



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Мастер академске студије

Модул: Машинске конструкције и механизација

Предмет: Транспортни уређаји и машине

Број индекса: 319/2010

Ненад Д. Петровић

**Анализа заморне чврстоће заварених
спојева транспортних машина и уређаја
мастер рад**

Комисија за преглед и одбрану:

1. Др Радован Славковић- ментор

2. _____

3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____

У оквиру овог мастер рада кандидат треба да

У оквиру овог рада је потребно обрадити анализу заморне чврстоће заварених спојева на примерима транспортних машина и уређаја. Објаснити основе заварених спојева као и основе теорије замора. Извршити поређења анализа спојних места различитим приступима коришћењем методе коначних елемената. Извршити анализу заварених спојева конкретних примера дела кућишта витла и вагона за превоз контејнера. Резултате анализа дати у табеларној и графичкој форми.

Препоручена литература:

- [1] Марјановић Н., Методе конструисања, Машински факултет у Крагујевцу, Крагујевац, 1999;
- [2] Јовичић Г., Живковић М., Вуловић С., Прорачунска механика лома и замора, Машински факултет у Крагујевцу, Крагујевац, (2011).

Крагујевац, 2012

ментор:

Dr Radovan Slavković ментора

Acknowledgements

It is a deep relief and satisfaction that I have completed this master thesis as part of my academic requirements. Results presented herewith would not have been possible without the contributions and encouragements of many of the people around me.

Therefore I seize the present occasion to convey my gratefulness to my thesis mentor professor Radovan Slavković PhD for giving me the opportunity to undertake this thesis work in cooperation with the Department of Applied Mechanics and Automatic Control and the Laboratory for Engineering Software.

It was also a delight to work with the staff at RAPP Zastava, RAPP Hydema US, and RAPP Hydra PRO from whom I got permission to work on their research subject. My credits go to my colleague Simić Boban for providing me with the 3D model and loading information of the winch used in this thesis.

All my thanks go RAPP Marine Group management and staff who enabled me to see the practical aspects of the thesis while completing an internship at their company.

It was a pleasure to work with Mr. Dan Marković, head engineer at RAPP Hydema US, from whom I got tremendous support during the internship.

A special thanks go to my academic supervisor, Miroslav Zivković PhD and to Vladimir Milovanović, who gave me all the support during my course program and agreed to supervise my thesis work.

I would like to dedicate this thesis work to my parents, and all those I love who do not cease to motivate me in my academic career even being far away from me.

Анализа заморне чврстоће заварених спојева транспортних машина и уређаја

РЕЗИМЕ

У оквиру овог рада је обрађена анализа заморне чврстоће заварених спојева на примерима транспортних машина и уређаја. Објашњене су основе заварених спојева као и основе теорије замора. Извршено је поређење анализа спојних места различитим приступима коришћењем методе коначних елемената. На основним примерима је извршена анализа коришћењем једног од испитиваних приступа моделирања. Извршена је анализа заварених спојева конкретних примера дела кућишта витла и вагона за превоз контејнера. Резултати анализа су дати у табеларној и графичкој форми.

Fatigue strength analysis of welded joints on transport devices and machinery

ABSTRACT

Within this thesis work, the fatigue strength analysis of welded joints in the case of transport devices and machinery has been reviewed. The basics of weld joints as well as the theory of fatigue have been covered. A comparison of various analysis methods have been performed using finite element analysis. Analysis of basic examples weld seams is given using one of the methods of modeling weld seams. An analysis of weld seams was performed on a winch housing component as well as those of a container wagon. Results are shown in table and graph form.

Садржај

1 Увод.....	3
2 Појам завареног споја	4
2.1 Технологије заваривања	5
2.1.1 Класификација поступака заваривања	5
2.2 Типови заварених спојева	6
3 Најчешће коришћени стандарди	10
3.1 Еврокод 3	10
3.2 DIN 15018.....	11
3.3 DS 952	12
3.4 DNV	12
3.6 TSI и British Standard prEN 12663	13
4 Прорачун дозвољених напона и степена сигурности	14
4.1 Појам замора	14
4.2 Историјски преглед теорије замора	15
4.3 Замор заварених спојева	16
4.3.1 Прорачун динамичке чврстоће заварених спојева	16
4.3.2 Фактори који утичу на динамичку моћ ношења.....	17
4.3.2.1 Ток линија напона	18
4.3.2.2 Побољшање квалитета вара	18
4.3.2.3 Постављање оптерећења дуж шави	19
4.3.2.4 Постављање вара у области мањег напона	19
4.3.2.5 Анализа напона	20
4.3.2.6 Димензионисање	20
4.4 Теорија кумулативног оштећења	21
4.5 Експериментално одређивање Велерових крива	21
4.5.1 Одређивање динамичке чврстоће	21
4.5.2 Фактори који утичу на динамичку чврстоћу	23
4.6 Методе бројања циклуса	24

5 МКЕ моделирање заварених спојева.....	25
5.1 Метода коначних елемената.....	25
5.2 Кратак осврт на историју развоја МКЕ.....	25
5.3 Анализа МКЕ заварених спојева	26
5.3.1 Концепт процене заварених спојева (FEMFAT).....	27
5.3.2 Геометрија МКЕ заварених спојева спојева.....	31
5.4 Напони у завареним спојевима	33
6 Практични примери.....	36
6.1 Поређење метода нумеричке анализе и експерименталних података	36
6.2 Елементарни примери	42
6.3 Пример анализе десне стране кућишта конструкције витла TWS10030	54
6.4 Пример анализе	59
7 Закључак	63
Списак слика и табела и графика	64
Литература	66

1 Увод

Заваривање је данас најчешћа метода спајања металних конструкција. Индустриска примена заваривања је веома значајна. Већина структурно дизајнираних објеката и машина направљених не би биле изводљиве без модерних технологија заваривања.

Појава постепеног разарања материјала под дејством периодично променљивог оптерећења назива се замор и представља јадан од кључних проблема на који сваки конструктор мора да обрати пажњу у току развојног процеса конструкције.

Анализа замора заварених спојева игра велику улогу у препознавању критичних места и претпостављању животног циклуса до појаве прслине. Поред класичних прорачуна и метода израчунавања, све више се користе рачунарски програми и модерне нумеричке методе за прорачун и конструисање.

У оквиру овог рада је обрађена анализа заморне чврстоће заварених спојева. Објашњене су основе заварених спојева као и основе теорије замора. Циљ рада је упознавање и примена нумеричке методе анализе замора заварених спојева. Уједно, радом су упоређени различити приступи моделирања коначних елемената заварених спојева са резултатима испитивања физичког модела које је узето из наведене литературе. Коришћењем најповољнијег приступа извршена је анализа заварених спојева на основним примерима оптерећења упрошћених модела као и заварених спојева у реалним конструкцијама дела кућишта витла и вагона за превоз контејнера. Сви резултати су приказани у графичкој и табеларној форми.

2 Појам завареног споја

Заваривање је процес израде нераздвојивог споја успостављањем међу-атомских веза између делова који се заварују, при чему се појединачно или комбиновано користи топлотна или механичка енергија, и по потреби додатни материјал.

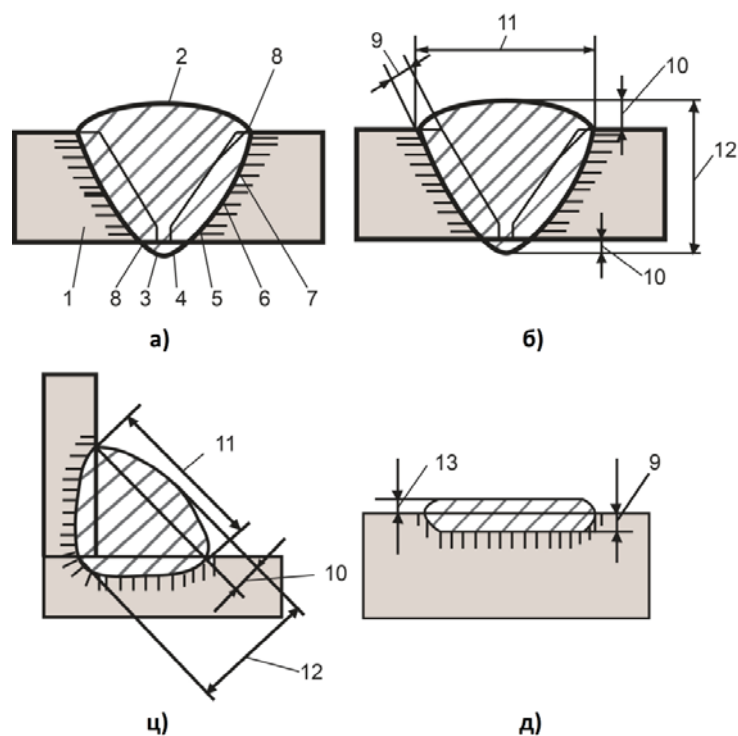
Заваривање се широко примењује за израду конструкција од полуфабриката и то:

- од ваљаних лимова за израду резервоара, бункера, комора, оплата, облога и слика
- од цевних и ваљаних профила за израду решеткастих носача, рамних конструкција, стубова, подупирача и слика
- за израду кућишта, ослонаца, машинских делова који се добијају спајањем главчине и венца (зупчаник, каишник, добош дизалице...).

Предности заваривања су: упрошћење конструкције, замена за ливење и ковање, лакше обликовање конструкције, смањење масе, повећање продуктивности аутоматизацијом, смањење трошкова и брзина реализације у производњи.

Недостаци заваривања су: локално загревање, одвија се поступно, промена структуре и механичких особина, могуће закаљивање, унутрашњи напони и деформације услед неравномерног загревања и хлађења, појава унутрашњих грешки, скупа термичка обрада, скупа контрола и скуп стручни кадар.

Под завареним спојем се подразумева конструктивна целина, слика 2.1, коју чине основни метал (1) и метал шава, или скраћено шав, код кога се разликују лице шава (2), наличје шава (3), корен шава (4) и ивица шава (8), слика 2.1а. Код поступака заваривања топљењем шав настаје очвршћивањем истопљеног основног и додатног метала, или само основног метала. Део основног метала, који се топи у процесу заваривања и улази у састав метала шава, зове се увар (5), чија је граница обележена са (6), слика 2.1а, а дубина са (9), слика 2.1б. Зона утицаја топлоте (ЗУТ), означена са (7) на слика 2.1а, је онај део основног метала, који је под утицајем загревања и хлађења претрпео извесне структурне промене, али испод солидус линије. На слици 2.1 приказане су и основне димензије шава: ширина (11), дебљина (12) и надвишење (10), и то за случај сучеоног, слика 2.1б, и угаоног споја, слика 2.1ц, као и за наварени слој, слика 2.1д, код кога је битна и његова дебљина (13) [1].



Слика 2.1 - Основни елементи завареног споја по JUS C.T3.001

2.1 Технологије заваривања

2.1.1 Класификација поступака заваривања

Поступци заваривања могу да се поделе на поступке топљењем и поступке притиском, при чему у прву групу спадају они поступци код којих се процес спајања одвија топљењем и очвршћивањем на месту споја, а у другу групу они поступци код којих се процес спајања одвија без топљења. Поступци заваривања се такође често деле према извору енергије: електрична (лук, отпор, сноп), хемијска (пламен, експлозив, термити), механичка (притисак, трење, ултразвук) и остале (нпр. светлост). Неке од других подела могу бити и према: намени (заваривање, наваривање, метализација), агрегатном стању (топљењем, притиском), врсти електрода (топљивом, нетопљивом, голом, обложеном, са језгром,...), заштити растопа (без заштитне атмосфере или у заштитној атмосфери-инертног, активног гаса), стању електричног лука (са отвореним, покривеним луком, ...), и слично.

У сваком случају поступци заваривања и спајања су дефинисани стандардом JUS C.T3.001, а њихова подела на 6 група (електролучно, електроотпорно, гасно, заваривање у чврстом стању, други поступци заваривања, лемљење) и начини означавања су дефинисани у стандарду JUS C.T3.012, табела 2.1 [2].

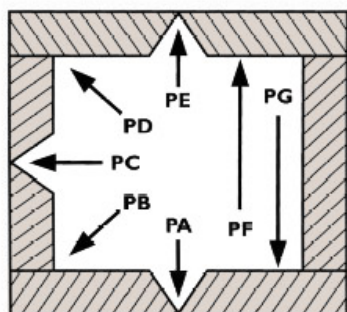
Табела 2.1- Класификација поступака заваривања

Електролучно заваривање:	Заваривање у чврстом стању:
Обложеном електродом – E	Ултразвуком
Пуњеном жицом	Трењем
Под прашком – EPP	Ковачко
Топљивом електродном жицом у заштити гаса	Експлозијом
Заштита у инертном гасу – MIG	Дифузијом
Заштита у активном гасу – MAG	На хладно
Нетопљивом електродом у заштити гаса:	Други поступци заваривања:
Инертни гас – TIG	Алуминотермитско
Плазмом	Електрично под троском – EPT
Магнетно електролучно ротирајућим луком	Индукционо
Електроотпорно заваривање:	Ласером
Тачкасто	Електронским снопом
Шавно	Тврдо лемљење:
Брадавичасто	У пећи
Сучеоно варничењем	Уроњавањем у соли
Сучеоно збијањем	Индукционо
Гасно заваривање:	Меко лемљење
Окси-ацетиленским пламеном	Заваривачко лемљење

2.2 Типови заварених спојева

Најпогоднији материјали за заваривање су: нискоугљенични челици са мање од 0,25% угљеника, нисколегирани челици са малим садржајем угљеника и високолегирани челици са већим процентом хрома и никла. Под одређеним условима могу се заваривати и друге врсте челика, сивог лива, месинга, бронзе, алуминијума, пластичних маса и др. Челици за заваривање – групе А, В, С, D и М, према JUS C.B0.050.

Постоје 4 основне класе заварених спојева остварених топљењем, при чему је класа I најфинија, а класа IV најгрубља. Стандардима су прописани услови остваривања и контроле заварених спојева као и дозвољена одступања за поједине класе квалитета. Постоје различите методе заваривања. Код заваривања топљењем основна подела заварених спојева је на: сучеоно, угаоне и преклопне (слика 2.2)[3].



- PA -Сучеоно - положен
- PB -Угаоно - положен
- PC -Хоризонтално - вертикалан
- PD -Угаоно - надглаван
- PE -Надглавно сучељан
- PF -Вертикалан нагоре
- PG -Вертикалан надоле

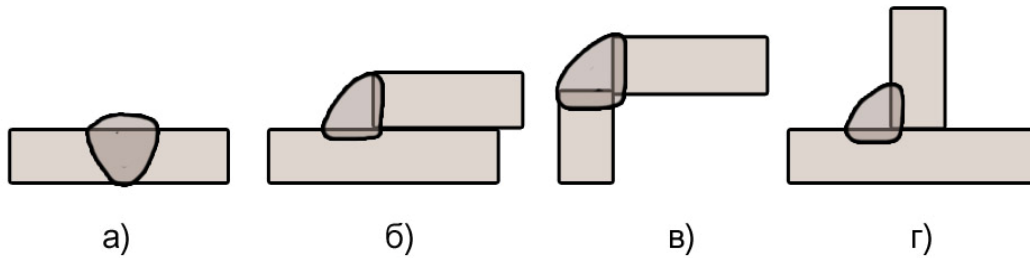
Слика 2.2 - Основни и нагнути положаји заваривања плоча и цеви

Пре заваривања потребно је припремити ивице основног метала, чиме се добија жлеб за заваривање. Облик и димензије жлеба су одређени стандардом (JUS C.ТЗ.030), а најчешће коришћени жлебови и изглед одговарајућег шаву су дати у табели 2.2.

