 58 је доживело лом по нето пресеку.



Слика 94 – Лом нето пресека код веза на преклоп са малом ширином лима ( $t=1,5$  mm;  $e_1=32$  mm;  $b = 24$  mm; завртањ M8; испитивање спроведено у Холандији)

Овакав тип лома јавља се код веза са подвезицама (слика 36), али и код веза на преклоп, код којих је ширина елемента мала (слика 94). У овом случају, услед ексцентричног напрезања, у почетној фази долази до малог кривљења лима, што није случај код веза са подвезицама које су центрично напрегнуте.

Прорачун носивости нето пресека садржан је у свим, па и нашим прописима. Максимална допуштена сила коју, према важећим југословенским прописима може да пренесе ослабљен попречни пресек одређује се веома једноставно, као производ нето површине ослабљеног, односно меродавног попречног пресека и допуштеног напона:

$$F_{net,dop,JUS} = A_{net} \cdot \sigma_{dop} = A_{net} \cdot f_y / \nu \quad (58)$$

На сличан начин се одређује и прорачунска вредност отпорности нето попречног пресека према Еврокоду 3:

$$F_{net,Rd} = A_{net} \cdot f_u / \gamma_{M2} \quad (59)$$

Иако наизглед слични, претходни изрази (58) и (59) се, поред разлике у коефицијентима сигурности разликују и по још једном битном параметру. Наиме у изразу (58) фигурише граница развлачења основног материјала ( $f_y$ ), док се уместо ње у изразу (59) јавља чврстоћа на затезање ( $f_u$ ). Ова разлика је веома битна с обзиром да код уобичајених конструктивних челика однос  $f_u / f_y$  варира између 1,40 и 1,50. Резултати испитивања спроведених у оквиру овог рада указују на исправност концепта датог у Еврокоду 3. Гранична носивост узорака код којих је дошло до лома по нето пресеку (серија SBS2-2) може да се одреди управо као производ нето површине попречног пресека и чврстоће на затезање основног материјала. Наиме, када се у израз (59) уврсте вредности нето површине и чврстоће на затезање испитиваних узорака, уз изостављање коефицијнта сигурности, добија се:

$$F_u = A_{net} \cdot f_u = t \cdot (b - d_0) \cdot f_u = 2 \cdot (80 - 9) \cdot 332,3 / 1000 = 47,19 \text{ kN}. \quad (60)$$

Поређењем овако одређене прорачунске вредности носивости нето попречног пресека са експериментално одређеном средњом вредности (43,2 kN), уочава се разлика од 8%. Поред изрази (59), за прорачун отпорности нето попречног пресека код танкозидних елемената, Еврокод 3 – Део 1.3 даје и следећу израз:

$$F_{net,Rd} = \left[ 1 + 3 \cdot r \cdot \left( \frac{d_0}{2 \cdot e_2} - 0,3 \right) \right] \cdot A_{net} \cdot f_u / \gamma_{M2} \quad (61)$$

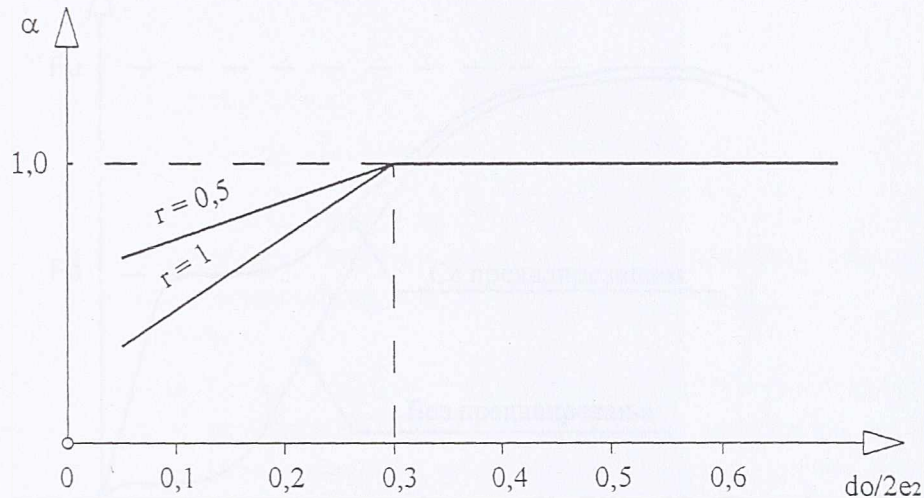
где је  $r$  однос броја завртњева у посматраном нето пресеку и укупног броја завртњева,  $d_0$  пречник рупе за спојна средства, а  $e_2$  растојање завртња од ивице управно на правац напрезања. Код веза са једним редом завртњева двострука вредност ивичног растојања  $e_2$  једнака је ширини елемента ( $b=2e_2$ ). Применом овог изрази врши се редукција носивости нето пресека у случају када је ширина елемента много већа од пречника рупе. На овај начин се узима у обзир ефекат зареза, односно редукција чврстоће на затезање основног материјала услед његове осетљивости на дејство зареза (*notch sensitivity*). С обзиром да се носивост нето пресека одређује као минимална вредност добијена изразима (59) и (61), они се могу објединити на следећи начин:

$$F_{net,Rd} = \alpha \cdot A_{net} \cdot f_u / \gamma_{M2} \quad (62)$$

где је  $\alpha$  коефицијент чија вредност не може бити већа од 1, а који се одређује према изразу:

$$\alpha = 1 + 3 \cdot r \cdot \left( \frac{d_0}{2 \cdot e_2} - 0,3 \right). \quad (63)$$

На основу структуре претходног израза (63) уочава се да коефицијент  $\alpha$  има вредности мање од 1 када је однос  $d_0 / 2e_2$  мањи од 0,3, односно када је  $e_2 > 1,667d_0$ . На слици 95 приказан је дијаграм зависности коефицијента  $\alpha$  од односа  $d_0 / 2e_2$  и то за случајеве када је  $r=0,5$  и  $r=1$ .



Слика 95 – Дијаграм зависности коефицијента  $\alpha$  од односа  $d_0 / 2e_2$

Међутим, код испитиваних узорака код којих је дошло до лома по нето пресеку и то при односу  $d_0 / 2e_2 = 9/80 = 0,1125$ , то јест  $e_2 = 4,444d_0$  није уочена битна редукација носивости иако коефицијент  $\alpha$  срачунат према изразу (63) има вредност 0,719, па би редукација носивости у конкретном случају требало да буде чак 28,1%. С обзиром на релативно мали број узорака код којих је дошло до лома по нето пресеку, на основу испитивања спроведених у овом раду, на жалост, осим поментутих опажања, не могу се дати прецизнији одговори у вези са овом проблематиком.

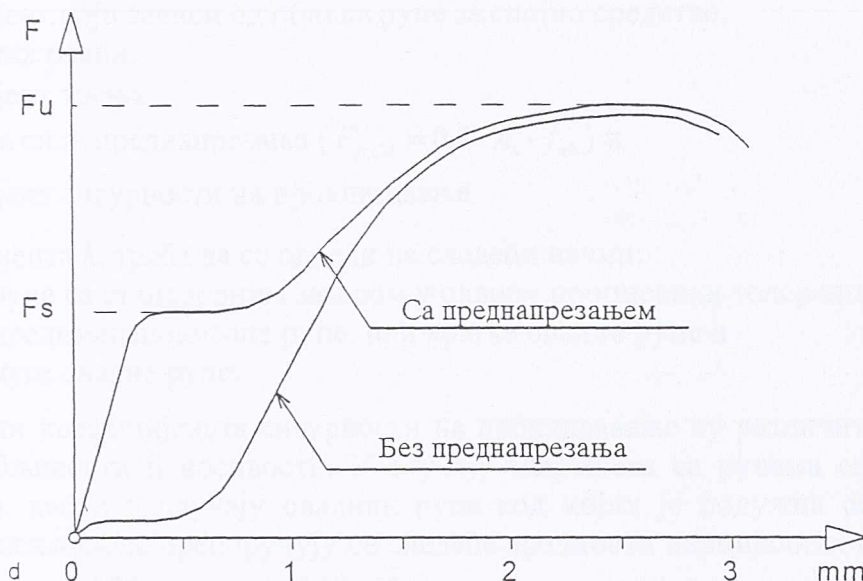
### 3 ВИСОКОВРЕДНИ ЗАВРТЊЕВИ

Примена високовредних завртњева код танкозидних челичних елемената није уобичајена из више разлога. Пре свега због изузетно велике носивости у односу на основни материјал, али и због малих стезних дебљина и релативно великих губитака силе преднапрезања. Поред тога код већине танкозидних елемената се, због велике осетљивости на губитак површине попречног пресека услед корозије, примењује поцинкавање, па како превлака од цинка има тенденцију течења то додатно утиче на пад силе преднапрезања. Стога су у овом раду анализирани само две серије узорака са преднапрегнутим високовредним завртњевима. Анализирани су везе са подвезицама израђене од лимова дебљине 4 mm, а једини параметар који је вариран било је ивично растојање  $e_1$ .