Табела 2.2 - Облици најчешће коришћених жлебова и одговарајућих шавова

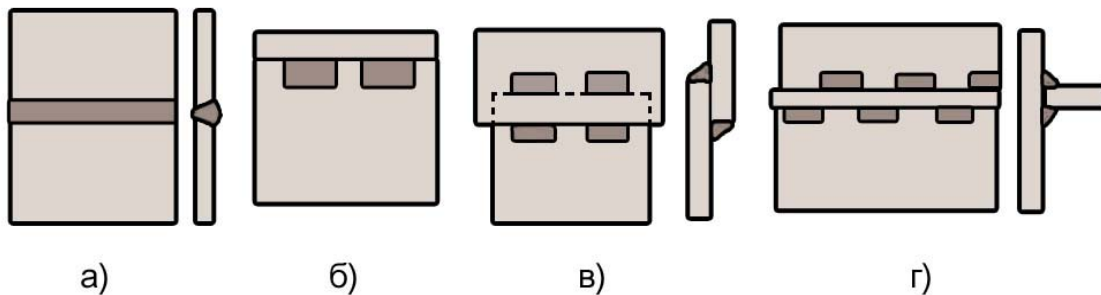
Назив	Изглед жљеба	Изглед шаву	Назив	Изглед жљеба	Изглед шаву
рубни			U		
I			J		
V			X		
HV			K		
Y			дупло U		

Зависно од међусобног положаја делова који се заварују, основне врсте заварених спојева су сучеоно, преклопни, ивични, Т спој, слика 2.3, а у зависности од положаја, заваривање може да се буде у хоризонталном, хоризонтално вертикалном, вертикалном и надглавном положају, слика 2.5. Положаји заваривања, који нису хоризонтални, зову се принудни.



Слика 2.3 - Основне врсте заварених спојева: а) сучеони, б) преклопни, в) ивични, г) Т спој

Према облику лица шава разликују се равни, удубљени и испупчени шавови, а према континуитету шавови се деле на непрекидне, слика 2.4а и испрекидани, слика 2.4б, који могу да буду симетрични, слика 2.4в, или несиметрични, слика 2.4г [3].

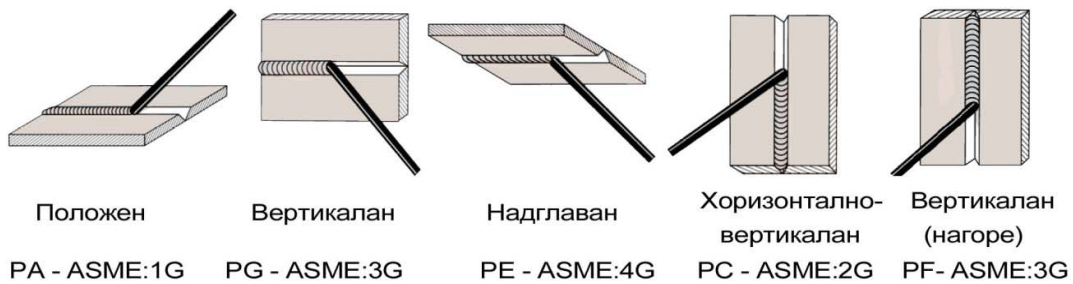


Слика 2.4- Подела шавова по континуитету: а) непрекидни, б) испрекидани, в) симетрично, г) несиметрично

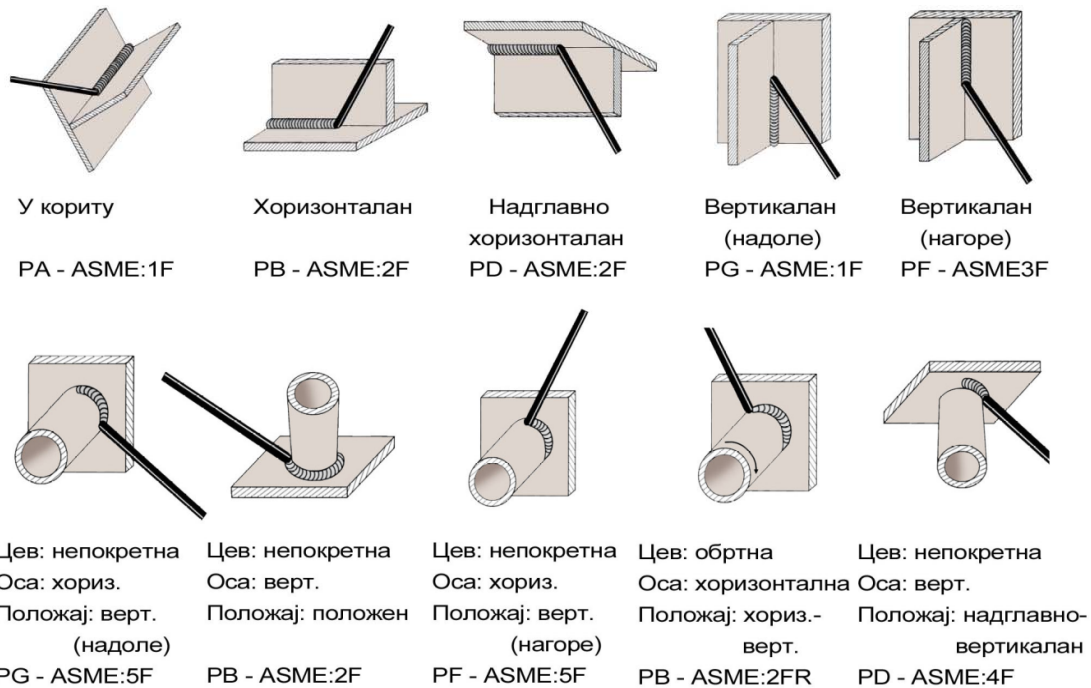
Мере о којима треба водити рачуна при конструисању заварених спојева:

- Обезбеђивање приступа споју
- Избегавање нагомилавања заварених маса
- Спајање зидова различитих дебљина
- Постављање делова при заваривању
- Деловање оптерећења на заварене спојеве
- Избегавање утицаја корозије на заварене спојеве
- Смањење обима заваривања

Сучеони спојеви



Угаони спојеви



Слика 2.5 - Положаји заваривања – сучеони и угаони, за плоче и цеви

3 Најчешће коришћени стандарди

Стандард је документ утврђен консензусом и донет од признатог тела којим се за општу и вишекратну употребу утврђују правила, смернице или карактеристике за активности или њихове резултате ради постизања оптималног нивоа уређености у одређеној области[4].

Тренутно постоји велики број различитих правилника и регулација за утврђивање заморног века заварених спојева. Метода нормалног напона је најчешће коришћена у даље наведеним стандардима. Прорачун се заснива на подацима, процедури и алгоритмима из специјализоване литературе и стандарда AWS, AISC, ANSI, EN, ISO, DIN, DNV, DS, TSI и други. У наредним поглављима су наведени најзаступљенији стандарди у индустрији.

3.1 Еврокод 3

Еврокод 3 (Eurocode 3) [5] даје општу методу за анализу замора челичних конструкција њихових елемената који су изложени понављајућим осцилацијама напона. Главне одредбе Еврокода 3 се ослањају на скуп кривих замора (S-N криве), равномерно распоређених, на коме је скуп конструкцијских детаља класификован. S-N криве имају константан нагиб од $m=3$ (за нормални напон) или $m=5$ (за смичући напон, шупље пресеке спојева и неке специфичне детаље). Нагиб од $m=3$ се мења при $5 \cdot 10^6$ циклуса оптерећења на $m=5$ и амплитуда напона испод границе при 10^8 циклуса се занемарује.

Процена се може извести коришћењем номиналних напона или према концепту концентрације геометријских напона (такође познатом као „hot spot stress“ метода). За заварене спојеве напонске компоненте везане за правац се користе за рачунање еквивалентни напон σ_w и τ_w респективно (једначине 3.1 и 3.2).

$$\sigma_w = \sqrt{\sigma_{\perp}^2 + \tau_{\perp}^2} \quad (3.1)$$

$$\tau_w = \tau_{\parallel} \quad (3.2)$$

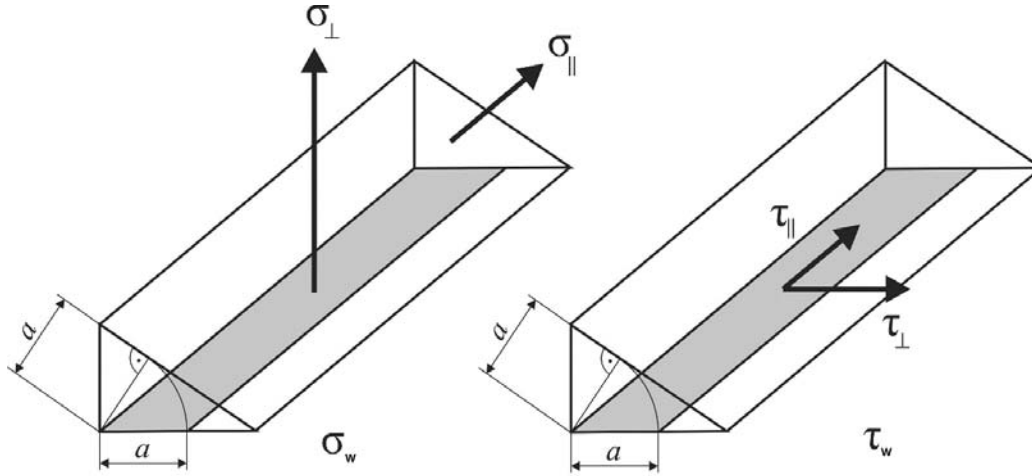
На слици 3.1 су приказане наведене компоненте:

$\sigma_{\perp}$ - компонента нормалног напона управна на шав;

$\tau_{\perp}$ - компонента смичућег напона управна на шав;

$\tau_{\parallel}$ - компонента смичућег напона паралелна шаву.

За вишеосно напрезање нормални напон и смичући напон се засебно посматрају коришћењем линеарне акумулације оштећења према Палмгрен/Мајнеру (Palmgren/Miner) у комбинацији са једним или два нагиба S/N кривих.



Слика 3.1 – Компоненте еквивалентних напона

Класификација историја напрезања се врши коришћењем кишне (rainflow) или акумулационе методе бројања.

3.2 DIN 15018

Немачки стандард (DIN - Deutsches Institut für Normung) за производњу кранова DIN 15018 [6] дефинише дозвољени заморни напон $\sigma_{D,perm}(R = -1)$ за St 37 и St 53-3 у зависности од категорије споја и класе оптерећења. Утицај средњег напона се разматра увођењем односа напона $R = \sigma_i / \sigma_y$ доње вредности напона σ_i и горње вредности напона σ_y . Тако да може добити $\sigma_{D,perm}(R)$ за одређену категорију споја, класу оптерећења и средњег напона (одговарајуће вредности R). Еквивалентни напон и степен сигурности су дати изразима (3.3) и (3.4).

$$\frac{\sigma_{a,ekv}}{\sigma_{A,ekv}} = \sqrt{\left[\left(\frac{\sigma_{a,\parallel}}{\sigma_{A,\parallel}} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{a,\perp}}{\sigma_{A,\perp}} \right)^2 - \left(\frac{\sigma_{a,\parallel}}{\sigma_{A,\parallel}} \right) \cdot \left(\frac{\sigma_{a,\perp}}{\sigma_{A,\perp}} \right) + \left(\frac{\tau_{a,\parallel}}{\tau_{A,\parallel}} \right)^2 \right]} \quad (3.3)$$

$$\frac{1}{S} = \sqrt{\left(\frac{1}{S_{\perp}} \right)^2 + \left(\frac{1}{S_{\parallel}} \right)^2 - sig(\sigma_{\perp} \cdot \sigma_{\parallel}) \left(\frac{1}{S_{\perp} \cdot S_{\parallel}} \right) + \left(\frac{1}{S_{\tau}} \right)^2} \quad (3.4)$$

Потврда заморне чврстоће се врши провером израза (3.3) који је сличан Вон Мизесовом (Von Mises) напону.

$$\left(\frac{\sigma_x}{\sigma_{xD,perm}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_y}{\sigma_{yD,perm}}\right)^2 - \left(\frac{\sigma_x \cdot \sigma_y}{\sigma_{xD,perm} \cdot \sigma_{yD,perm}}\right)^2 + \left(\frac{\tau}{\tau_{D,perm}}\right)^2 \leq 1,1. \quad (3.5)$$

Где су:

σ_x, σ_y	- компонента нормалног напона у правцу x и y ;
$\sigma_{xD,perm}, \sigma_{yD,perm}$	- дозвољени нормални напон који се односи на σ_x, σ_y ;
τ	- рачунски напон на смицање;
$\tau_{D,perm}$	- компонента смичућег напона паралелна шаву.

Велика предност овог стандарда је што даје велику тачност и веома је лако применити га у програмском језику.

3.3 DS 952

Немачки стандард за железничка возила DS 952 [7] даје дијаграме за горњи дозвољени напон и напон смицања у односу на однос напона R . Сваки дијаграм има другачију криву за неколико категорија зареза. Овако се може доћи до заморне чврстоће у зависности од категорије зареза и средњег напона. Дијаграми су дати за заварене спојеве наведених материјала: St 37, St 52-3, AlMg3, AlMgMn, AlMg4.5Mn, AlMgSi1, AlZnMg1.

Највећи напон у завареном споју σ_{max} или τ_{max} се требају установити и максимални напон мора имати мању вредност од дозвољене из дијаграма. DS 952 и DIN 15018 имају сличну осетљивост средњег напона при ниским средњим напонима, али високу променљиву одређеност при високим средњим напонима. DS 952 стандард рачуна високе вредности средњег напона веома конзервативно у поређењу са DIN 15018 стандардом.

3.4 DNV

DNV стандард [8] се служи смерницама из BV правилника (Bureau Veritas). У њему се користи приступ напона у завареном споју за бродске конструкције. Ова метода је прикладна за бродске конструкције јер оне садрже мноштво различитих детаља код којих метода класификације може бити отежавајућа при прорачуну. Тако да се концепт једне заједничке референтне криве и детаљни прорачун напона у шаву примењује. Разлог за избор напона у завареном споју уместо концепта геометријског

напона се осликава у жељи да се нагласе добра производна процедура (процедура заваривања) и израда.

3.6 TSI и British Standard prEN 12663

TSI стандард [9] дефинише случајеве оптерећења приликом испитивања теретних вагона. Одељак 4.2.2.3.1 овог стандарда дефинише све типове оптерећења које вагонска конструкција мора да издржи, а у складу су са захтевима из одељка 3, British Standard prEN 12663. Дефинисано овим стандардима вагонска конструкција мора да задовољи све врсте статичких оптерећења: хоризонтално оптерећење, вертикално оптерећење, комбинације најнеповољнијих случајева хоризонталних и вертикалних оптерећења и различите случајеве подизања на крају вагона, као и подизање целог вагона на местима предвиђеним за подизање.

При прорачуну динамичке чврстоће теретних вагона услед вертикалног оптерећења, у складу са TSI стандардом - Анекс CC и British Standard - prEN 12663, динамичко оптерећење се узима у опсегу $\pm 30\%$ вертикалног статичког оптерећења[10].

4 Прорачун дозвољених напона и степена сигурности

Приликом процене животног века у односу на замор, важно је обезбедити да су случајеви оптерећења репрезентативни намењеној апликацији и да их приказују на начин који је у складу са стандардом. Све релативне смернице при тумачењу изабраног стандарда је неопходно пратити.

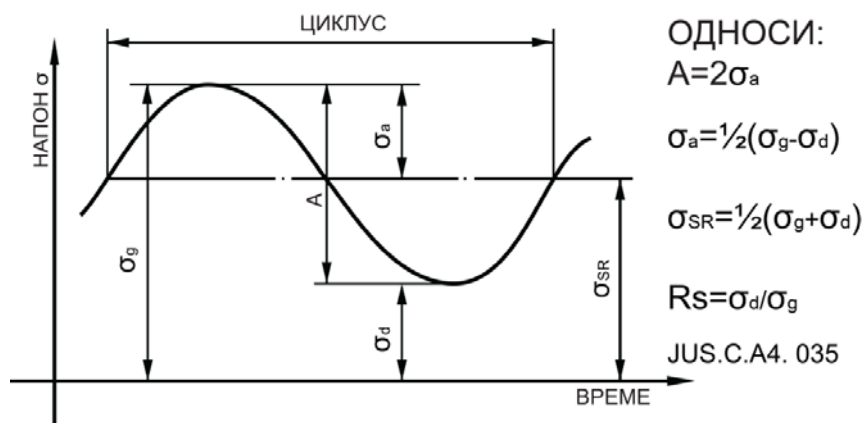
4.1 Појам замора

Замор материјала представља процес постепеног разарања путем настанка и развитка прскотине до лома дела у експлоатацији под дејством променљивог оптерећења. Сва варирајућа и понављана оптерећења у конструкцији се називају заморна оптерећења [11].

Основне одлике процеса замора су:

- Да се одиграва при променљивим оптерећењима која су знатно нижа од статичких оптерећења;
- Да у највећем броју случајева у насталом лому нема видљивих знакова пластичне деформације;
- Оштрији и обично непредвидљиви утицај на чврстоћу услед неравномерности структуре, зареза, корозионог дејства, заосталих напона и др.

У циљу одређивања осетљивости метала на замор изводе се испитивања силом променљиве вредности, при чему се одређује најмањи променљиви напон при коме појава замора неће настати. Сила променљиве вредности дефинише се према синусоидном закону промене (слика 4.1).



Слика 4.1 – Синусоидна промена напона у односу на време

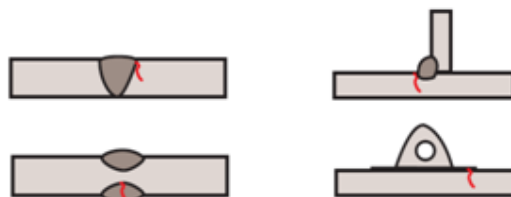
4.2 Историјски преглед теорије замора

Замор материјала је и даље само делимично истражен. Шта је данас познато изучено је и развијено корак по корак и постало веома комплексно. Термин „замор“ је уведен четрдесетих и педесетих година XIX века да би се објаснио отказ који се јавља услед поновљених оптерећења. У Немачкој убрзо после тога Август Велер (August Wöhler) је извео мноштво лабораторијских испитивања замора под условима поновних оптерећења. Ови експерименти су се бавили отказима вагонских осовина и сматрају се за прво систематско испитивање замора. Коришћењем дијаграма напона према веку трајања (S-N) он је доказао да се заморни век трајања смањује са повећањем амплитуде напона и да испод одређене амплитуде испитивани делови нису отказивали. Тиме је Велер представио концепт S-N дијаграма и границе замора. Истакао је да је, за замор, распон напона важнији од максималне вредности напона. Током шездесетих и деведесетих година XIX века додатна истраживања су потврдила и проширила Велерову теорију. Гербер и остали су испитивали утицај средњег напона. Њихова имена се и даље везују за дијаграме везане за променљиви напон и напон средње вредности.

1924. године Палмагрен је развио линеарни кумулативни модел оштећења за оптерећења променљиве амплитуде и основао коришћење B10 заморног века заснованог на статистичким подацима за кугличне лежајеве. Током 1929/1930 Хајг (Haigh) представља рационално објашњење разлике у реакцији челика са великом затезном чврстоћом и умереним челиком на замор где су присутни спојеви. Употребљив је концепт анализе деформације споја и заосталих напона, који су даље развијени од стране других. Године 1937. Неубер (Neuber) представља градијент ефекат напона на спојевима и концепт елементарног блока, који каже да је просечан напон на малој запремини у корену споја важнији од максималне вредности напона у споју. Мајнер (Miner) је, 1945, формулисао критеријуме оштећења услед линеарног кумулативног замора предложеног од стране Палмгрена 1924. Овај критеријум је сада познат као Палмгрен-Мајнеров закон (Palmgren-Miner law) линеарног оштећења, који налази екстензивну примену у пројектовању замора и упркос његовим недостацима остаје важна алатка у предвиђању заморног века.

4.3 Замор заварених спојева

Замор је узрок за 80-90% свих отказа инжењерских производа. Изазива појаве пукотина при разним оптерећењима нижим од границе течења материјала. Заморна оптерећења изазивају пукотине у ослабљеним деловима конструкције, који су углавном заварени спојеви, термички сечене ивице и остали дефекти у структури. Ако је заморно оптерећење веће од динамичке чврстоће долази до отказа. Примери места најчешће појаве заморних прслина које воде до отказа код заварених спојева су дати на слици 4.1.



Слика 4.2 – Места појаве заморних прслина

4.3.1 Прорачун динамичке чврстоће заварених спојева

Динамичка издржљивост завареног споја при циклично променљивим напонима знатно је мања од динамичке издржљивости основног материјала. Редукована динамичка издржљивост завареног споја:

$$\sigma_{Dr} = k_1 k_2 k_3 k_0 \sigma_{D0}. \quad (4.1)$$

- k_1 - Фактор облика и типа завареног споја. Зависи од облика и типа споја и врсте напрезања;
 k_2 - Фактор квалитета заваривања:
 - I класа 0,95;
 - II класа 0,8-0,9;
 - III класа 0,6-0,75;
 - IV класа 0,5-0,6;
 k_3 - Фактор напонског стања $1/\beta_k$;
 k_0 - Фактор осталих услова;
 σ_{D0} - Дозвољени напон.

Динамички степен сигурности завареног споја:

$$S_{Dz} = \sigma_{Dr} / \sigma_g. \quad (4.2)$$

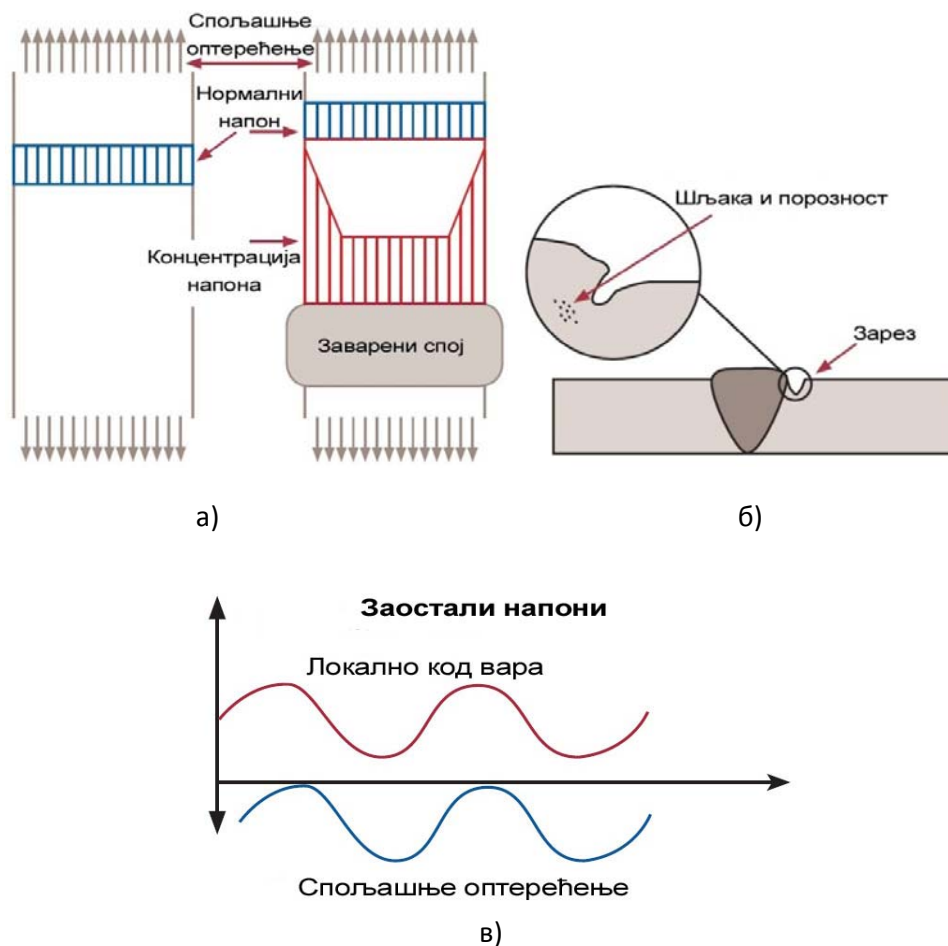
Препоручене вредности степена сигурности се крећу од 1,25 до 1,5. Ако утицајни фактори нису довољно тачно одређени може се повећати и до 2,5 [12].

4.3.2 Фактори који утичу на динамичку моћ ношења

Заварени спојеви углавном имају малу динамичку чврстоћу. У пракси, време до лома услед замора конструкције зависи од динамичке чврстоће. Фактори који утичу на динамичку чврстоћу заварених спојева су:

- а) концентрације напона
- б) дефекти унутар вара
- в) заостали напони

Заварени спој изазива концентрацију напона. У околини завареног споја, напони су вишеструки у односу на нормални напон у плочи (слика 4.2а). Услед процеса заваривања се јављају дефекти у завареном споју као што су зарези и микро укључци шљаке (слика 4.2б). Дефекти поспешују формирање заморних прслина слично пукотинама. Заварени спојеви проузрокују заостале напоне тако да материјал у зони утицаја топлоте је изложен већем напону од примењеног оптерећења (слика 4.2в).



Слика 4.3 – а) Концентрације напона, б) дефекти унутар споја, в) заостали напони

Динамичка чврстоћа се не повећава сразмерно са повећањем статичке чврстоће. Шест основних метода које се користе за повећање динамичке чврстоће заварених спојева у циљу искоришћења пуног потенцијала материјала су:

1. Ток линија напона
2. Побољшање квалитета вара
3. Постављање оптерећења дуж шавва
4. Постављање вара у области мањих напона
5. Анализа оптерећења
6. Димензионисање.

4.3.2.1 Ток линија напона

Глатки прелази око вара су битни јер обезбеђују смањење кривљења напонских линија па се стога и концентрација напона смањује. Нагле геометријске промене доводе до концентрација напона у местима која нису погодна за лоцирање вара. Дobar пример овога је када две плоче различитих дебљина треба заварити једну за другу. Слика 4.3 приказује два таква случаја код којег се на слици лево јавља већа концентрација напона, док се на слици десно због мањег кривљења напонских линија не јавља концентрација напона у споју.



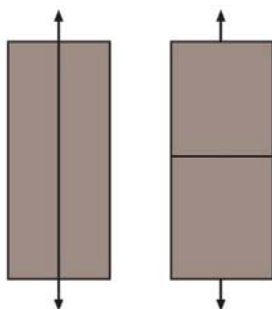
Слика 4.4 – Заварени спој две плоче различитих дебљина (лево) без растерећења и (десно) са глатким прелазом

4.3.2.2 Побољшање квалитета вара

Квалитет вара је од велике важности за динамичку чврстоћу заварених спојева. Такође је важно проверити квалитет завареног споја. Гладак ток линија напона код сучеоног шавва се остварује благом транзицијом између основног материјала и шавва. У случају угаоног споја корен вара може смањити динамичку чврстоћу и ако је чело вара квалитетно израђено.

4.3.2.3 Постављање оптерећења дуж шав

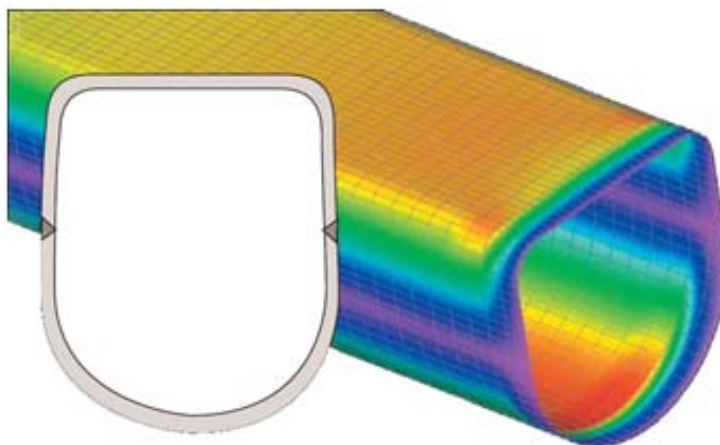
Динамичка чврстоћа завареног споја која је изложена уздужном оптерећењу је око 1,25 пута већа него када је оптерећење трансферзално у односу на шав (слика 4.4). Унутрашња напонска стања дуж вара су нижа а концентрације напона смањене при овој врсти оптерећења.



Слика 4.5 – *Случајеви постављања шав у односу на оптерећење, лево повољнији и десно неповољни*

4.3.2.4 Постављање вара у области мањег напона

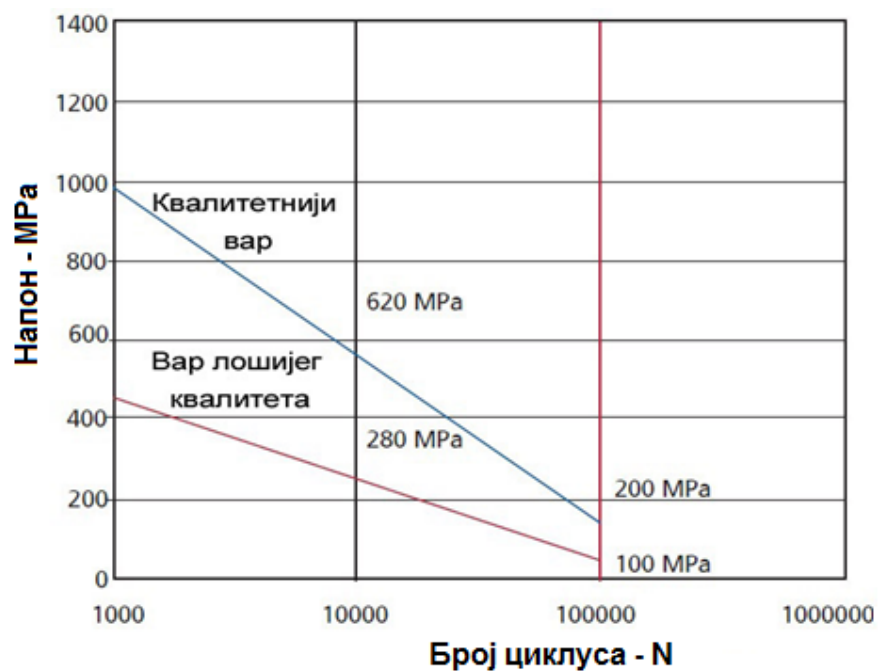
Погодан пример за постављање споја у области мањег напона је решетка крана изложена савијању. На слици 4.6 се види локација завареног споја у односу на прорачунато напонско стање. Дуж средњег дела пресека профила осцилације напона су ниске у односу на ивичне. Такође је препоручљиво постављање делова који нису носећи дуж средине рама у штаповима који су изложени савијању.



Слика 4.6 – *Постављање шав у области ниског оптерећења (у љубичастој зони)*

4.3.2.5 Анализа напона

Анализа напона представља проверу носивости конструкције током њеног пројектованог века трајања. Важни фактори за анализу су број циклуса оптерећења и опсег оптерећења. Вар лошијег квалитета у конструкцији са претпостављеним веком од 10 000 циклуса је могуће оптеретити до 100 МПа (слика 4.7, црвена крива), док ако је иста конструкција изложена на само 10 000 циклуса, заварени спој се може оптеретити до 280 МПа. Плава крива на слици 4.7 представља исте услове, само за заварени спој повишеног квалитета.



Слика 4.7 – Велерова крива у истим условима за два квалитета шавова, лошији (црвена крива) и квалитетнији (плава крива)

4.3.2.6 Димензионисање

Димензионисање је општи процес у којем се напони конструкције пореде са носивошћу материјала и сходно томе се врши одабир димензија. При промени пројектованог оптерећења циљ је налажење слабих тачака у конструкцији и ојачавање тих делова ако не задовољавају потребну носивост или побољшане методе заваривања, док се код слабије оптерећених области могу смањити дебљине плоча [12].

4.4 Теорија кумулативног оштећења

За циклична оптерећења са различитим амплитудама (multiple cycles with variable amplitudes) оштећење од замора може да се одреди сумирањем, користећи Палмгрен-Минерово правило (Palmgren-Miner Rule). На основу тог правила коефицијент оштећења од замора (fatiguedamage factor) D_{Ed} завареног споја, услед одговарајућих оптерећења на замор, треба да задовољи услов:

$$D_{Ed} = \sum_i \frac{n(\Delta\sigma_i)}{N(\Delta\sigma_i)} < 1. \quad (4.3)$$

Где је:

$n(\Delta\sigma_i)$ - број циклуса са варијацијом напона $\Delta\sigma_i$ којима је елемент био изложен

$N(\Delta\sigma_i)$ - број циклуса до лома за варијацију напона $\Delta\sigma_i$ [13].