Међутим, и на основу овако малог узорка могу се потврдити нека општа сазнања о понашању веза са преднапрегнутим високовредним завртњевима. Пре свега, може се констатовати да проклизавањем завртњева, односно везе не долази до исцрпљења њене



носивости. Након достизања вредности силе која одговара проклизавању, долази до нове фазе у раду везе са преднапрегнутим завртњевима. Она почиње да се понаша као веза са обичним завртњевима и гранично стање достиже тек исцрпљењем носивости завртњева на смицање или основног материјала на притисак по омотачу рупе, укључујући и цепање лима. Стога се јасно могу разграничити појам силе проклизавања који је везан за гранично стање употребљивости и појам граничне носивости, који одговара граничном стању носивости.



Слика 96 - Шематски приказ дијаграма сила-померање код високовредних завртњева са и без силе преднапрезања

У савременој техничкој регулативи која третира ову проблематику примењује се управо овакав приступ. На пример у Еврокоду 3 - Део 1.1 везе са преднапрегнутим високовредним завртњевима у смичућим спојевима се сврставају у две категорије:

- категорија Б - везе отпорне на проклизавање при граничном стању употребљивости и
- категорија Ц - везе отпорне на проклизавање при граничном стању носивости.

Код веза категорије Б захтева се да при радном, експлоатационом оптерећењу не дође до проклизавања завртњева, односно да максимална прорачунска вредност силе у завртњу при граничном стању употребљивости ( $F_{v,Sd,ser}$ ) не буде већа од прорачунске отпорности (носивости) завртња на проклизавање ( $F_{s,Rd,ser}$ ):

$$F_{v,Sd,ser} \leq F_{s,Rd,ser} \quad (64)$$

Осим тога, максимална прорачунска вредност силе у завртњу при граничном стању носивости ( $F_{v,Sd}$ ) не сме да буде већа од отпорности завртња на смицање ( $F_{v,Rd}$ ) и отпорности основног материјала на притисак по омотачу рупе ( $F_{b,Rd}$ ):

$$F_{v,Sd} \leq F_{v,Rd} \quad (65)$$

$$F_{v,Sd} \leq F_{b,Rd} \quad (66)$$

У случају веза категорије Ц, поред услова (66) потребно је задовољити и следећи услов:

$$F_{v,Sd} \leq F_{s,Rd} \quad (67)$$

где је  $F_{s,Rd}$  отпорност завртња на проклизавање при граничном стању носивости. Отпорност завртња на проклизавање, према Еврокоду 3, треба да се одреди према следећем изразу:

$$F_{s,Rd} = k_s \cdot n \cdot \mu \cdot \frac{F_{p,Cd}}{\gamma_{Ms}} \quad (68)$$

где су:

$k_s$  коефицијент који зависи од облика рупе за спојно средство,

$n$  број тарних равни,

$\mu$  коефицијент трења,

$F_{p,Cd}$  остварена сила преднапрезања ( $F_{p,Cd} = 0,7 \cdot A_s \cdot f_{ub}$ ) и

$\gamma_{Ms}$  коефицијент сигурности на проклизавање.

Коефицијента  $k_s$  треба да се одреди на следећи начин:

$k_s = 1,00$  за рупе са стандардним зазором у оквиру прописаних толеранција,

$k_s = 0,85$  за предимензионисане рупе, или кратке овалне рупе и

$k_s = 0,70$  за дуге овалне рупе.

Вредности коефицијената сигурности на проклизавање су различите за гранично стање употребљивости и носивости. У случају завртњева са рупама са стандардним толеранцијама, као и у случају овалних рупа код којих је подужна оса управна на правац преношења сила, препоручују се следеће вредности парцијалних коефицијената сигурности:  $\gamma_{Ms,ult} = 1,25$  и  $\gamma_{Ms,ser} = 1,10$ . Код предимензионисаних рупа и овалних рупа које се пружају у правцу преношења силе треба узети већу вредност парцијалног коефицијента сигурности на проклизавање при граничном стању носивости:  $\gamma_{Ms,ult} = 1,40$ . Треба нагласити да нема посебних одредби које се тичу носивости високовредних завртњева у везама танкозидних челичних елемената.

Према југословенској регулативи за носеће челичне конструкције у грађевинарству, носивост преднапрегнутих високовредних завртњева се везује за њихово проклизавање, које се, пак, прорачунава врло слично као према Еврокоду 3. Практично за рупе са стандардним зазором, код којих је  $k_s = 1,00$ , израз за одређивање допуштене силе проклизавања по ЈУС-у ( $F_{s,dop}$ ) идентичан је са изразом (68). Поред провере завртња на проклизавање, захтева се и контрола носивости завртња на притисак по омотачу рупе. Овакав приступ прорачуну донекле одговара прорачуну веза категорије Ц из Еврокода. Међутим, постоје битне разлике које се, пре свега, односе на вредности коефицијената сигурности. Наиме, према нашим прописима максимална сила у завртњу се одређује на основу стварног, радног оптерећења које није помножено парцијалним коефицијентима сигурности и може се, условно, сматрати да одговара комбинацији оптерећења за гранично стање употребљивости према Еврокоду. Овако срачуната сила мора да буде мања од допуштене вредности силе проклизавања која се одређује према (68) са коефицијентом сигурности који, на пример за претежно мирно оптерећење и први случај оптерећења износи  $\nu_2 = 1,25$  као за гранична стања носивости у Еврокоду 3. Дакле, отпорност завртња на проклизавање при граничном стању носивости по Еврокоду 3 је, у овом случају идентична са допуштеном силом проклизавања према ЈУС-у. С обзиром да се, према Еврокоду, отпорност завртња на проклизавање при граничном стању носивости пореди са максималном силом у завртњу срачунатом на основу одговарајуће комбинације оптерећења помножених парцијалним коефицијентима сигурности за дејства чије се вредности крећу од 1.35 до

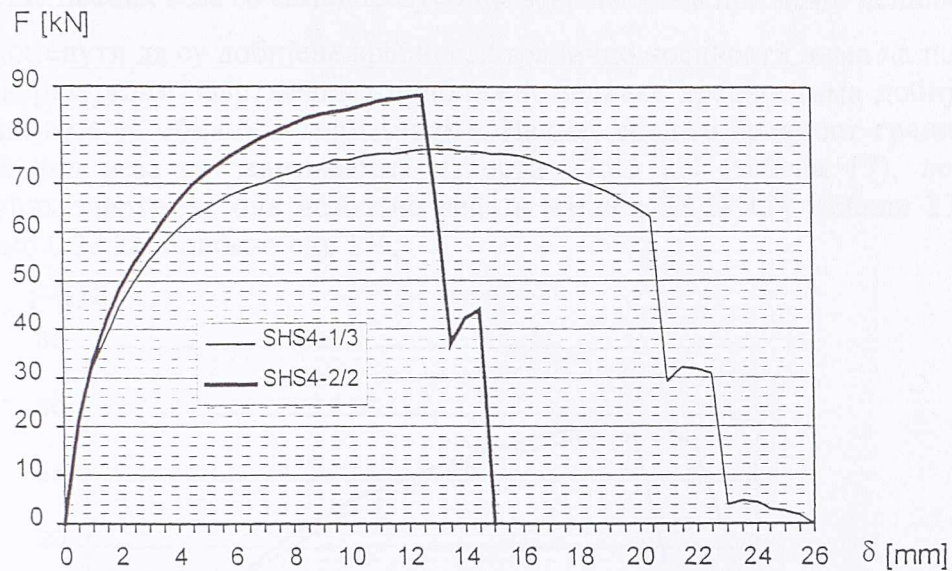
1,50, уочава се битна квантитативна разлика у односу на наше прописе код којих се допуштена вредност силе проклизавања пореди са максималном силом у завртњу одређеном на основу меродавне комбинације дејстава, без икаквих коефицијената сигурности. На основу овог се може закључити да су у погледу критеријума граничних стања носивости у односу на Еврокод наши прописи на страни несигурности за више од 35%. Међутим, када се анализирају гранична стања употребљивости код којих су леве стране израза, односно максималне вредности утицаја у завртњевима приближно исте и према Еврокоду и према ЈУС-у, а разлика само постоји у вредности коефицијента сигурности који фигуришу у изразима за носивост на проклизавање може да се констатује да је за, разматрани први случај оптерећења, ЈУС нешто конзервативнији (око 14%).

На основу испитивања узорака веза са преднапрегнутим високовредним завртњевима, али и испитивања самих завртњева на затезање може се констатовати висок квалитет израде високовредних завртњева, који се огледа кроз веома мала одступања и уједначене вредности добијаних сила било да се ради о носивости везе или појединачних завртњава. Такође треба истаћи да експериментално одређене вредности механичких карактеристика високовредних завртњева одговарају називним (око 10% су веће), што није био случај код обичних завртњева, а што указује на задовољавајући ниво производње и контроле квалитета. До лома код испитаних узорака долази цепањем лима, када је мало ивично растојање (серија SHS4-1), односно смицањем завртњева у случају великог ивичног растојања (серија SHS4-2).

Прорачун носивости завртњева на смицање и прорачун носивости лима на цепање, када је реч о преднапрегнутим високовредним завртњевима може да се спроведе на идентичан начин као и код обичних завртњева. То се може потврдити и поређењем експерименталних резултата са одговарајућим прорачунским вредностима одређеним према препорученим изразима (27) за носивост завртњева на смицање, односно (37) за носивост лима на цепање. Треба истаћи да су испитивани завртњеви М8 поседовали навој по читавој висини, те да је стога њихова радна површина једнака двострукој (сечност је 2) површини испитног пресека ( $A^* = 2 \cdot 36,6 = 73,2 \text{ mm}^2$ ). Прорачунска гранична носивост једног завртња на смицање је, према томе 40,2 kN ( $0,5 \cdot 73,2 \cdot 1098 / 1000 = 40,2 \text{ kN}$ ), док експериментално одређена вредност силе при лому у једном завртњу износи 43,5 kN ( $87/2 = 43,5 \text{ kN}$ ). На сличан начин могу се упоредити прорачунска и експериментално одређена вредност силе лома, код узорака серије серија SHS4-1 код којих до лома долази цепањем лима. У овом случају прорачунска вредност износи 35,8 kN, а експериментална 39,2 kN. У оба случаја прорачунске вредности су нешто мање од експерименталних, што је на страни сигурности.

При достизању максималне вредности силе, деформације су, код обе серије узорака, око 12 mm, али код узорака серије SHS4-2 потом долази до наглог пада силе услед лома завртњева смицањем, док код узорака серије SHS4-1 долази до пластификације и даљег пораста деформације, услед цепања лима, уз благи пад силе све до граничних вредности деформација од око 20 mm. Разлика у облику дијаграма сила-деформација ( $F-d$ ) код узорака карактеристичних за поменуте серије приказана је на слици 97. При деформацијама од 3 mm вредности силе у завртњевима су релативно високе у односу на њихову максималну (граничну) вредност. Код серије SHS4-1 ова вредност износи у просеку 57 kN што је око 73% од максималне вредности силе, док је код серије SHS4-2 ова вредност у апсолутном износу мало већа и износи око 59 kN, или

68% од одговарајуће граничне вредности.



Слика 97 - Поређење карактеристичних  $F$ - $\delta$  дијаграма серија SHS4-1 и SHS4-2

## 4 САМОНАРЕЗУЈУЋИ ЗАВРТЊЕВИ

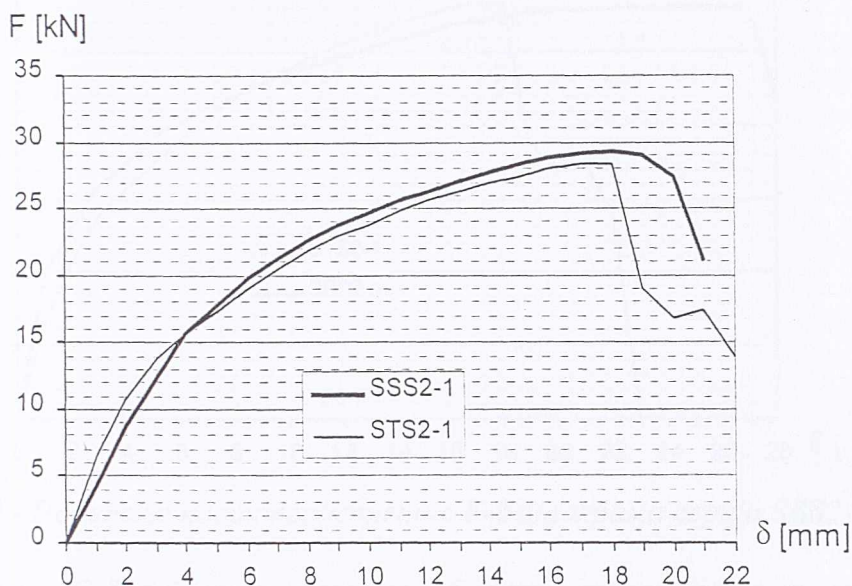
### 4.1 ОПШТА РАЗМАТРАЊА

С обзиром да у литератури нема много информација и сазнања, било теоријских или експерименталних, о понашању веза са самонарезајућим завртњевима, овој проблематици је посвећена посебна пажња. Анализирани су завртњеви пречника 6,3 mm који се највише примењују, како у свету, тако и у нашим условима. Број испитиваних узорак био је двоструко већи него код веза са обичним завртњевима. Испитиване су две групе самонарезајућих завртњева (тип S и тип T) различитих произвођача. На овај начин је повећан број узорак и, с обзиром да самонарезајући завртњеви немају никакве ознаке које указују на њихове механичке карактеристике, анализирана њихова носивост у зависности од произвођача, односно од процеса производње. Но, накнадно се испоставило да је носивост самонарезајућих завртњева оба испитивана типа веома слична, те да нема значајних одступања у погледу квалитета, наравно уз неке мале изузетке. Из тих разлога резултати обе испитиване групе (типа) самонарезајућих завртњева могу да се обједине приликом статистичке анализе података, чиме се повећава број узорак по серији на 6 и добија на поузданости резултата. Ако се, пак анализирају поједини типови лома, онда се могу вршити додатна укрупњавања серија, али о томе ће бити речи нешто касније.

Код већине испитиваних серија, до лома долази смицањем самонарезајућих завртња, по једној или две смичуће равни, у зависности од типа везе (на преклоп или са подвезицама). Само код серија узорак са подвезицама и малим ивичним растојањем које су израђене од лимова дебљине 2 mm (серије SSS2-1 и STS2-1) до лома долази цепањем лима у ивичној зони. Вредности граничних сила при лому насталом цепањем лима су, код оба типа спојних средстава (тип S и тип T), врло сличне. На слици 98 приказано је поређење карактеристичних  $F$ - $\delta$  дијаграма серија SSS2-1 и STS2-1, док су

у овом случају табеле 27 дате одговарајућа средња и карактеристична вредност граничне носивости испитиваних веза са самонарезујућим завртњевима при лому цепањем.

Треба поменути да су добијене вредности граничне носивости лима на цепање код веза са самонарезујућим завртњевима приближно једнаке вредностима добијених код еквивалентних веза са обичним завртњевима. Наиме, средња вредност граничне силе цепања лима код веза са завртњевима износи 27,85 kN (табела 17), док је код самонарезујућих завртњева она незнатно већа и износи 28,18 kN (табела 27). Дакле, разлика је само 0,33 kN односно око 1%.



Слика 98 - Поређење карактеристичних  $F$ - $\delta$  дијаграма серија SSS2-1 и STS2-1

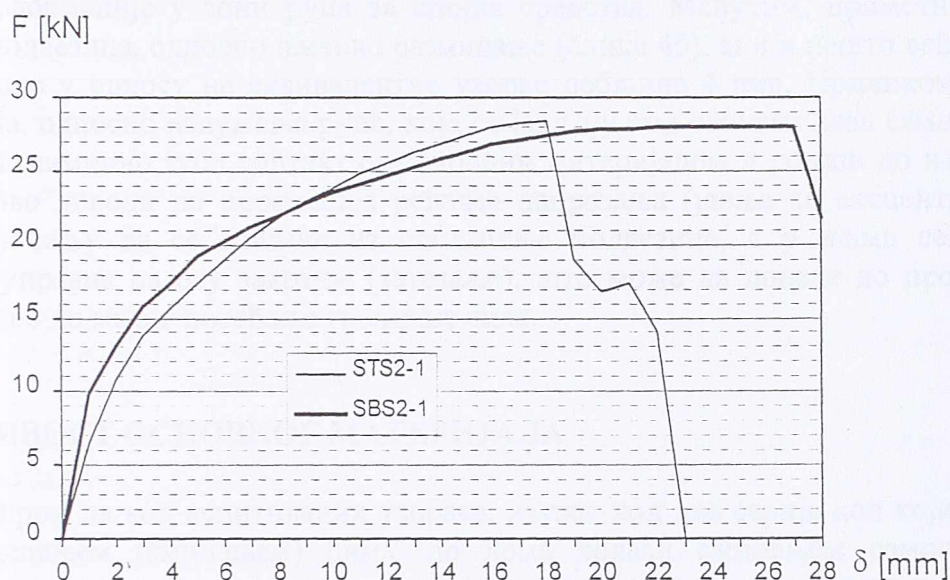
Табела 27 - Средње ( $F_{u,m}$ ) и карактеристичне ( $F_k$ ) вредности граничне носивости веза са самонарезујућим завртњевима на лом цепањем лима