4.5 Експериментално одређивање Велерових крива

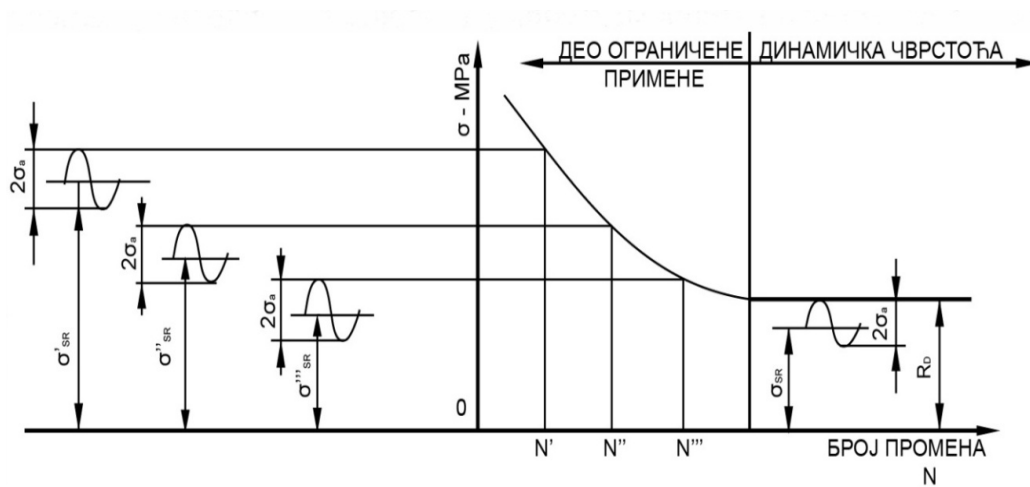
4.5.1 Одређивање динамичке чврстоће

При испитивању силом променљиве вредности користе се 8-10 епрувета оптерећене различитим спољним променљивим оптерећењима и испитују до лома услед замора. Резултати испитивања сређују се у дијаграм (слика 4.8) који се назива Велеров дијаграм (Wöhler diagram). Прва епрувета излаже се променљивом напону који је одређен изабраним средњим σ_{SR} и амплитудним напоном σ_a , при чему σ_g има вредност испод вредности затезне чврстоће R_m . Лом услед замора при том оптерећењу настаје после N' промена циклуса.

Друга епрувета излаже се променљивом напону који је мањи од напона код прве епрувете, а одређен је изабраним средњим напоном (σ_{SR}) при непроменљивом амплитудном σ_a напону. Лом услед замора настаје после N'' промена циклуса.

На тај начин смањењем средњег напона на већем броју епрувета (постепено) добија се целокупан Велеров дијаграм.

Из Велеровог дијаграма, уочава се да променљиви напон при неком средњем напону σ_{SR} и амплитудном напону σ_a постаје асимптота неком напону R_D , који се назива динамичка чврстоћа. Другим речима, ако је променљиви напон нижи од динамичке чврстоће R_D неће настати лом услед замора [14].

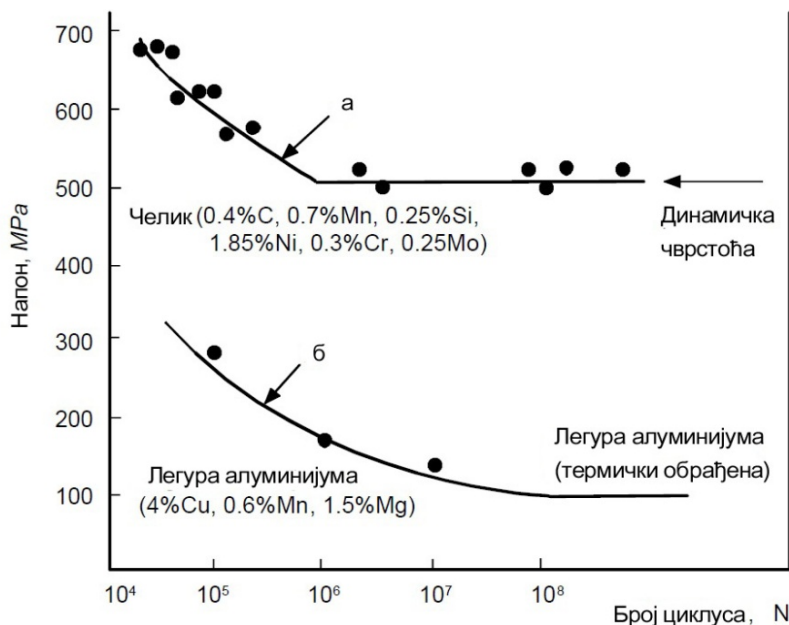


Слика 4.8 – Велерова дијаграм

Дијаграм динамичке издржљивости, Велерова крива (слика 4.8), се дели на два дела, део ограничене примене и део динамичке чврстоће.

R_D - Трајна динамичка чврстоћа при којој уопште не настаје лом при деловању променљивих оптерећења

R_{Dn} – Ограничена динамичка чврстоћа при којој не настаје лом при N циклуса промене делујућег оптерећења, што је значајно за ограничени век трајања елемената као нпр. у ваздухопловству. Између својстава чврстоће и способности деформације може се успоставити емпиријска веза [14].



Слика 4.9 – Велерова крива: а) за челик и б) за легуре алуминијума (Al-Cu)

4.5.2 Фактори који утичу на динамичку чврстоћу

На вредност динамичке чврстоће утичу многи фактори и њихов утицај је одређен бројним испитивањима. Легирајући елементи који се додају челицима, у циљу побољшавања својстава чврстоће, начелно побољшавају и динамичку чврстоћу. Присутне нечистоће и неметални укључци негативно утичу на динамичку чврстоћу и то у знатно већој мери од хемијског састава.

Посебно на смањење динамичке чврстоће утичу неметални укључци преко свог облика и димензија, а према неким теоријама они су главни узрочници замора материјала. Треба истаћи да њихов утицај зависи од природе самих укључака, односно њиховог понашања у току топле прераде, као и њиховог положаја и оријентисаности у односу на правац ваљања. Тако, јако су опасни укључци који се пластично деформишу и својим оштрим ивицама изазивају концентрацију напона, посебно код челика повећане чврстоће.

Термичка обрада утиче у знатној мери на побољшање динамичке чврстоће преко структуре. Најподеснија структура је ферит, која има највећи однос $R_m/R_D = 0,5$, а веома повољно утичу и ситне честице цементита добијене при бејнитном каљењу. Заостали аустенит утиче на смањење динамичке чврстоће, али тек при садржају преко 10%.

На појаву замора знатног утицаја има стање површинског слоја. Тако нпр. уклањањем површинског разугљениченог слоја у знатној мери се повећава динамичка чврстоћа, а такође динамичка чврстоћа расте ако се у току испитивања епрувета полира [14].

На динамичку чврстоћу утиче и начин прераде челика, па тако ковани челик у односу на ливени челик има знатно већу осетљивост на зарез.

Поред наведених фактора на вредност динамичке чврстоће утичу и други фактори:

- концентратори напона (радијуси заобљења, зарези итд),
- заостали унутрашњи напони,
- напонско стање,
- агресивност средине (електролитичка и гасна корозија),
- примењена учесталост промене спољњег оптерећења,
- ојачање површинског слоја,
- површинско каљење и др.

Врсте оптерећења утичу на фактор концентрације напона, па тако за исти номинални напон при затезању, савијању и увијању највећи је максимални напон при затезању, затим при савијању, па тек при увијању.

4.6 Методе бројања циклуса

Циљ свих метода бројања циклуса је да пореде утицаје временске промене варирајућих амплитудних оптерећења са подацима о замору и кривих добијених једноставним константним амплитудама циклуса оптерећења. Примена правила линеарног оштећења, $\sum \frac{n(\Delta\sigma_i)}{N(\Delta\sigma_i)} = 1$, захтева да услов средњег и амплитудног напона, са којим оштећење треба поредити, мора бити познат. Различите методе бројања могу променити резултујуће претпоставке по реду величине. Све добре методе бројања морају бројати циклус са распоном од највише до најниже тачке и мора бројати остале циклусе на начин који увећава распоне који се броје. Ово правило се може објаснити или претпостављањем да је оштећење функција хистерезиса или узимајући у обзир да су средње флукуације замора мањег значаја од целокупне разлике између екстремних вредности. Додатно, све добре методе бројања броје све делове сваког целокупног опсега само једанпут. Такође броје мање опсеге на ниже до неког претходно одређеног прага само једанпут. Примери ових метода су кишна метода (Rainflow method), опсежни пар (Range pair method) и други [15].

5 МКЕ моделирање заварених спојева

5.1 Метода коначних елемената

Основна идеја анализе методом коначних елемената је моделирање проблема подразумевајући да је просторни домен проблема подељен - дискретизован на поддомене на које се примењују општа знања и искуства из механике континуума и нумеричке математике. Поддомени о којима је реч терминолошки се означавају као коначни елементи. Анализа система спрегнутих коначних елемената, добијених дискретизацијом континуума, омогућава нумеричку симулацију одзива континуума на задате побуде. Физичке величине које су обухваћене моделом добијају се у дискретном облику, тј. у тачкама које произилазе из дискретизације. Ове тачке зову се чворне тачке или једноставно чворови.

На основу дискретизације физичког проблема, интерполирањем и увођењем интерполационих функција уз увођење природног (локалног) координатног система, успостављањем равнотежних једначина за елементе и за целокупну структуру, долази се до матрица елемената и система. Увођењем ограничења и сила које делују на систем у нумерички модел и решавањем се добијају померања тачака која представљају решење проблема. У даљем поступку се добијени резултати користе за анализу напрезања појединих делова (елемената) система [16].

5.2 Кратак осврт на историју развоја МКЕ

Метод коначних елемената (МКЕ) је данас најопштији нумерички метод, примењен у готово свим наукама, а посебно у инжењерским областима. Сматра се да је МКЕ метод, у поређењу са другим, имао највећи утицај на развој и домете техничких дисциплина у двадесетом веку. Велики број међународних часописа највишег нивоа, читава индустрија за развој софтвера на основима МКЕ, свакодневна примена МКЕ комерцијалних и специјалних програмских пакета у оквиру CAD система у свим индустријским гранама и интензивна научна истраживања у МКЕ, најкраће су илустрација претходне тврдње. У развијеним замљама МКЕ курсеви на редовним и постдипломским студијама на техничким факултетима су постали део општег образовања студената.

Основне карактеристике МКЕ које га доводе испред других метода се састоје у његовој општости (применљив је на области солида, флуида, провођења топлоте и уопште на проблеме поља физичких величина, као и на спрегнуте проблеме), применљивост на линеарне и нелинеарне проблеме, релативној једноставности у основним поставкама, као и погодности у погледу примене рачунара.

Развој МКЕ је директно везан за појаву рачунара, јер практична примена МКЕ, између осталог, подразумева решавање великих система алгебарских једначина, чији број даље иде на више десетина хиљада једначина. Основне идеје МКЕ појавиле су се у радовима Аргириса (Arguris and Kelsey (1954)), Тарнера (Turner и др. (1956)) и Клафа (Clough (1960)). Име „Коначни елемент“ први пут се појавио у раду Клафа (1960). Значајни допринос развоју МКЕ у раним шездесетим годинама дали су Аргирис (Arguris (1965)) и Зиенкиевич и Чеунг (Zienkiewicz and Cheung (1967)). Седамдесетих година започета је примена МКЕ на нелинеарне проблеме солида (конструкција), као и на друге области (механика флуида, провођење топлоте, електромагнетизам и др.)[17].

Предност методе коначних елемената су могућност анализе широког дијапазона проблема, уштеда времена и новца јер су промене модела и њихова поновна анализа знатно једноставније и јефтиније од измене и анализе прототипова. МКЕ има своје недостатке као и код сваке друге приближне нумеричке методе решење добијено МКЕ садржи одређену грешку. Величина грешке зависи од типа и величине и тачности модела коришћеног при анализи. Два најзначајнија фактора су знање и искуство аналитичара и софистицираност програма који се користи. МКЕ се користи за линеарну анализу где се уводи претпоставка о малим померањима и линеарно еластичном материјалу као и за нелинеарну анализу где се узима у обзир било ефекат геометријске нелинеарности било материјалне или оба истовремено [18].

5.3 Анализа МКЕ заварених спојева

Услед знатно ниже носивости заварених компонената под динамичким оптерећењима, процена напона у области шава је од посебног значаја. Свеобухватни стандарди и литературе нуде мноштво метода за процејну заморне чврстоће, углавном на основу нормалних напона, који класификују заварене спојеве у класу процене у складу са њиховом геометријом, типом вара и напона.

У индустријској примени, метода коначних елемената (МКЕ) је постала опште прихваћена метода анализе напона и расподеле деформација код сложених компоненти, укључујући и заварене конструкције као што су на пример шасије возила [16].

Током процене МКЕ заварених ентитета у вези са радним оптерећењем често се јављају тешкоће у примени класичних метода процене:

- Нема стандарда који могу уопштено да се примене за процену МКЕ резултата за заварене спојеве.
- Захтев за апсолутно прецизну идентификацију основног напона споја, који је критичан за понашање замора у шаву, је у супротности са економским и техничким могућностима које нуди целокупна структура МКЕ анализе и оптимизација.
- Различити модели (величине мреже заварених елемената) дају различите резултате напона у шаву.
- Комплексни шавови, геометрија и напонски услови морају бити сведени у упрошћене класе од стране корисника.

Коришћењем квалитативно и квантитативно високог садржаја информација за МКЕ резултате захтева много времена и појединачне конструктивне процене и често није изводљиво у случајевима комплексних, непропорционалних, спољних напона. Да би се решили горе наведени проблеми TZS је развио FEMFAT WELD софтвер, који је заснован на резултатима анализе коначних елемената уз употребу процена комплексних варова.

5.3.1 Концепт процене заварених спојева (FEMFAT)

Конципирање процене заварених спојева у програмском пакету FEMFAT се заснива на овим кључним проблемима:

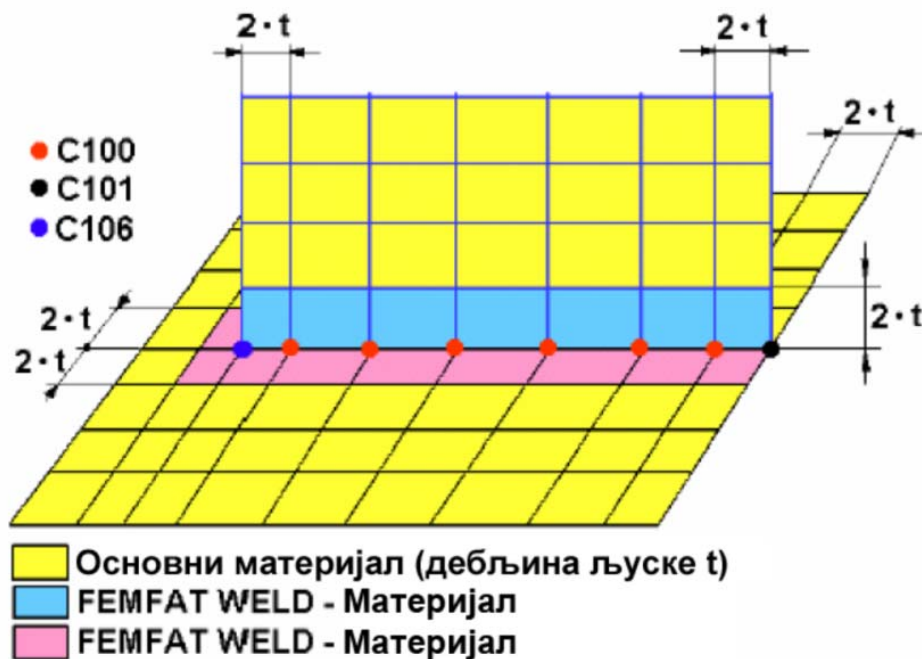
- Поступак моделирања коначних елемената љуске
- База података за факторе заварених спојева и S/N криве
- Препознавање и класификација свих локалних заварених области у комплетној структури
- Аутоматизована процена заснована на средњој вредности дисперзионог концепта према FKM (Forschungskuratorium Maschinenbau) [19].

За потребе овог мастер рада заварени спојеви су моделирани коришћењем МКЕ елемената љуске независно од типа завареног споја и положаја. Елементи у завареном споју су креирани према Femfat 4.4.1 методи. Кључне смернице за генерисање оваквих елемената су:

- Генерисање густе мреже у областима завареног споја како би се основни напони конструкције на месту спајања што тачније симулирали.
- Треба избегавати троугласте елементе због нереалног давања резултата.
- Елементи љуске суседни линији шави ће се даље наводити као елементи вара.