N°	Серија	Узорак	$F_u$	$F_{u,m}$	$s$	$V$	$F_k$
			kN	kN	kN	%	kN
1	SSS2-1 и STS2-1	1	28,80	28,18	0,92	3,28	26,17
		2	28,10				
		3	29,20				
		4	26,50				
		5	28,20				
		6	28,30				

То указује на врло битну чињеницу да носивост лима на цепање, практично не зависи од величине и типа спојног средства, већ од вредности ивичног растојања, дебљине лима и квалитета основног материјала, односно његове чврстоће на затезање. Према томе, изрази за одређивање граничне носивости лима на цепање (37) и одговарајуће допуштене силе (38) који су предложени за везе са обичним завртњевима, могу да се користе и за везе са самонарезујућим завртњевима.

У погледу деформабилности оваквих веза може се констатовати да је гранична деформација приближно једнака вредности ивичног растојања  $e_1$ , као што је био случај и код веза са обичним завртњевима код којих до лома долази цепањем лима у ивичној зони. При деформацији од 3 mm вредност силе се креће око 14 kN, што је тек нешто

око половине граничне носивости везе. С обзиром да је ова вредност силе мања од допуштене ( $28,18/1,7=16,6$  kN), треба водити рачуна да приликом пројектовања оваквих веза лом цепањем лима не буде меродаван, јер могу бити угрожени критеријуми граничног стања употребљивости. Ово се може постићи повећањем ивичног растојања завртњева.



Слика 99 - Поређење карактеристичних  $F$ - $\delta$  дијаграма серија SBS2-1 и STS2-1

Поређењем  $F$ - $\delta$  дијаграма веза са обичним завртњевима и самонарезујућим завртњевима (слика 99) може се уочити да је код веза са завртњевима при достизању граничне силе носивости деформабилност нешто израженија, док је крутост веза у почетној фази напрезања већа, тако да су и вредности силе при деформацијама од 3 mm нешто веће.

Код лимова дебљине 4 mm, у случају веза са самонарезујућим завртњевима, као и у случају веза са обичним завртњевима, не долази до лома цепањем лима ни при малим ивичним растојањима (20 mm). Код оваквих веза долази до лома смицањем самонарезујућих завртњева, по једној или две равни смицања у зависности од сечности завртња, односно типа везе. На исти начин до лома долази и код веза са лимовима дебљине 2 mm код којих је веће ивично растојање (40 mm). При том треба напоменути да су деформације при лому смицањем код веза израђених од лимова дебљине 4 mm знатно мање него код лима од 2 mm.

Носивост самонарезујућих завртњева на смицање је знатно мања од носивости испитиваних обичних завртњева и то због мање ефективне (радне) површине попречног пресека завртња, али и нешто лошијих механичких карактеристика материјала од кога су израђени. Због тога су приликом лома смицањем самонарезујућих завртњева, у основном материјалу знатно мања напрезања него у случају веза са обичним завртњевима, па ни код веза на преклоп не долази до лома кривљењем основног материјала.

Треба напоменути да је код узорака серија STL2-1 и STL2-2 дошло до лома одвајањем тела завртња од шестоугаоне главе и то при знатно мањим вредностима силе него што је био случај са еквивалентним узорцима серије S (SSL2-1 и SSL2-2). То је уједно и једино битно одступање резултата испитивања два различита типа

самонарезујућих завртњева. Узроци оваквих разлика вероватно леже у лошијем квалитету групе самонарезујућих завртњева типа Т.

Такође је интересантно и понашање веза са подвезицама које су израђене од лима дебљине 2 mm, а код којих ивично растојање износи 40 mm (серије SSS2-2 и STS2-2). Код узорака ових серија до лома долази смицањем самонарезујућих завртњева уз значајне деформације у зони рупа за спојна средства. Међутим, приметно је бочно померање подвезица, односно њихово размицање (слика 45), али и нешто већа вредност граничне силе у односу на еквивалентне узорке дебљине 4 mm. Приликом значајних деформација, односно издужења рупа, која се јављају код оваквих веза самонарезујућих завртњеви делимично губе контакт са основним материјалом и долази до њихове мале ротације. Ово доводи до поремећаја режима напрезања (јавља се ексцентрицитет) и завртњеви почињу да се извлаче из спољашње подвезице, а у њима се јављају и напрезања управна на осу завртња (затезање), што може да доведе до пролонгирања лома, односно до малог повећања граничне силе.

## 4.2 НОСИВОСТ ОСНОВНОГ МАТЕРИЈАЛА

С обзиром да код испитиваних узорака, изузев код две серије код којих је дошло до лома цепањем (смицањем) лима, до лома долази смицањем самонарезујућих завртњева, неки од потенцијалних видова лома као што су: лом нето пресека и лом притиском по омотачу рупе биће презентовани у складу са европским искуствима и прописима.

Отпорност нето пресека код веза са самонарезујућим завртњевима према Еврокоду 3 - Део 1.3 треба да се одреди на основу познатог израза:

$$F_{n,Rd} = A_{net} \cdot f_u / \gamma_{M2} \quad (69)$$

који је уобичајен и за класичне челичне конструкције и, у нешто другачијој форми, фигурише и у нашим прописима ( $F_{n,dop} = A_{net} \cdot \sigma_{dop}$ ). Дакле, нема неких специфичности које би се односиле на танкозидне челичне конструкције. Треба рећи и да је слабљење рупама за спојна средства код веза са самонарезујућим завртњевима мање него код веза са обичним или високовредним завртњевима, због тога што су самонарезујући завртњеви мањег пречника, али и не захтевају зазор приликом постављања, па према томе, у погледу нето пресека, носивост веза са самонарезујућим завртњевима је већа.

Што се тиче отпорности на притисак по омотачу рупе, она треба да се одреди на основу следећег израза:

$$F_{b,Rd} = \frac{\alpha \cdot d \cdot t \cdot f_u}{\gamma_{M2}} \quad (70)$$

где је  $\alpha$  коефицијент који може да се одреди на следећи начин:

$$\alpha = \begin{cases} 3,2 \cdot \sqrt{t/d} & \text{за } t_1 = t \\ 2,1 & \text{за } t_1 \geq 2,5t \\ \text{линеарна интерполација} & \text{за } t < t_1 < 2,5t \end{cases} \quad (71)$$

При томе треба водити рачуна и о носивости лима на цепање која може да се одреди према препорукама раније наведеним у овом раду. Наиме, у Еврокоду за прорачун носивости самонарезујућих завртњева нису дата никаква ограничења у погледу отпорности на цепање лима, али свакако треба водити рачуна да гранична вредност носивости одређена претходним изразима (70) не буде већа од носивости лима на цепање која се може одредити према изразу (37).

#### 4.3 НОСИВОСТ САМОНАРЕЗУЈУЋИХ ЗАВРТЊЕВА НА СМИЦАЊЕ

Када се обједине резултати испитивања свих узорак код којих је до лома дошло смицањем самонарезујућих завртњева изузев поменутих серија са завртњевима типа Т код којих је дошло до драстичног подбачаја силе (серије STL2-1 и STL2-2) могу, доста поуздано, с обзиром на прилично велики број испитаних узорак (30), да се одреде средња и карактеристична вредност граничне носивости везе на смицање (табела 28), а самим тим и носивост једног завртња.

Карактеристична вредност носивости једног самонарезујућег завртња на смицање једнака је половини карактеристичне вредности носивости везе, с обзиром да је веза остварена са два завртња и да се може сматрати да је њихов удео у носивости везе подједнак, односно да се с обзиром на релативно малу дужину везе оптерећење преноси равномерно на оба спојна средства. Према томе, карактеристична вредност носивости једног самонарезујућег завртња пречника 6,3 mm на смицање по једној смичућој равни је  $11,68/2=5,84$  kN. Варирање резултата, с обзиром да се ради о два различита типа самонарезујућих завртњева, није велико ( $V=6,05\%$ ), мада је и, поред знатно већег броја испитаних узорак, веће него код обичних завртњева ( $V=1,71\%$ ). Ово указује на мање уједначен квалитет производње, бар што се тиче механичких карактеристика.