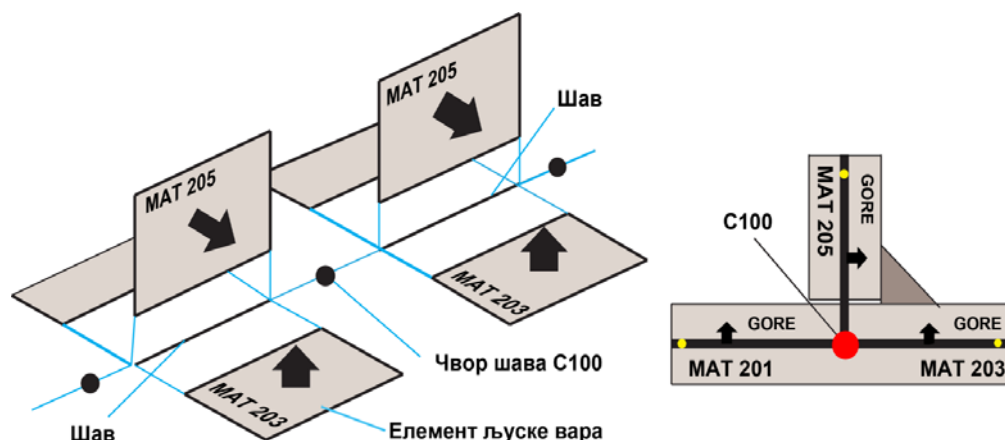
- Карактеристика материјала заварених елемената се задају специфичне ознаке материјала. Садржаји карактеристике материјала (нпр. Јангов модул) су идентични онима од суседних елемената љуске (основног материјала)
- Чворови суседни линији шава ће се у наредном наводити као чворови вара. Чворовима вара се задају специјални атрибути.
- Последњи чвор на линији шава је означен као крај шава.
- Елементи вара се морају дефинисати са величином елемента двоструко већом од дебљине плоче у околини почетка и краја шава ако се не користи аутоматска корекција напона.

При алокацији картона својстава материјала за заварене елементе (MAT 100-MAT499) обавезно је правилно оријентисати елементе љуске. Стрелице за оријентацију при моделирању приказују горњу страну (слика 5.2). Горња и доња страна заварених елемената се додељују као различити, једностранни фактор зареза од стране програма, на пример за случај завареног Т-споја. Тако, елементи вара увек имају задате картоне својстава материјала која се поклапа са информацијама о оријентацији елемената у смерницама за моделирање. Т- спој је приказан на сликама 5.1 и 5.2 као пример [19].



Слика 5.1 – Моделирање елемената вара на примеру Т-споја

Чворови вара су они чворови који су лоцирани на линији шава две или више спајаних плоча, оне представљају просторни ток шава. Њима су задате ознаке као просторне ознаке локалних координатних система. Ове ознаке FEMFAT користи како би разликовао чворове вара од чворова основног материјала. Табела 5.1 даје листу могућих ознака чворова вара [20].



Слика 5.2 – Моделирање оријентације елемената вара на примеру Т-споја

Основни чворови вара:

Разлика између основних и комбинованих чворова вара је у томе што се од основних чворова очекује да имају само један суседни елемент вара који припада само једном шаву и типу завареног споја према упутству за креирање модела. Предност основних чворова шава је у томе што се ток оптерећења према суседним елементима може узети у обзир и при анализи утицаја пукотине у корену и транзиционим зонама. При коришћењу основних чворова вара FEMFAT WELD проверава да само елементи љуске само једног споја и типа вара се могу граничити на чвору вара.

Комбиновани чворови вара:

Код овог типа чвора се не очекује да суседни елементи вара припадају само једном споју и једном типу вара, као што су места заварених конструкција на коме се различити типови заварених спојева спајају. За разлику од основних чворова вара, ток оптерећења у суседним елементима се не узима у обзир и модел вара се не проверава према ознакама материјала суседних елемената.

Почетак и крај шава

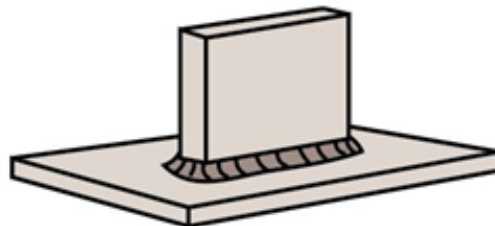
Почетак и крај шава се засебно посматрају због њиховог великог утицаја дуж осе шава. Почетак (C107 или C109) и крај (C102 или C105) затвореног (boxed) шава су препоручљиви због радне чврстоће у одосу на почетак (C106 или C108) и крај (C101 или C104) отвореног (non boxed) шава и сходно томе им је додељена друга боја. Изглед затвореног и отвореног шава дат је на слици 5.3.

Боје чворова који се најчешће користе у овом раду су дате у табели 5.1. Прорачун комбинованих чворова шава се врши у складу са DIN 15018. Иако се чворови C103 и C104 могу користити као комбиновани чворови, узима се на

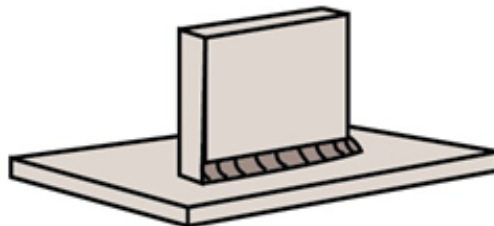
споју различитих типова заварених спојева чвор C103, приказано на слици 5.4 [19].

Табела 5.1 – Боје чворова шава и њихова значења

Боја чвора шава	Коришћена за
C100	Основни чвор шава
C101	Основни крај шава отворени
C102	Основни крај шава затворени
C103	Комбиновани чвор шава
C104	Комбиновани крај шава отворени
C105	Комбиновани крај шава затворени
C106	Основни почетак шава отворени
C107	Основни почетак шава затворени
C108	Комбиновани почетак шава отворени
C109	Комбиновани почетак шава затворени

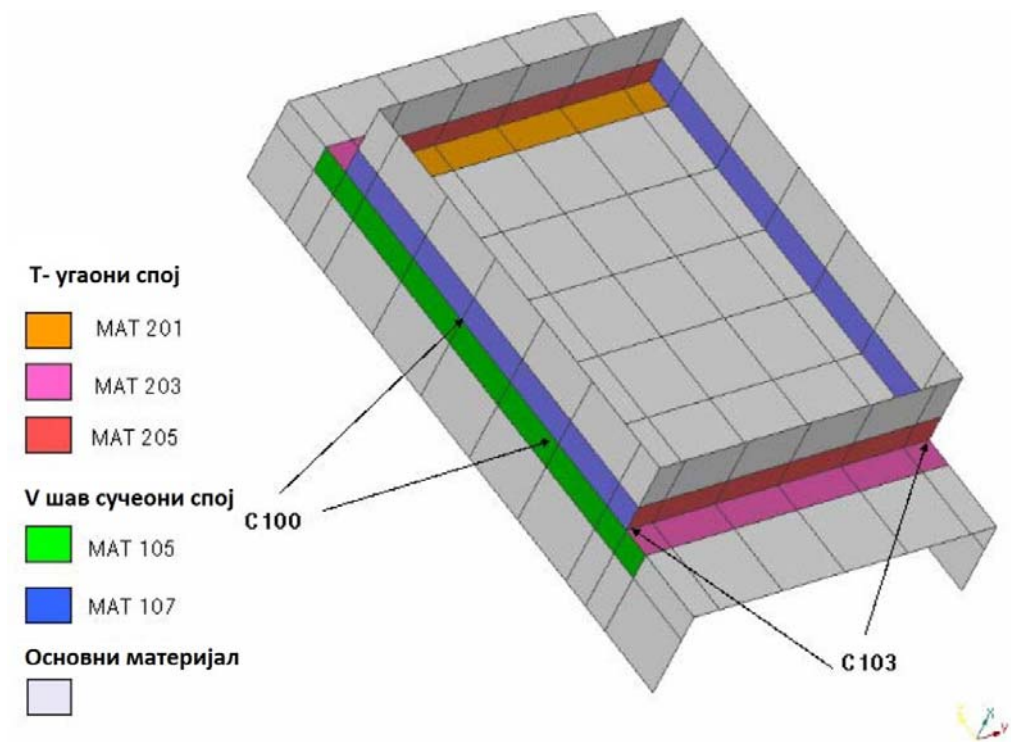


Затворен тип - Шав иде око ивица наварене плоче



Отворен тип - Шав се прекида код ивице плоче

Слика 5.3 – Типови шава: затворени (*boxed*) и отворени (*non boxed*)

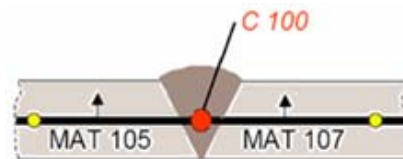


Слика 5.4 – Креирани МКЕ елементи комбинованих заварених спојева

5.3.2 Геометрија МКЕ заварених спојева спојева

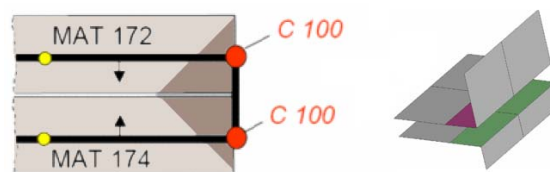
Најчешће коришћени типови заварених спојева у геометрији МКЕ и њихова оријентација елемената љуске за програмски пакет FEMFAT:

1. Сучеони спој са V шавом (слика 5.5)



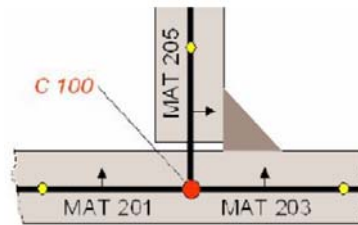
Слика 5.5 – Сучеони спој

2. Рубни са V шавом (слика 5.6)



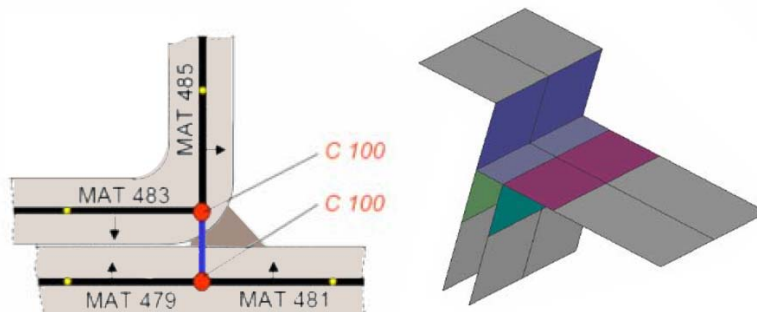
Слика 5.6 – Рубни спој

3. Т-спој са једностраним шавом (слика 5.7)



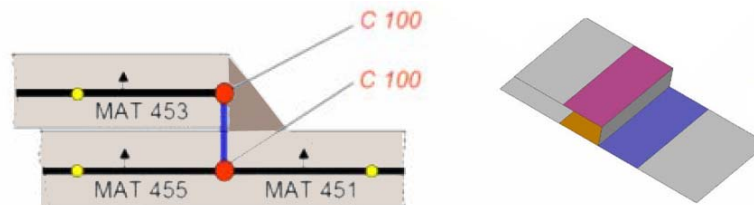
Слика 5.7 – Т-спој

4. Рубни Т-спој (слика 5.8)



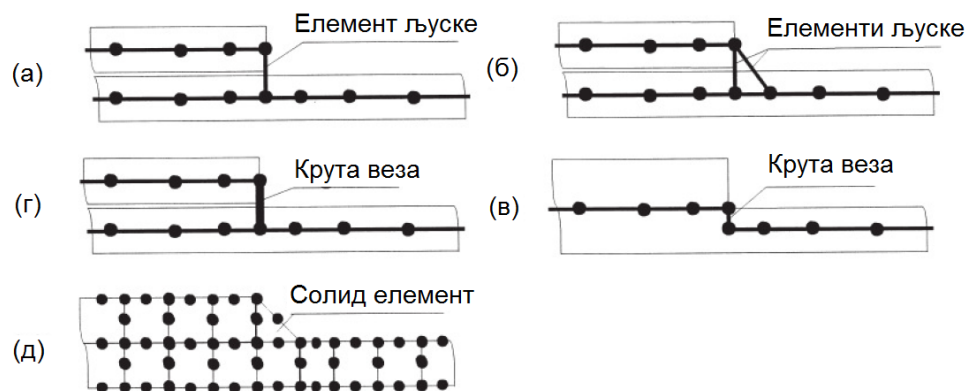
Слика 5.8 – Рубни Т-спој

5. Преклопни спој (слика 5.9)



Слика 5.9 – Преклопни спој

На слици 5.10 приказани су могући начини моделирања завареног споја МКЕ на примеру преклопног споја.



Слика 5.10 – Могући начини моделирања преклопног завареног споја

5.4 Напони у завареним спојевима

Аутоматска корекција напона

Активирањем „Аутоматске корекције напона“ долази до интерполације напона завареног споја и напона суседних елемената, пошто локални напони у завареном споју представљају основу за процену завареног споја, утицај величине елемената је смањен на минимум за процену оштећења вара. Стога утицај величине мреже елемената шава на процену оштећења је такође умањена. Процес се разликује за различите густине мреже. Уз аутоматску корекцију напона, напони у шаву или суседним елементима се не користе, већ уместо њих напон елемената који се налазе на одређеној дистанци од елемената шава. Ова тачка процене се бира тако да лежи приближно у транзиционој зони завареног споја. Растојање од тачке процене до елемената шава се рачуна следећом једначином:

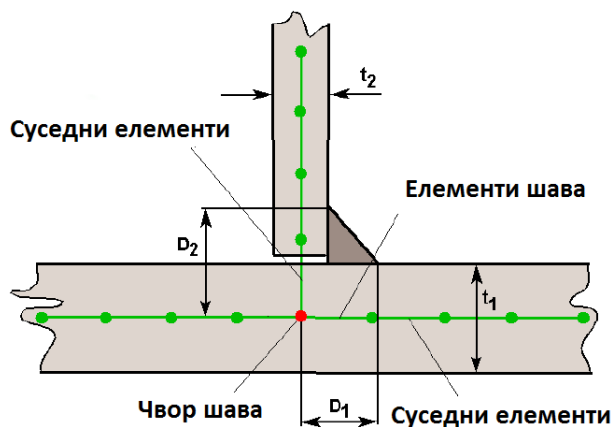
$$D_{BEUPKT} = f_{ele} \cdot (0,5 \cdot t_{Neighbor} + t_{min}) \quad (5.1)$$

f_{ele} - фактор дебљине плоче;

$t_{Neighbor}$ - дебљина плоче околних елемената (ако постоји), иначе =0;

t_{min} - минимална дебљина плоче на споју.

На следећем примеру се види како се одређује растојање тачке процене у случају Т-споја (слика 5.11).



Слика 5.11 – Пример Т-споја

Растојање до тачака процене D_1 и D_2 се рачунају на следећи начин:

$$D_1 = f_{ele} \cdot (0,5 \cdot t_{Neighbor} + t_{min}) = 1 \cdot (0,5 \cdot t_2 + t_2). \quad (5.2)$$

$$D_2 = f_{ele} \cdot (0,5 \cdot t_{Neighbor} + t_{min}) = 1 \cdot (0,5 \cdot t_1 + t_2). \quad (5.3)$$

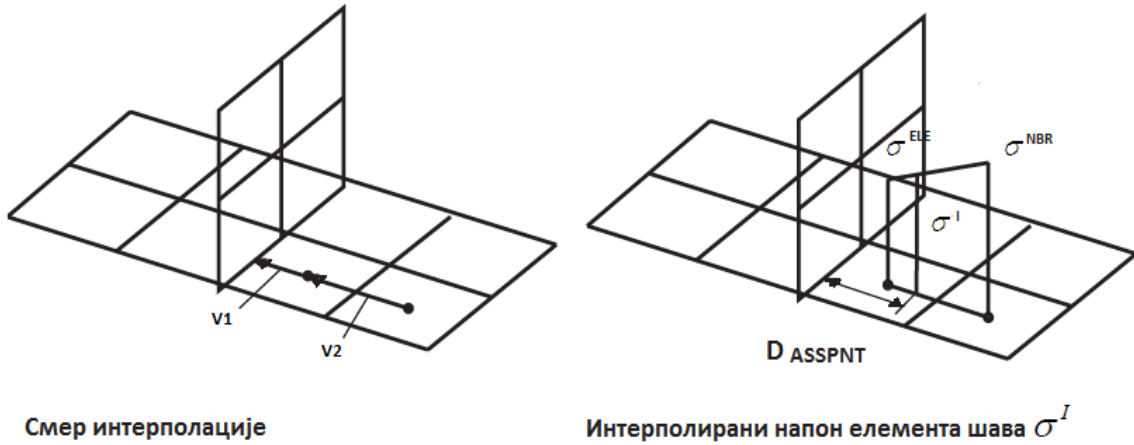
За фактор дебљине плоче је узета стандардна вредност од 1. У овом случају тачка процене би била лоцирана приближно у транзиционој зони вара [21].

Аутоматска корекција напона за чворове унутар шави

Разликују се крупне и ситне мреже у зависности од локације тачке процене.

Корекција напона за крупне МКЕ мреже

Ако је укључена аутоматска корекција напона, суседни елемент тренутно изабраног елемента шави се тражи. Ако је средишња тачка нађеног суседног елемента на већем растојању од линије шави од тачке процене, напони у шаву и суседном елементу се интерполирају. На слици 5.12 је дат смер интерполација.



Слика 5.12 – Смер интерполација

Интерполирани напон на елементима шави,

$$\sigma^I = \sigma^{ELE} + |\vec{\chi}| \cdot (|\vec{v}_1| - D_{BEUPKT}). \quad (5.4)$$

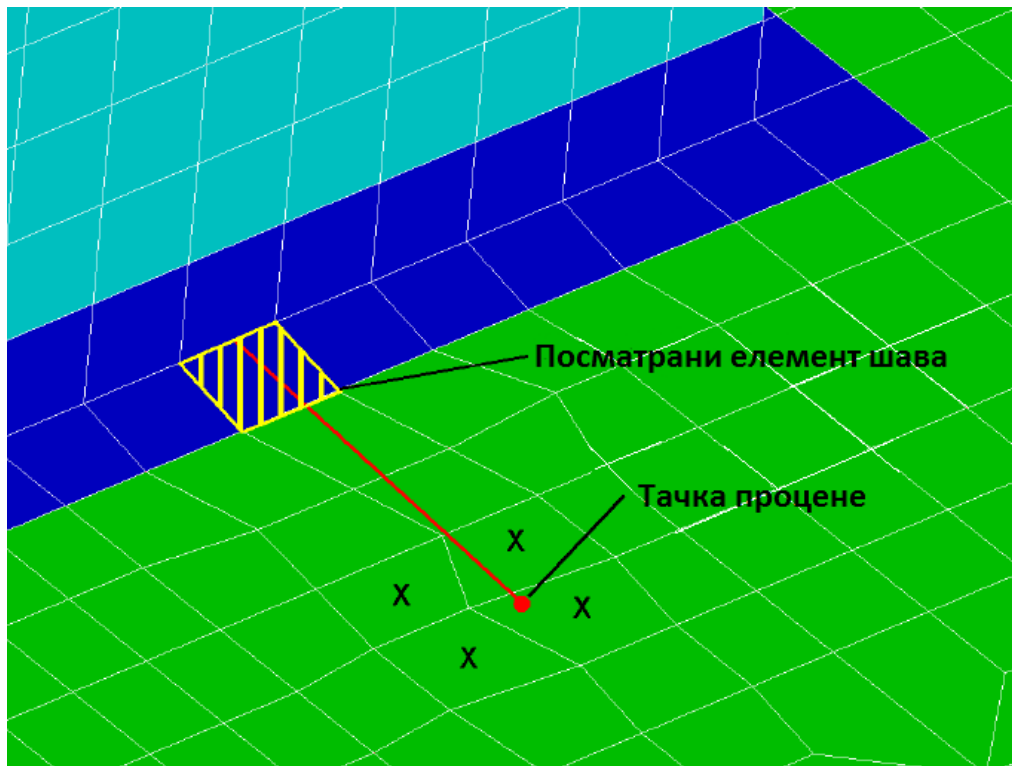
Где важи следеће за градијент релативног напона:

$$\chi = \frac{\Delta \vec{\sigma}^{FE}}{|\Delta \vec{x}|} = \frac{\sigma^{ELE} - \sigma^{NBR}}{|\vec{v}_2|} \cdot \frac{\vec{v}_2}{|\vec{v}_2|}. \quad (5.5)$$

Ако је тачка процене даље од шави него централна тачка елемента суседног завареног елемента, употребљава се нова метода за ситнију МКЕ мрежу.

Корекција напона за ситне МКЕ мреже:

Нова метода користи напон код елемента у близини тачке процене (видети слику 5.13).



Слика 5.13 – Тачка процене у односу на елемент шава

Напони у елементима обележеним са X се користе за процену посматраног елемента шава. Просечна вредност компонента напона се рачунају следећим изразом:

$$\sigma_j = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{\sigma_{i,j}}{d_i}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i}}. \quad (5.6)$$

σ_j - Компонента напона за процену посматраног елемента шава (управне, паралелне и смичуће);

$\sigma_{i,j}$ - j компонента напона (трансферзална, уздужна и смичућа компонента у односу на локални координатни систем шава) за i-те елементе код тачке процене;

d_i - Растојање од центра елемента и до тачке процене;

n - Број елемената коришћених за процену посматраног елемента шава из тачке процене.

6 Практични примери

Конструкције транспортних машина и уређаја се најчешће израђују од металних плоча које су спојене или завртањским или завареним везама. Овај мастер рад се бави анализом замора заварених спојева код транспортних машина и уређаја. У овом поглављу ће се размотрити различити начини приступа проблему моделирања заварених спојева за МКЕ анализу. Поред основних примера, након установљене методе најповољнијег начина моделирања, том методом ће бити извршена анализа замора на моделу кућишта витла као и анализа комплексне конструкције вагона.

6.1 Поређење метода нумеричке анализе и експерименталних података

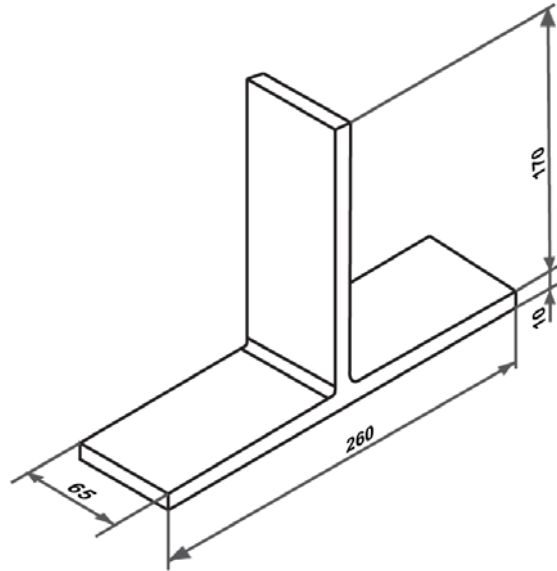
Циљ ове анализе је да се на примеру завареног Т-споја (слика 6.1) нумерички добијени подаци расподеле напона упореде са експерименталним подацима из литературе [22] како би се установио најповољнији начин моделирања завареног споја. На слици 5.10 је приказано пет могућих начина моделирања завареног споја на примеру преклопног шава. Ови начини су исти за све остале типове заварених спојева поменутих у поглављу 5.3. Четири од ових пет начина моделирања се заснивају на коришћењу елемената љуске (shell elements), док је пети начин са употребом 3D (solid) елемената. За солид елементе важи да дају најреалистичнији облик МКЕ модела у односу на геометрију оригиналног модела пошто су сами елементи тродимензионални. Разлог за некоришћење солид елемената као стандардног приступа моделирању коначних елемената је због знатно дужег времена трајања анализе у односу на љуску. Ово је случај, услед већег броја степени слободe по елементу. У индустрији, поготову код великих конструкција које се састоје из плоча, услед економичности и практичности најчешће се користе елементи љуске.

Испитивани узорак

Узорак који је испитиван у литератури [22] је Т спој као што је приказан на слици 6.1. Вар је изражен обострано по AWS D1.1 стандарду за заварене спојеве. Узорак је првобитно био заварен, па су машинском обрадом скраћене странице модела до димензије од 65mm, како би се уклонили почетак и крај шава ради једноставније геометрије за моделирање.

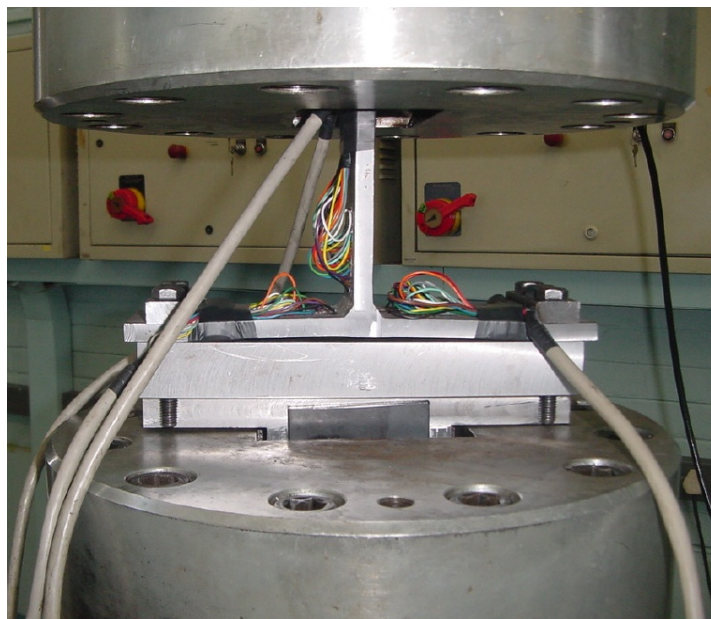
Материјал је челик следећих својстава:

- Граница развлачења: 300Мра;
- Модул еластичности: 206 Гра;
- Поасонов коефицијент: 0,33.

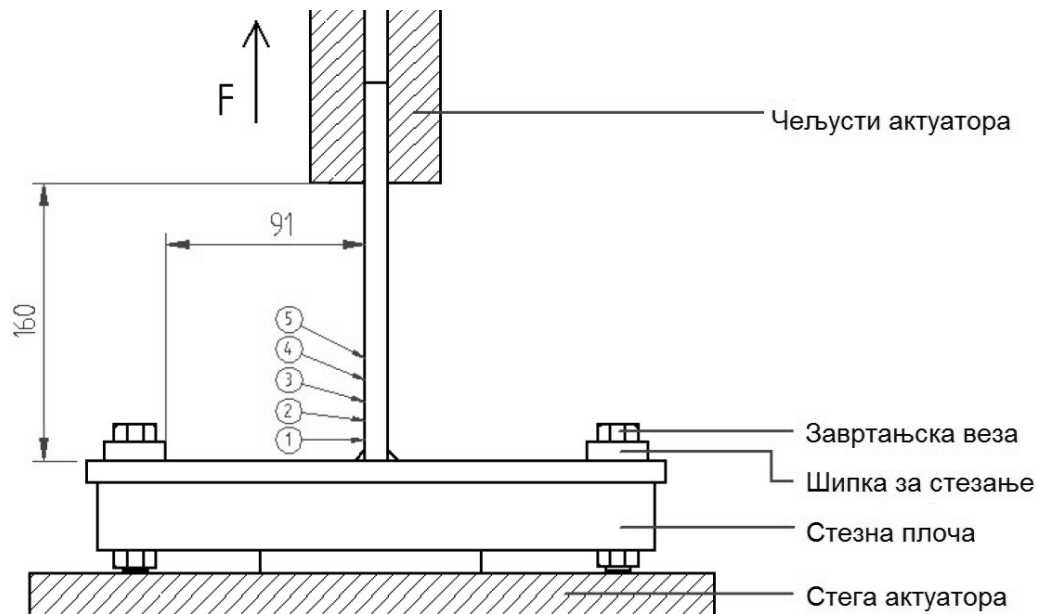


Слика 6.1 – Геометрија и димензије испитиваног Т-споја (димензије дате у mm)

Узорак је постављен на актуатор према слици 6.2. Мерне траке су постављене на вертикалној плочи на позицијама 1, 2, 3, 4 и 5 на растојањима од шави 5mm, 14mm, 23mm, 2mm и 40mm, респективно. Оптерећење је на истезање силом од 3,535 МПа. Напони очитани на мерним тракама из литературе [22] су унети у табелу 6.1. Схематски приказано на слици 6.3.



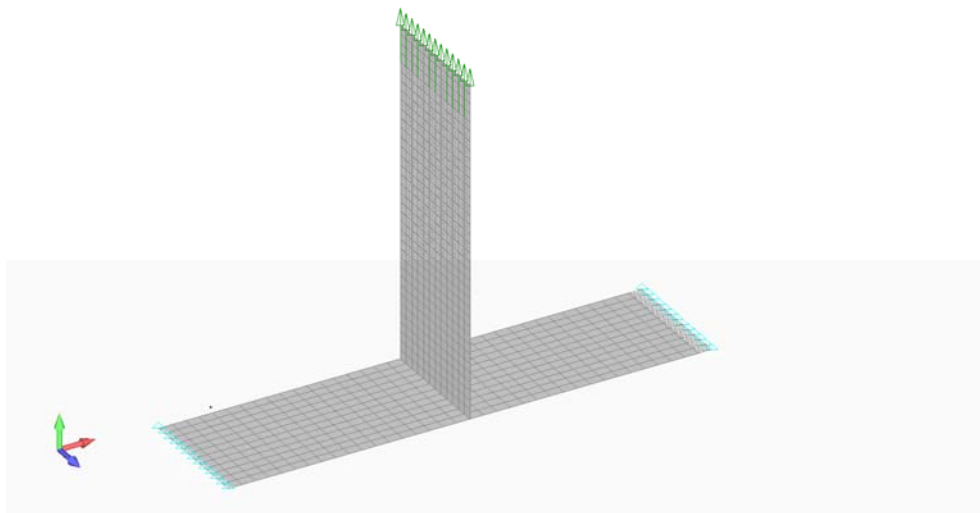
Слика 6.2 – Изглед постављеног узорка



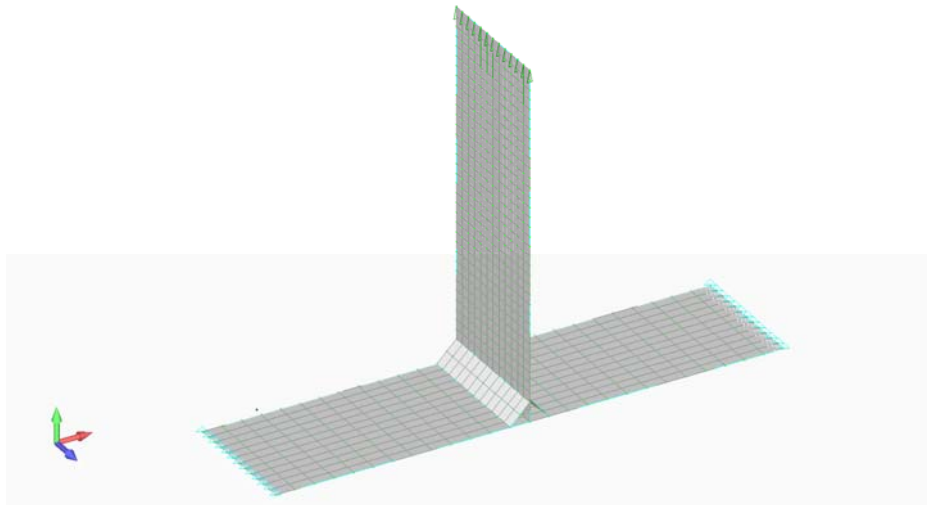
Слика 6.3 – Схематски приказ постављеног узорка са позицијама мерних трака

МКЕ и поређење резултата

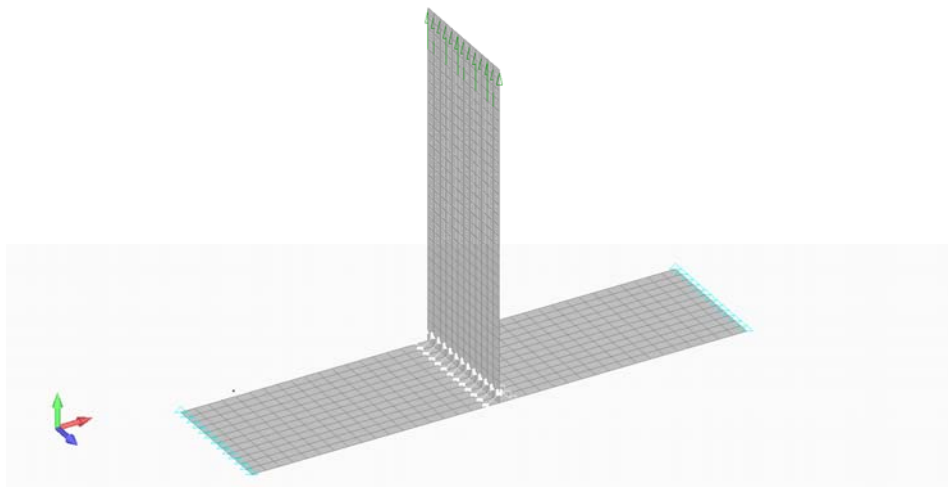
За нумеричко испитивање четири модела коначних елемената Т-споја су креирана на четири различита начина (а, б, в и д са слике 5.10). Гранични услови су исти као и на испитиваном узорку. Величина елемената је једнака $0,5t$, где t представља дебљину плоче. Напони у моделима су мерени на еквивалентним положајима мерних места са узорка за напоне у Y-правцу. Добијени експериментални и напони добијени методом коначних елемената су приказани на графику 6.1. На апциси су дата мерна места по броју, а на ординати напони у датим тачкама. На сликама од 6.4 до 6.7 су приказани модели на којима је вршена анализа и њихови гранични услови као и оптерећења.