Да би се омогућила практична примена самонарезујућих завртњева у танкозидним металним конструкцијама неопходно је да се од стране произвођача захтева гарантована, минимална гранична носивост, чија вредност би била видно утиснута на глави завртња. Због специфичног поступка производње самонарезујућих завртњева они се не могу, као у случају обичних или високовредних завртњева означавати само квалитетом материјала, односно класом чврстоће. Податак о основном материјалу, односно о његовим механичким карактеристикама није довољно поуздан с обзиром на нехомогеност самонарезујућег завртња која настаје као последица процеса цементације.

Стога је неопходно да се спроведе испитивање носивости самонарезујућих завртња, на задовољавајућем броју узорак уз прописан фрактил (нпр. 5%) и да се на тај начин одреди носивост као декларација механичког квалитета завртња као готовог производа. На тај начин би се, наравно уз прописом утврђене коефицијенте сигурности, могла допустити употреба ових спојних средстава у лаким металним конструкцијама.

Подаци о носивости на смицање самонарезујућих завртњева пречника 6,3 mm који су приказани у овом раду могу да послуже као оријентационе вредности, односно показатељи, који инжењерима могу да дају представу о стварним могућностима ових спојних средстава, док се не утврде одговарајући прописи и стандарди којима би се законски регулисала ова проблематика. Ови подаци добијају на значају ако се има у виду да до сада нема никаквих конкретних препорука за прорачун носивости самонарезујућих завртњева на смицање. Еврокод сугерише експериментално



утврђивање носивости самонарезујућих завртњева на смицање, док код нас и не постоје прописи који третирају ову проблематику.

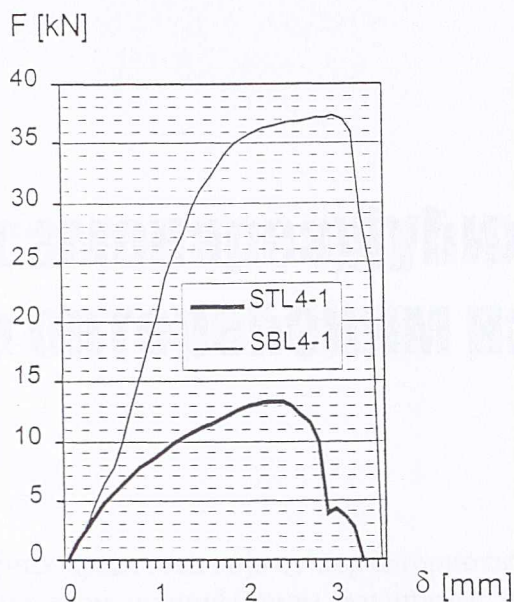
Табела 28 - Средње ( $F_{u,m}$ ) и карактеристичне ( $F_k$ ) вредности граничне носивости веза са самонарезујућим завртњевима на смицање

№	Серија	Узорак	$F_u$	$F_{u,m}$	$s$	$V$	$F_k$
			kN	kN	kN	%	kN
1	SSL2-1	1	13,60	12,97	0,78	6,05	11,68
		2	13,30				
		3	12,50				
		4	14,30				
		5	13,10				
		6	15,30				
	7	27,40/2=13,70*					
	8	26,10/2=23,05					
	9	27,20/2=13,60					
	10	24,70/2=12,35					
	11	24,40/2=12,20					
	12	22,00/2=11,00					
	13	29,10/2=14,55					
	14	26,30/2=13,15					
	15	26,60/2=13,30					
	16	24,70/2=12,35					
	17	23,80/2=11,90					
	18	23,40/2=11,70					
	19	11,80					
	20	12,60					
	21	12,90					
	22	13,20					
	23	13,30					
	24	14,10					
	25	13,50					
	26	12,30					
	27	12,00					
	28	12,70					
	29	12,60					
	30	12,70					

Напомене:  
 \* Код двосечних веза вредности граничне силе су подељене са 2!  
 Карактеристична вредност за серију од 24 испитивана узорка одређује се према изразу:  $F_k = F_{u,m} - 1,64 \cdot s$

У погледу деформација треба истаћи да су код веза на преклоп оне знатно мање, јер су и силе при лому двоструко мање него код веза са подвезицама. Најмање деформације су код веза на преклоп са лимовима дебљине 4 mm, док су код веза израђених од лимова дебљине 2 mm оне нешто веће. Код свих веза на преклоп до лома долази при деформацијама мањим од 3 mm, док је код лимова дебљине 4 mm деформација при максималној сили негде око 1,5 до 2 mm. Дакле, уколико до лома долази смицањем самонарезујућих завртњева критеријуми граничних стања

употребљивости ће свакако бити задовољени, што је свакако још један од показатеља на који начин треба пројектовати везе код танкозидних челичних елемената.



Слика 100 - Поређење карактеристичних  $F$ - $\delta$  дијаграма серија веза са обичним и самонарезајућим завртњевима

У поређењу са везама израђеним помоћу обичних завртњева уочава се, очекивано мања носивост (слика 100). Крутост веза је у почетној фази напрезања иста, док је у оба случаја задовољен критеријум деформабилности. Осим тога, нелинеарност је више изражена код веза са самонарезајућим завртњевима.

Одговарајућа, потребна носивост везе са самонарезајућим завртњевима може се постићи постављањем већег броја завртњева, што, с обзиром на њихову јединичну цену, може да има економско оправдање.

## Поглавље 5:

# Понашање самонарезујућих завртњева у спојевима оптерећеним на затезање

## 1 УВОД

Од механичких спојних средстава која су карактеристична за танкозидне елементе челичних конструкција, по свом специфичном понашању издвајају се самонарезујући завртњеви, поп-закивци и ексери са експлозивним упуцавањем, док се обични завртњеви углавном понашају на истоветан начин као и код класичних челичних конструкција. Поменута спојна средства су интересантна у погледу затезања због саме чињенице да немају класичну навртку која би спречавала њихово извлачење из споја. Код самонарезујућих завртњева навој се образује у доњем, носећем лиму који на неки начин има улогу навртке, док се код поп-закивака формира такозвана "слепа" глава. С обзиром да се ова дисертација бави проблематиком обичних, високовредних и самонарезујућих завртњева, то јест не обрађује понашање поп-закивака и ексера, у овом поглављу ће бити приказани резултати испитивања самонарезујућих завртњева оптерећених на затезање у правцу своје подужне осе.

Самонарезујући завртњеви се у досадашњој пракси у грађевинарству најчешће примењују за везивање кровних и фасадних облога за носећу челичну конструкцију. У оваквим спојевима услед сишућег дејства ветра долази до напрезања управних на раван облоге, па су спојна средства, односно самонарезујући завртњеви оптерећени на затезање. Носивост самонарезујућег завртња у споју оптерећеном на затезање зависи од више параметара од којих су најзначајнији:

- пречник и механичке карактеристике завртња,
- дебљина доњег, носећег лима у који се завртањ урезује ( $t_{sup}$ ) и његове механичке карактеристике,
- дебљина горњег лима ( $t$ ) и његове механичке карактеристике и
- геометријске карактеристике главе завртња или пречник подлошке уколику она постоји.

Од односа ових величина зависи који ће се од потенцијалних видова лома јавити у конкретном, разматраном случају. Потенцијални видови лома код оваквих веза су: лом завртњева затезањем, лом чупањем завртња из основног материјала, лом пробијањем или провлачењем главе завртња (видети слику 8).