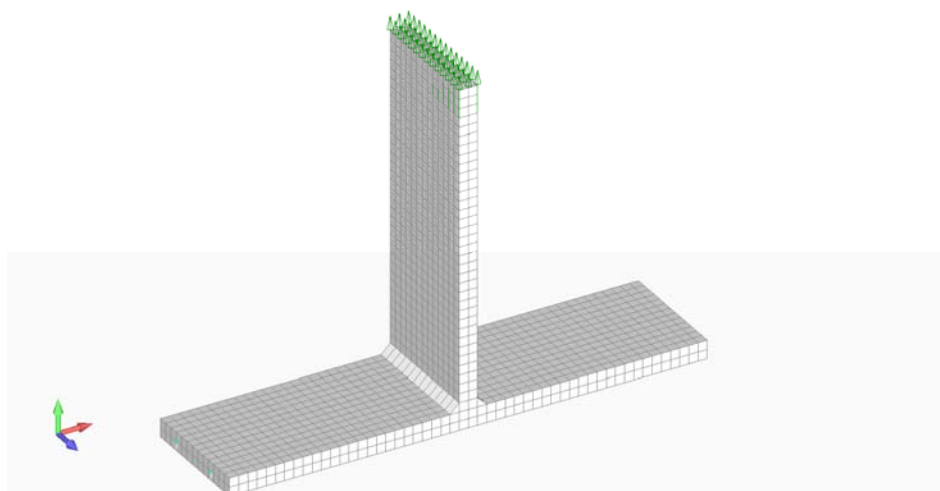
Слика 6.4 – Модел „а“ – обичан спој



Слика 6.5 – Модел „б“ – са експлицитно додатим редом елемената који претстављају шав



Слика 6.6 – Модел „в“ – спој са крутим елементима



Слика 6.7 – Модел „д“ - са солид елементима (3D мрежа)

Табела 6.1 – Резултати мерења и МКЕ анализа.

Мерно место	Узорак	а	б	в	д
1	5.75	9.64	10.58	9.4	15.5
2	5.8	7.07	7.68	7.34	11.35
3	5.2	6.06	6.2	6.13	8.2
4	4.75	5.92	5.97	5.95	7.18
5	4.3	5.88	5.87	5.87	5.99

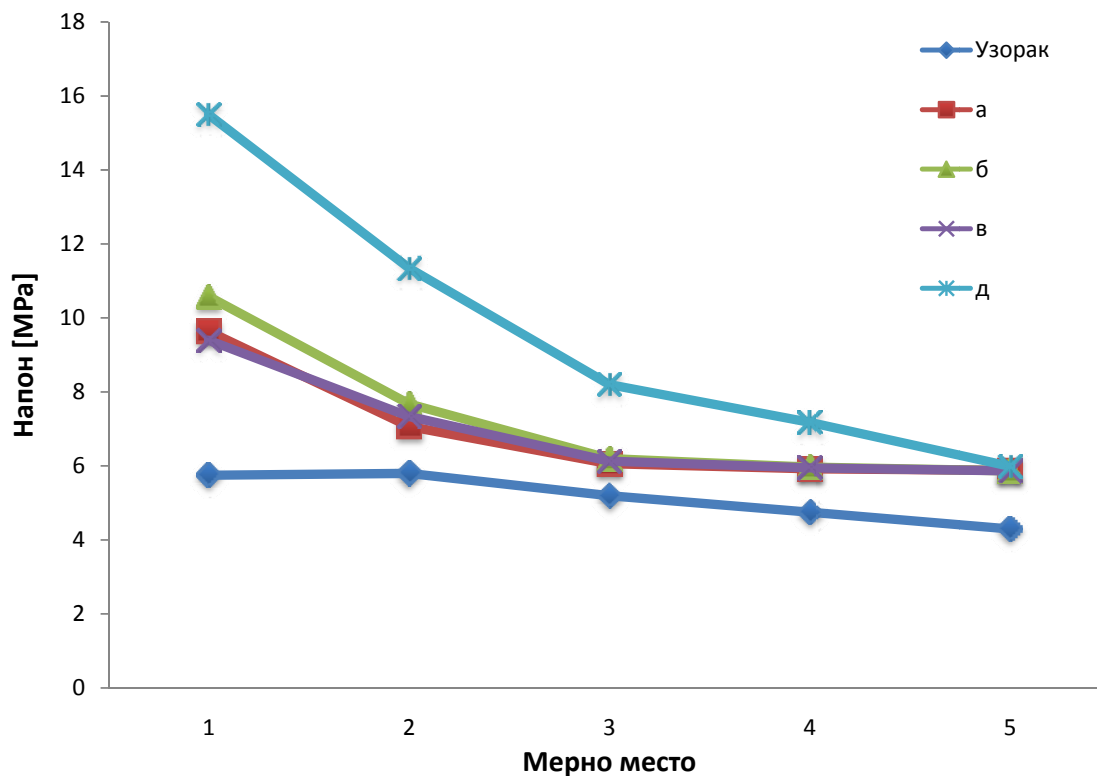


График 6.1 – Резултати мерења на узорку и на моделима

Сагледавањем графика 6.1 постаје очигледно да се теоријски модел и измерене вредности се у великој мери разликују. Ово је услед могућих померања приликом постављања узорка у стезни прибор, које изазива напоне секундарног савијања услед ексцентричности, тј. кретање актуатора није поравњано са централном линијом узорка. Други утицајни фактор, који највише утиче на ексцентричност и самим тим додатне секундарне напоне савијања може бити и девијација од идеалне управности две заварене плоче Т-споја која се јавила у току поступка заваривања. Из овога следи да се девијација теоријских и МКЕ напона своди на суперпозицију секундарних напона савијања на једноосни напон.

Како би се елиминисали ефекти секундарног савијања пун мерни мост је постављен на нови узорак истих спецификација, са новим мерним тракама, пошто је могуће подесити пун мост на такав начин да се мери само једноосни напон. Ново добијени резултати испитивања узорка су праказани на графику 6.2 и подаци су дати у табели 6.2.

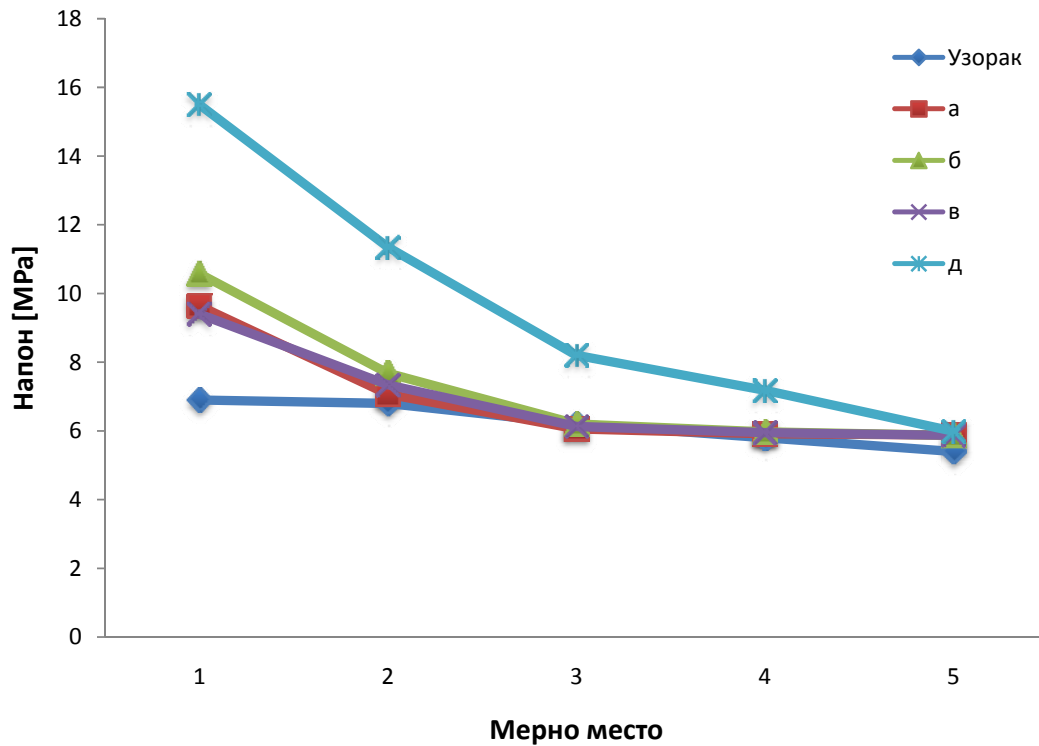


График 6.2 – Резултати поновног мерења на узорку и на моделима

Табела 6.2 – Резултати поновног мерења

Мерно место	Узорак	а	б	в	д
1	6.9	9.64	10.58	9.4	15.5
2	6.8	7.07	7.68	7.34	11.35
3	6.2	6.06	6.2	6.13	8.2
4	5.8	5.92	5.97	5.95	7.18
5	5.4	5.88	5.87	5.87	5.99

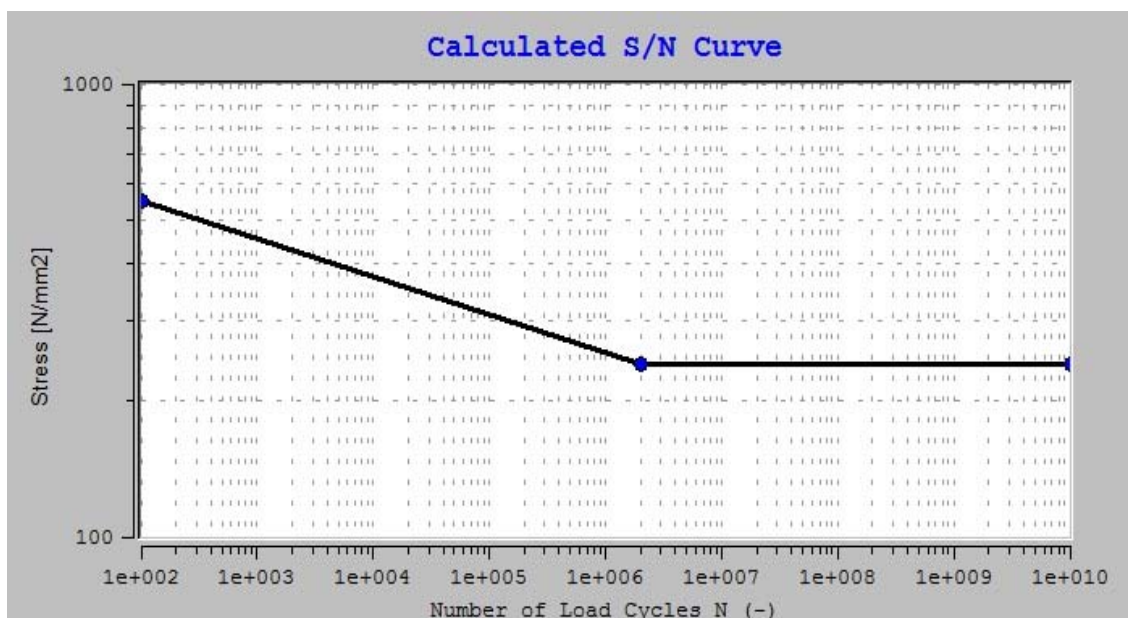
Важност елиминисања ексцентричности и правилног постављања при оваквим испитивањима постаје очигледна пошто је овом исправком добијена корелација резултата експерименталног мерења и нумерички добијених података. Такође се из резултата овог поређења закључује да сви нумерички модели увек дају већу вредност напона од реалне (измерене) у зони најближој шаву. Ово је пожељно јер се постиже већа сигурност конструкције коришћењем нумеричких метода.

Добијени резултати указују на малу разлику у добијеним вредностима напона методом основног моделирања љуске и осталих метода са додатним елементима. Све методе дају већу вредност напона у односу на измерену, тако да је оправдано коришћење оваквих упрошћених модела. Поред веће сигурности, економски је оправдано коришћење методе „а“ једноставније за израду од осталих метода са љуском и 3D елементима.

6.2 Елементарни примери

За потребе анализе наредних елементарних примера, коришћени су елементи љуске. Заварени спојеви су моделирани сходно методи „а“ из поглавља 6.1.

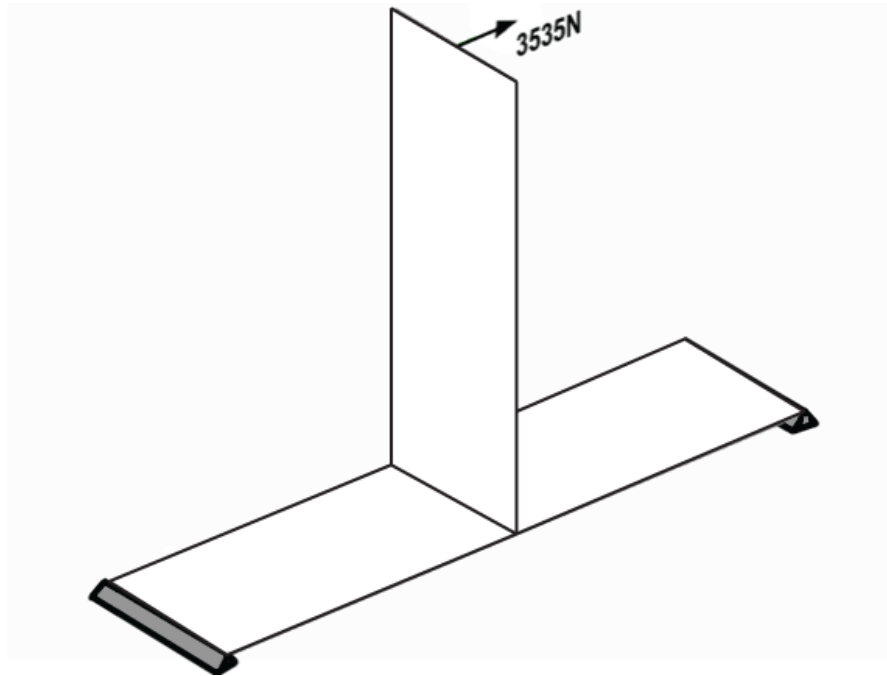
TSI прописује број циклуса оптерећења на $2 \cdot 10^6$ за прорачун конструкција шинских возила, тако да је та вредност усвојена за све примере у поглављу 6.2. Материјали свих примера у овом поглављу су усвојени као за пример из поглавља 6.1. S-N крива коришћеног материјала је дата на слици 6.8.



Слика 6.8 – S-N крива за коришћени материјал

Пример 1: Т-спој оптерећен на савијање

Геометрија модела је преузета са слике 6.1. Модел је оптерећен на савијање у срдењем чвору на врху усправне плоче силом од 3535N и укљештен дуж крајева хоризонталне плоче, према слици 6.9.