У оквиру ове дисертације испитиване су три различите серије узорака веза са самонарезујућим завртњевима које су оптерећене на затезање, са програмираним типом лома, како би се појавили сви наведени, потенцијални типови лома. Осим тога резултати испитивања узорака серије TS10k, код којих је до лома дошло исцрпљењем

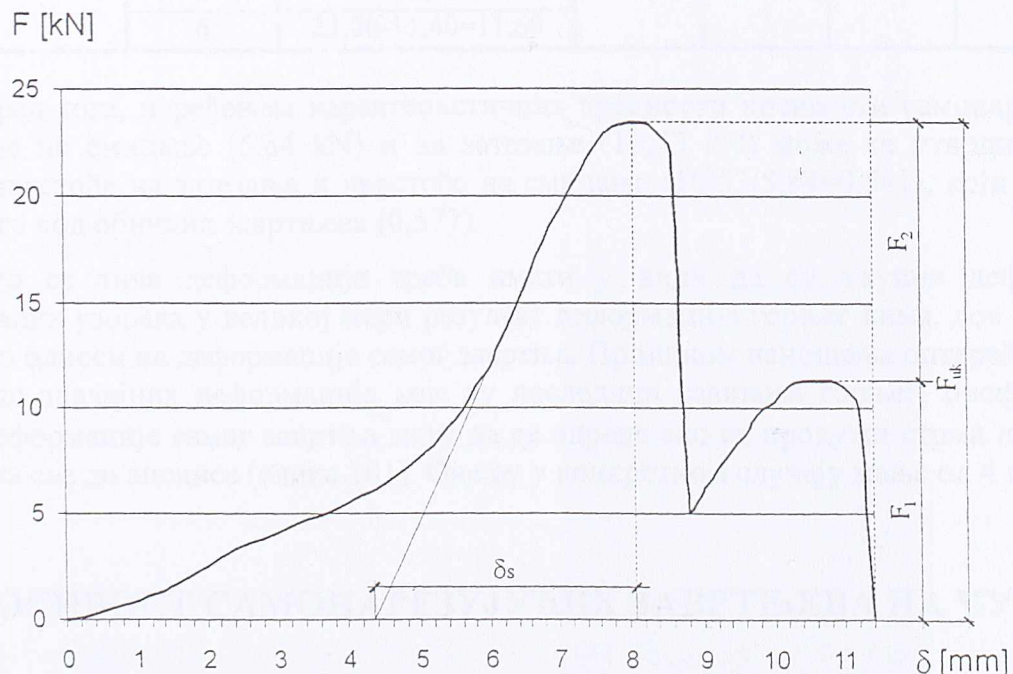
носивости завртњева послужили су и за одређивање механичких карактеристика материјала од кога су самонарезујући завртњеви направљени.

С обзиром на релативно мали број испитаних узорака веза са самонарезујућим завртњевима оптерећеним на затезање, циљ овог рада није доношење препорука за прорачун оваквих веза, већ да феноменолошки укаже на специфичности карактеристичне за ову проблематику и да добијене резултате упореди са иностраним искуствима, односно да упореди прорачунске и експерименталне резултате код оних случајева код којих препоруке за прорачун постоје.

## 2 НОСИВОСТ САМОНАРЕЗУЈУЋИХ ЗАВРТЊЕВА НА ЗАТЕЗАЊЕ

Као и у случају носивости на смицање и у случају носивости самонарезујућих завртњева на затезање, у литератури нема података, нити подлога на основу којих би се могла одредити њихова носивост. Еврокод 3 који третира проблематику веза са самонарезујућим завртњевима препоручује да се отпорност самонарезујућих завртњева на затезање одреди експерименталним путем у складу са препорукама датим у поглављу о прорачуну потпомогнутим испитивањем.

Узорци серије TS10k су конципирани тако да до лома дође управо исцрпљењем носивости завртњева на затезање. Веза је остварена са по два самонарезујућа завртња, а други видови лома су онемогућени великом дебљином доњег лима (чупање), односно постављањем контра плочице испод главе завртња (пробијање или провлачење). Дијаграми сила-деформација ( $F-\delta$ ) приликом ових испитивања пружају могућност да се утврди носивост сваког самонарезујућег завртња појединачно (слика 101).



Слика 101 - Карактеристичан  $F-\delta$  дијаграм за лом завртњева затезањем

Поред укупне, максималне носивости везе на затезање ( $F_{uk}$ ) која је једнака збиру носивости два самонарезујућа завртња на затезање и може се очитати са  $F$ - $\delta$  дијаграма као прва вршна (максимална) вредност криве, на основу истог дијаграма може да се одреди и носивост једног завртња ( $F_l$ ). Наиме, при достизању максималне вредности силе долази до лома једног самонарезујућег завртња, који је, услед неизбежне, мале асиметрије, био више напрегнут. Након тога, после наглог пада силе, она поново почиње да расте и достиже ниво (други максимум) при коме се исцрпљује носивост на затезање и другог, преосталог завртња. На овај начин, одузимањем носивости другог завртња од носивости читаве везе, може да се утврди и носивост првог завртња. Тако се на основу три испитана узорка добијају независни подаци о носивости шест самонарезујућих завртњева. Статистичком обрадом резултата испитивања (табела 29) добијају се средња и карактеристична вредност носивости самонарезујућих завртњева на затезање уз релативно мала колебања резултата ( $V=4,94\%$ ). Имајући у виду геометријске карактеристике попречног пресека испитиваног самонарезујућег завртња ( $A_o = 4,88^2 \cdot \pi / 4 = 18,7 \text{ mm}^2$ ) могу да се одреде и оријентационе, просечне вредности чврстоће на затезање материјала од кога су завртњеви направљени. (на пример  $f_{u,m} = 11800/18,7 = 631 \text{ MPa}$ ).

Табела 29 - Средње ( $F_{u,m}$ ) и карактеристичне ( $F_k$ ) вредности граничне носивости самонарезујућих завртњева на затезање

№	Серија	Узорак	$F_u$	$F_{u,m}$	$s$	$V$	$F_k$
			kN	kN	kN	%	kN
1	TS10k	1	11,30	11,80	0,58	4,94	10,53
		2	$23,50-11,30=12,20$				
		3	12,80				
		4	$24,30-12,80=11,50$				
		5	11,40				
		6	$23,00-11,40=11,60$				

Поред тога, поређењем карактеристичних вредности носивости самонарезујућих завртњева на смицање (5,84 kN) и на затезање (10,53 kN) може се утврдити однос између чврстоће на затезање и чврстоће на смицање ( $10,53/5,84=0,541$ ), који је нешто мањи него код обичних завртњева (0,577).

Што се тиче деформација треба имати у виду да су укупне деформације испитиваних узорка у великој мери резултат деформација горњег лима, док се знатно мањи део односи на деформације самог завртња. Приликом nanoшења оптерећења прво долази до значајних деформација које су последица савијања горњег, профилисаног лима. Деформације самог завртња могу да се одреде ако се продужи стрма линија  $F$ - $\delta$  дијаграма све до апсисе (слика 101). Оне су у конкретном случају мање од 4 mm.

### 3 НОСИВОСТ САМОНАРЕЗУЈУЋИХ ЗАВРТЊЕВА НА ЧУПАЊЕ

Када је дебљина доњег, носећег лима мала до лома везе са самонарезујућим завртњевима долази чупањем, односно извлачењем завртњева. Носивост зависи од пречника завртња ( $d$ ), дебљине доњег, носећег лима ( $t_{sup}$ ) и чврстоће на затезање материјала од кога је израђен ( $f_{u,sup}$ ). Испитивања која су спроведена у оквиру овог рада

са дебљином доњег лима  $t_{sup}=2$  mm (серија TS2) показују да је носивост оваквих веза веома мала, као и да су приметна знатна одступања у резултатима испитивања ( $V=17,23\%$ ). Када је дебљина доњег лима мала самонарезујући завртањ, с обзиром на величину хода навоја, не може довољно поуздано да се причврсти за носећи лим, па услед тога и долази до већег расипања резултата.

Према Еврокоду 3 носивост самонарезујућих завртњева на чупање треба да се одреди на основу следећег израза:

$$F_{o,Rd} = \frac{0,65 \cdot d \cdot t_{sup} \cdot f_{u,sup}}{\gamma_{M2}} \quad (72)$$

Поређењем прорачунских вредности добијених према претходном изразу ( $F_{o,Rd} = 2 \cdot 0,65 \cdot 6,3 \cdot 2 \cdot 332 = 5438$  N = 5,438 kN) са експерименталним резултатима ( $F_{o,exp,m} = 4,84$  kN) уочава се одступање од око 11%, и то на страни несигурности. Прорачунске вредности су веће од експериментално утврђених. Тек ако се уведе и парцијални коефицијент сигурности ( $\gamma_{M2}=1,25$ ) прорачунска вредност бива мања од средње експерименталне вредности ( $5,438/1,25 = 4,35$  kN < 4,84 kN).

Осим тога, треба водити рачуна да је прописана минимална дебљина доњег лима код веза са самонарезујућим завртњевима оптерећеним на затезање која је дата у Еврокоду веома мала ( $t_1 > 0,9$  mm), те да је треба узети са резервом. Према мишљењу аутора, минимална дебљина доњег лима у који се урезује завртањ ( $t_{sup}$ ) требало би да буде у функцији пречника самонарезујућег завртња, односно требало би да је приближно једнака његовом називном пречнику. На пример за самонарезујући завртањ 6,3 дебљина доњег лима требало би да буде бар 6 mm. На овај начин се значајно повећава носивост завртња на чупање. Правилним конструисањем везе треба избећи да лом чупањем завртња буде меродаван при димензионисању на затезање.

#### 4 НОСИВОСТ САМОНАРЕЗУЈУЋИХ ЗАВРТЊЕВА НА ПРОБИЈАЊЕ И ПРОВЛАЧЕЊЕ

Како се, као што је напоменуто, самонарезујући завртњеви углавном примењују за причвршћивање кровне и фасадне облоге од различитих типова профилисаог лима чија је дебљина мала ( $t \leq 1$  mm), пробијање или провлачење је најчешће меродаван вид лома. И док се на дебљину доњег, носећег лима може утицати, дебљина горњег лима је готово по правилу мала и лимитирана. Носивост на пробијање односно провлачење код веза са самонарезујућим завртњевима зависи од дебљине горњег лима и његових механичких карактеристика, као и од величине главе завртња, односно од пречника подлошке ( $d_w$ ) уколико је има. Да ли ће доћи до пробијања главе завртња или до њеног провлачења кроз горњи лим зависи од односа пречника подлошке и пречника завртња ( $d_w/d$ ). Када је овај однос већи долази до провлачења, а у супротном, што је чешћи случај, долази до пробијања главе завртња кроз горњи лим.

Код испитиваних узорак серије TS10 дошло је до лома пробијањем. Треба напоменути да су испитивања извршена без подложних плочица, те да је облик лома приближно једнак облику главе завртња (шестоугаони). Носивост при овом типу лома је више од два пута већа него у случају лома извлачењем. Применом одговарајућих

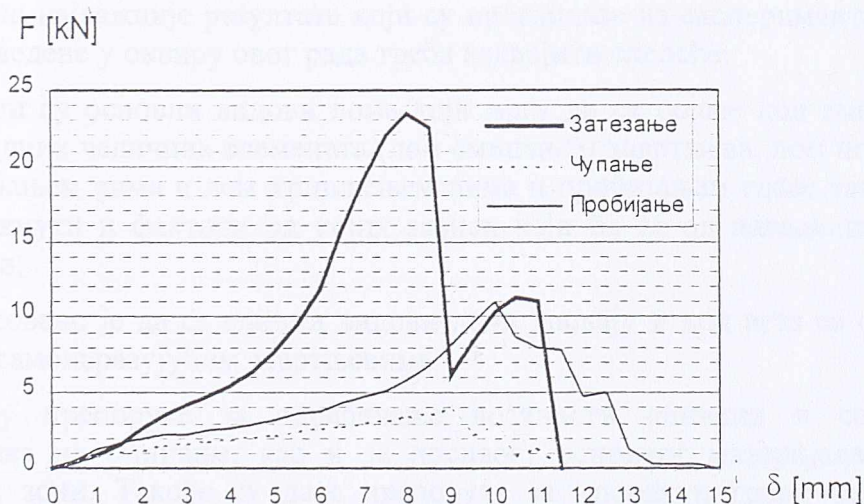
подлошки ова вредност би била нешто већа, пошто је тада и обим површине лома основног материјала већи.

Према Еврокоду 3 носивост самонарезајућих завртњева на пробијање се одређује на основу следећег израза:

$$F_{p,Rd} = \frac{d_w \cdot t \cdot f_u}{\gamma_{M2}} \quad (73)$$

Када се експериментални резултати ( $F_{p,exp,m} = 10,9 \text{ kN}$ ) упореде са прорачунским ( $F_{p,Rd} = 2 \cdot 11 \cdot 1 \cdot 510 = 11220 \text{ N} = 11,22 \text{ kN}$ ) као и у случају носивости самонарезајућих завртњева на чупање, може се констатовати да су прорачунске вредности и овог пута веће од експерименталних, али је ова разлика знатно мања (2,85%). Тек применом препорученог коефицијент сигурности ( $\gamma_{M2} = 1,25$ ) прорачунска вредност постаје мања од средње експерименталне ( $11,22/1,25 = 8,98 \text{ kN} < 10,9 \text{ kN}$ ).

Као и у случају лома чупањем, деформације при достизању граничне силе су последица деформација профилисаног лима, али се за разлику од случаја лома затезањем завртњева не може прецизније одвојити појединачни допринос укупним деформацијама.



Слика 102 - Поређење карактеристичних F-δ дијаграма за различите типове лома

Упоредна анализа различитих типова лома код испитиваних узорак (слика 102) указује на велике разлике у погледу носивости везе. Највећу носивост имају везе код којих је до лома дошло затезањем самонарезајућих завртњева, а најмању оне код којих је лом наступио чупањем (извлачењем) самонарезајућих завртњева из основног материјала. Међутим, тешко је очекивати да се у реалним условима оствари лом затезањем, јер постављање дебелих контра плочица испод главе завртња које спречавају његово пробијање је компликован и скуп захват. Такође треба избегавати мале дебљине доњег лима, као што је био случај код испитиваних узорак серије TS2 (дебљина доњег лима је била 2 mm). Избором правилне дебљине доњег лима у функцији пречника завртња (према датим препорукама) може се постићи да носивост на чупање буде већа од носивости на пробијање. Дакле, реално је очекивати да код оваквих типова веза носивост на пробијање буде меродавна за димензионисање.

## Закључак

Примена механичких спојних средстава код танкозидних челичних елемената није још увек у великој мери узела маха. Ово се посебно односи на специфична спојна средства као што су самонарезујући завртњеве. Један од разлога, поред увек присутног страха од новог, је и недовољно познавање понашања ових спојних средстава под дејством статичког оптерећења, а у нашим условима и недостатак одговарајућих прописа или стандарда за прорачун.

Ова дисертација, кроз експериментална и нумеричка истраживања даје одговоре на нека питања везана за носивост обичних и самонарезујућих завртњева. С обзиром да је тежиште рада на спојевима који су оптерећени на смицање, основни закључци се првенствено односе на носивост обичних и самонарезујућих завртњева у смичућим спојевима. Као најважније резултате који су произилазе из експериментално-теоријске анализе спроведене у оквиру овог рада треба издвојити следеће:

- Утврђени су основни видови лома који могу да се појаве код смичућих спојева танкозидних челичних елемената (лом смицањем завртњева, лом по нето пресеку, лом цепањем лима и лом кривљењем лима и пробијањем главе завртња). Такође су истакнути и фактори од којих зависи који ће се од наведених типова лома појавити;
- Констатовано је да се слични видови лома јављају и код веза са обичним и код веза са самонарезујућим завртњевима;
- Дате су препоруке за одређивање носивости обичних и самонарезујућих завртњева на смицање, као и за носивост основног материјала на цепање у ивичној зони. Такође су дате препоруке за прорачун граничне носивости на кривљење лима и пробијање главе завртња код веза на преклоп са обичним завртњевима;
- Утврђено је да носивост основног материјала на цепање не зависи од типа и величине спојног средства. Добијају се приближно исте вредности код веза са обичним и самонарезујућим завртњевима, што указује на економску оправданост мањих и јефтинијих самонарезујућих завртњева;
- Квалитет израде обичних завртњева је бољи од самонарезујућих, на шта указују знатно мање осцилације експерименталних резултата;
- Уобичајене величине завртњева које се користе за челичне конструкције у грађевинарству (минимум М12) нису рационалне за везе танкозидних челичних елемената;
- Имајући у виду релативно велики број испитаних узорка (30) одређена је поуздана карактеристична вредност носивости самонарезујућих завртњева пречника 6,3 mm на смицање;



- Констатовано је да примена преднапрегнутих високовредних завртњева није примерена код танкозидних челичних елемената због мале стезне дебљине и великих губитака силе преднапрезања;

Прорачунске вредности одређене на основу препорука датих у овом раду критички су поређене са експерименталним и нумеричким резултатима, али и са другим препорукама (првенствено са Еврокодом 3), и то у свим случајевима у којима оне постоје.

Поред тога у оквиру ове дисертације су систематизовани подаци и материјали који се односе на облике, димензије, квалитет материјала и израду обичних, високовредних и самонарезујућих завртњева.

Испитивања која су спроведена у другом делу овог рада који се односи на понашање и носивост самонарезујућих завртњева у спојевима оптерећеним на затезање су била знатно мањег обима. Она су послужила да се утврде модалитети лома код оваквих веза (лом затезањем завртњева, лом чупањем и лом пробијањем). Поред тога утврђено је од којих параметара зависе поменуте носивости, те који је вид лома највероватније меродаван за димензионисање. Такође је утврђена и носивост самонарезујућих завртњева пречника 6,3 mm на затезање, што је послужило за одређивање односа чврстоће на затезање и смицање материјала од кога су израђени.

Да би се омогућила масовнија примена специфичних механичких спојних средстава код танкозидних челичних конструкција неопходно је да се:

- донесу одговарајући домаћи прописи за прорачун танкозидних челичних елемената и њима одговарајућих спојних средстава, или да се, у духу хармонизације домаће техничке регулативе са европском, прихвати Еврокод 3 - Део 1.3, уз обавезну израду Националног документа за примену (НАД),
- омогући примена обичних завртњева мањег пречника (M8 и M10),
- уведе систем означавања квалитета, или, што је још боље, носивости самонарезујућих завртњева, на пример утискивањем ознаке на главу завртња, слично као што се код обичних завртњева означава класа чврстоће,
- приступи масовнијој едукацији студената, али и инжењера, како би се на неки начин фамилијаризовали са овим новим приступом прорачуна и обликовања веза код танкозидних челичних конструкција,
- наставе истраживања у овој области како би се употпунила сазнања и допуниле празнине које још увек постоје у постојећој међународној регулативи.

На научном пољу у неким даљим истраживањима треба посебно обратити пажњу на везе са јако малим ивичним растојањима, с обзиром да лом цепањем представља један од најчешћих видова лома. Такође, треба детаљније испитати везе оптерећене на затезање. Потребно је да се анализира више параметара, од којих је најважнији дебљина доњег, носећег лима, чијим варирањем се може утврдити оптимална вредност при којој су носивост на пробијање и чупање једнаке. Код оваквих веза је такође интересантно и понашање самонарезујућих завртњева у комплекту са заптивком и подлошком. Осим тога приликом одређивања смерница за нека будућа испитивања, свакако треба имати на уму и понашање самонарезујућих завртњева при истовременом дејству смицања и затезања, односно отпорност на интерактивно дејство.

## Литература

- [1] Australian Standard 1538 - 1974: SAA Cold-Formed Steel Structures Code, Standards Association of Australia, 1974.
- [2] Брчић В.: Отпорност материјала, Београд, 1989.
- [3] Буђевац Д., Марковић З., Богавац Д., Тошић Д.: Металне конструкције - Основе прорачуна и конструисања, Београд 1999.
- [4] Буђевац Д., Марковић З., Богавац Д., Тошић Д.: Металне конструкције - Специјална поглавља и технологија израде, Београд 1999.
- [5] Буђевац Д.: Прилог прорачуну и конструкцијском обликовању хладно обликованих профила отвореног попречног пресека, докторска дисертација, Београд, 1990.
- [6] BS 5950: Structural use of steelwork in building, Part 5. Code practice for design of cold formed sections, 1987.
- [7] Влајић Љ.: Понашање спојева са високовредним завртњевима при експлоатационом и граничном оптерећењу, докторска дисертација, Ниш, 1993.
- [8] Draft British standard BS 5950 Structural use of steelwork in building, Part 5. Code practice for design of cold formed sections, 1984.
- [9] Еврокод 3: Прорачун челичних конструкција, Део 1.1: Општа правила и правила за прорачун зграда, превод, Грађевински факултет Универзитета у Београду, 1995.
- [10] Evaluation of test results on connections in thin-walled sheetings and members in order to obtain strength functions and suitable model factors, Background Documentation Annex A, Chapter 8, Eurocode 3 Editorial Group, 1990.
- [11] Essentials of Eurocode 3 - Design Manual for Steel Structures in Building, ECCS publication N° 65, 1991.
- [12] Eurocode 3 Design of steel structures – Annex J: joints in buildings. Revised version, July 1994.
- [13] Eurocode 3 Design of steel structures - Appendix A: Cold Formed Steel Sheeting and Members, Revised version according to the Karlsruhe - meeting, March 1989.
- [14] Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1.1/A2: General rules and rules for buildings, October 1998.

- [15] Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1.1: General structural rules - 2<sup>nd</sup> draft 2<sup>nd</sup> revision, April 2001.
- [16] Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1.3: General rules - Supplementary rules for cold formed thin gauge members and sheeting, CEN, April 1996.
- [17] Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1.8: Design of joints - preliminary draft, July 2001.
- [18] European Recommendations for the Design of light Gauge Steel Members, ECCS - Technical Committee 7 - Working Group 7.1: Design of cold formed Steel Sheeting and Sections, 1987.
- [19] European Recommendations for the Design of Profiled Sheeting and Sections, Part 1 - Profiled Sheeting, ECCS - Technical Committee T7 - Working Group I, 1980.
- [20] European Recommendations for the Testing of Profiled Metal Sheets, Committee 17 - Cold Formed Thin- Walled Sheet Steel in Building, 1977.
- [21] Examples to Eurocode 3, ECCS publication N<sup>o</sup> 71, 1993.
- [22] Zadanfarrokh F., Bryan R.E.: Testing and Design of Bolted Connections in Cold - Formed Steel Sections, Elevent International Specialty Conference on Cold - Formed Steel Structures, 1992.
- [23] Зарић Б., Буђевац Д. Стипанић Б.: Челичне конструкције у грађевинарству, Београд, 1998.
- [24] ЈУС М.Б0.014: Метрички навој са троугластим ИСО профилем. Пресек, језгра, испитни пресек и угао завојнице за навоје са крупним и ситним кораком, 1977.
- [25] ЈУС М.Б1.021: Вијци и навртке за општу примену - Технички услови за израду и испоруку, 1974.
- [26] ЈУС М.Б1.023: Вијци са утврђеним особинама - Технички услови, 1983.
- [27] ЈУС М.Б1.025: Вијци за лим - Технички услови, 1983.
- [28] ЈУС М.Б1.029: Вијци и навртке - Толеранције мера, облика и положаја, 1978.
- [29] ЈУС М.Б1.066: Вијци са шестостраном широком главом за спојеве носећих челичних конструкција класе израде Б, 1982.
- [30] ЈУС М.Б1.068: Вијци са шестостраном главом за челичне конструкције, 1974.
- [31] ЈУС М.Б1.455: Вијци за лим са шестостраном главом, 1970.
- [32] ЈУС М.Б1.601: Шестостране навртке средње класе израде, 1965.
- [33] ЈУС М.Б2.015: Подлошке за вијке за челичне конструкције, 1974.
- [34] ЈУС М.Б2.030: Подлошке за вијке за високо преднапегнуте спојеве у челичним конструкцијама, 1970.
- [35] ЈУС Ц.Б9.020: Челици за цементацију - Технички прописи за израду и испоруку, 1989.

- [36] Kaltprofile Herausgegeben von der Beratungsstelle für Stahlverwendung in Zusammenarbeit mit dem Verein Deutscher Eisenhüttenleute, 3. Auflage, Verlag Stahleisen MBH - Düsseldorf, 1982.
- [37] Kojić M.: Computational procedures in inelastic analysis of solids and structures, Kragujevac, 1997.
- [38] Којић М.: Општи концепт имплицитне интеграције конститутивних релација при нееластичном деформисању материјала, Крагујевац, 1993.
- [39] Којић М., Славковић Р., Живковић М., Грујовић Н.: Метод коначних елемената 1 - Линеарна анализа, Крагујевац, 1998.
- [40] Recent Research and Developments in Cold-Formed Steel Design and Construction, Elevent International Specialty Conference on Cold - Formed Steel Structures, 1992.
- [41] Rhodes J., Walker A. C.: Thin Walled Structures - Recent technical advances and trends in design, research and construction, London, 1980.
- [42] Swedish Code for Light - Gauge Metal Structures, National Swedish Committee on Regulations for Steel Structures, Swedish Institut of Steel Construction, Publication 76, 1982.
- [43] Sedlacek G., Weynand K.: Connections of thin walled members, Aachen, 1994.
- [44] Секуловић М.: Метод коначних елемената, Београд, 1988.
- [45] Секуловић М.: Матрична анализа конструкција, Броград, 1991.
- [46] Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members, American Iron and Steel Institute, 1980.
- [47] Toma A.W., Nicolaas T.: Design Tools and New Applications of Cold-Formed Steel in Buildings Final report of WP 2.2 New connection methods, TNO, 2000.
- [48] Хајдин Н.: Теорија површинских носача, Београд, 1989.
- [49] Hancock J. G.: Design of Cold - Formed Steel Structures (to Australian Standard AS 1538-1988), Australian Institute of Steel Structures, 1988.
- [50] Челични материјали 2 - Конструкциони челици за општу употребу у стројоградњи, Загреб, 1978.
- [51] Zulassungbescheid - Verbindungselemente zur Verwendung bei Konstruktionen mit Profilatfeln aus Stahlblech, IFBS, 1988.
- [52] Winterfeld R.: Konstruieren mit Sthalleichtprofilen, VEB Deutcher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 1974.
- [53] Yu W. W.: Cold-Formed Steel Design, New York, 1985.