Слика 6.9 – Поставка оптерећења и укљештења - Пример 1

Табела 6.3 даје вредности степена сигурности и напона које су добијене анализом. Вредности су измерене у чворовима на датим растојањима дуж шави. Подаци из табеле 6.3 служе за лакше предвиђање критичне зоне шави у којој се може очекивати појава пукотине услед заморног оптерећења.

Табела 6.3 – Степени сигурности и напони на датим растојањима дуж шави

Растојање дуж шави [mm]	Степен сигурности	Напон [N]
0	1.5976	170.25
5	1.6585	164.91
10	1.4363	183.50
15	1.3166	199.67
20	1.2485	210.31
25	1.2150	215.99
30	1.2094	217.77
35	1.2150	215.99
40	1.2485	210.31
45	1.3166	199.67
50	1.4363	183.50
55	1.6585	164.91
60	1.5976	170.52

Степени сигурности на датим растојањима су приказани на графику 6.3. Напони у чворовима шави су дати на графику 6.4.

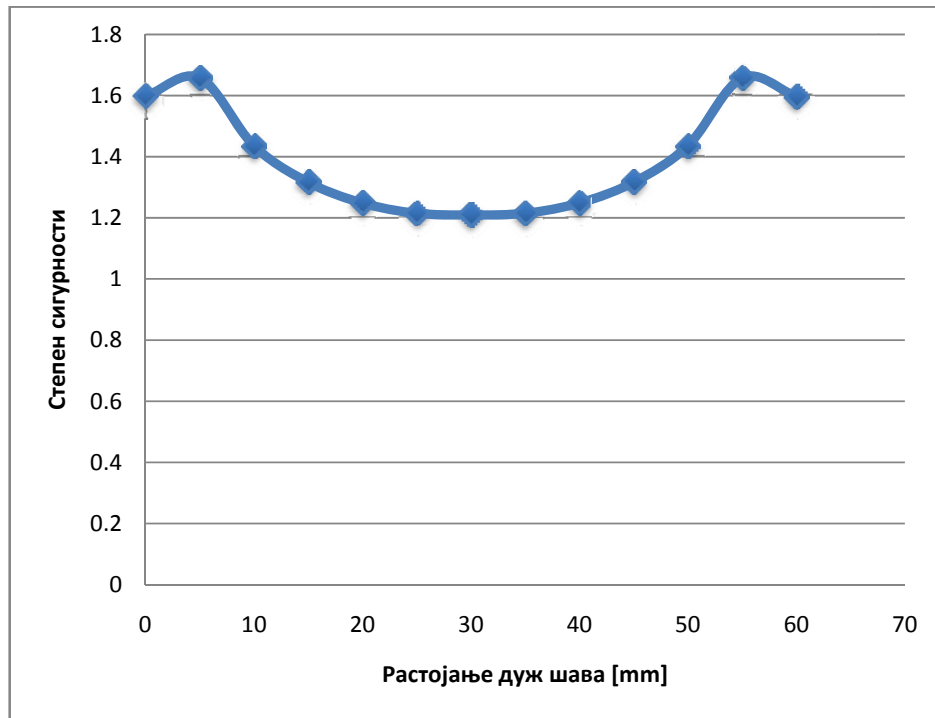


График 6.3 – Степен сигурности дуж шави Т-споја

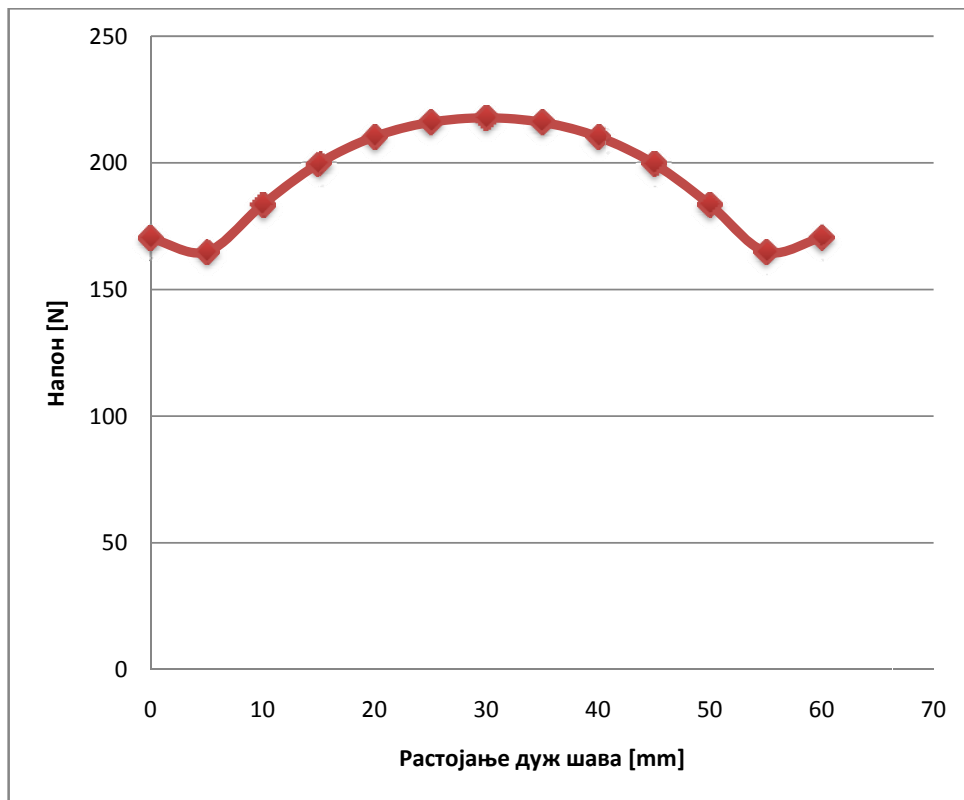
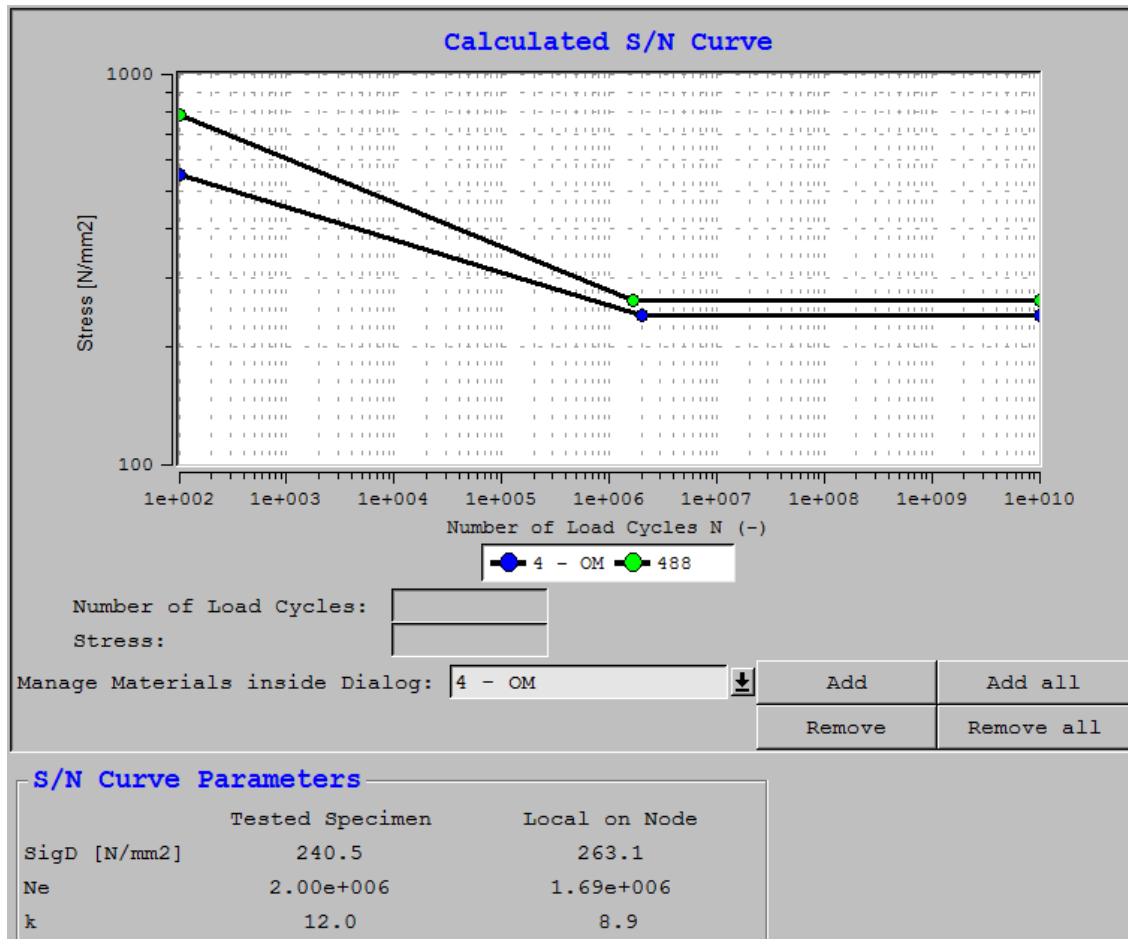


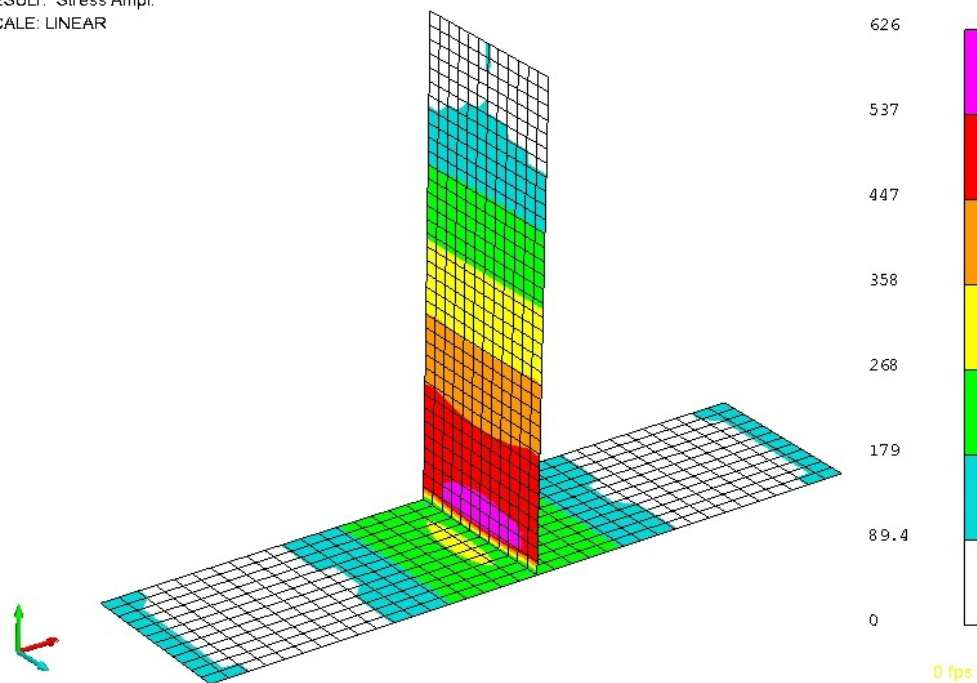
График 6.4 – Напони дуж шави Т-споја

На слици 6.11 је дат приказ амплитудног напона на моделу. Сликаом 6.12 је дата илустрација напонског стања у Т-споју. S-N криве материјала и прорачуната S-N крива на чвору у коме се јавља највећи напон су дати на слици 6.10.

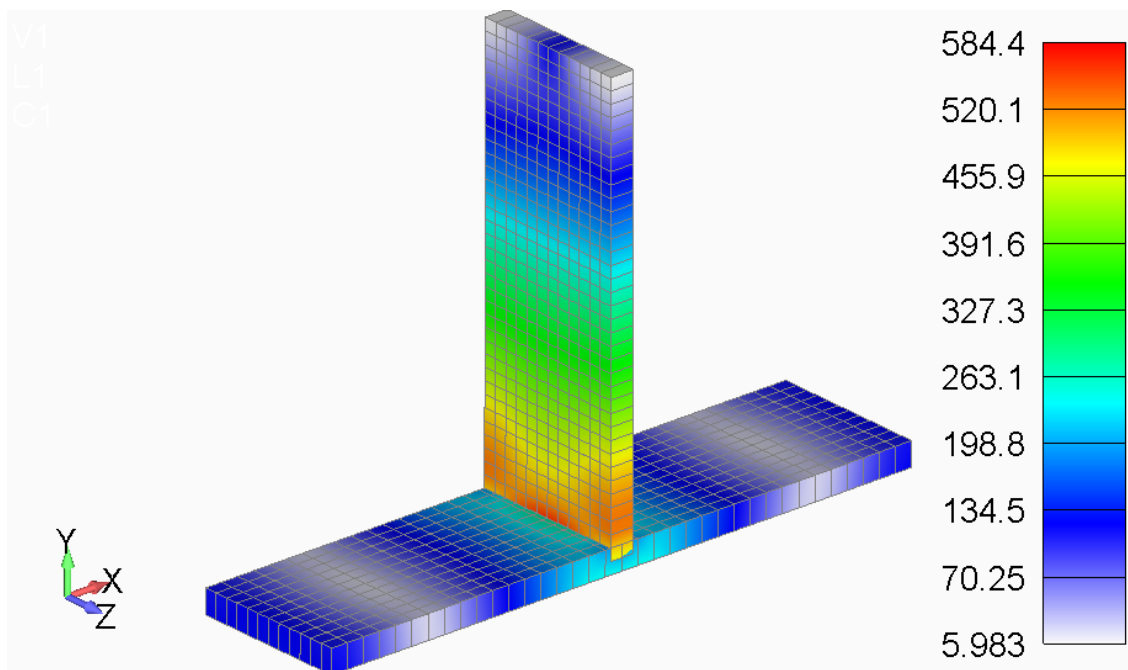


Слика 6.10 – S-N криве – Пример 1

FEMFAT VISUALIZER V2.0f
FE-MODEL
RESULT: Stress Ampl.
SCALE: LINEAR



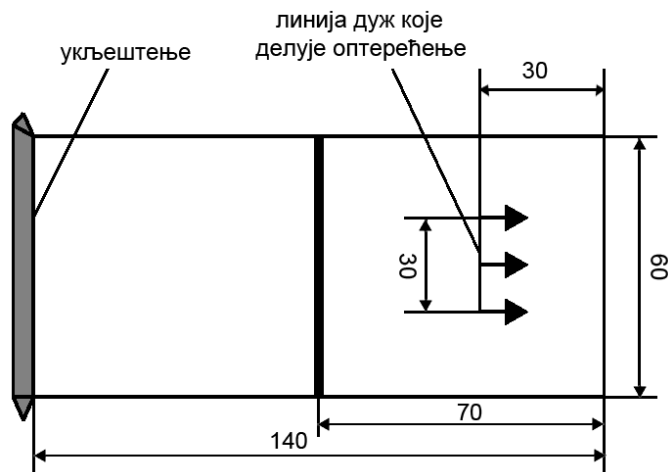
Слика 6.11 – Амплитуда напона – Пример 1



Слика 6.12 – VonMises напонско стање- Пример 1

Пример 2: Сучеонон спој оптерећен на истезање

Геометрија модела сучеоног споја као и његове димензије и места оптерећења су дати на слици 6.13. Дебљина плоча је 10mm. Укупно оптерећење дуж линије која је приказана на слици 6.13 је 21210N.



Слика 6.13 – Схематски приказ - Пример 2

Табела 6.4 даје вредности степена сигурности и напона које су добијене анализом. Вредности су измерене у чворовима на датим растојањима дуж шава. Подаци из табеле 6.4 служе за лакше предвиђање критичне зоне шава у којој се може очекивати појава пукотине услед заморног оптерећења.

Табела 6.4 – Степени сигурности и напони на датим растојањима дуж шава

Растојање дуж шава [mm]	Степен сигурности	Напон [N]
0	5.0164	473.2
5	5.0468	470.39
10	5.0303	469.81
15	5.0321	470.86
20	5.0124	472.69
25	5.0066	474.45
30	5.0021	475.48
35	5.0021	475.48
40	5.0066	474.45
45	5.0124	472.69
50	5.0321	470.86
55	5.0303	469.81
60	5.0468	470.39
65	5.0164	473.21

Степени сигурности на датим растојањима су приказани на графику 6.5. Напони у чворовима шава су дати на графику 6.6.

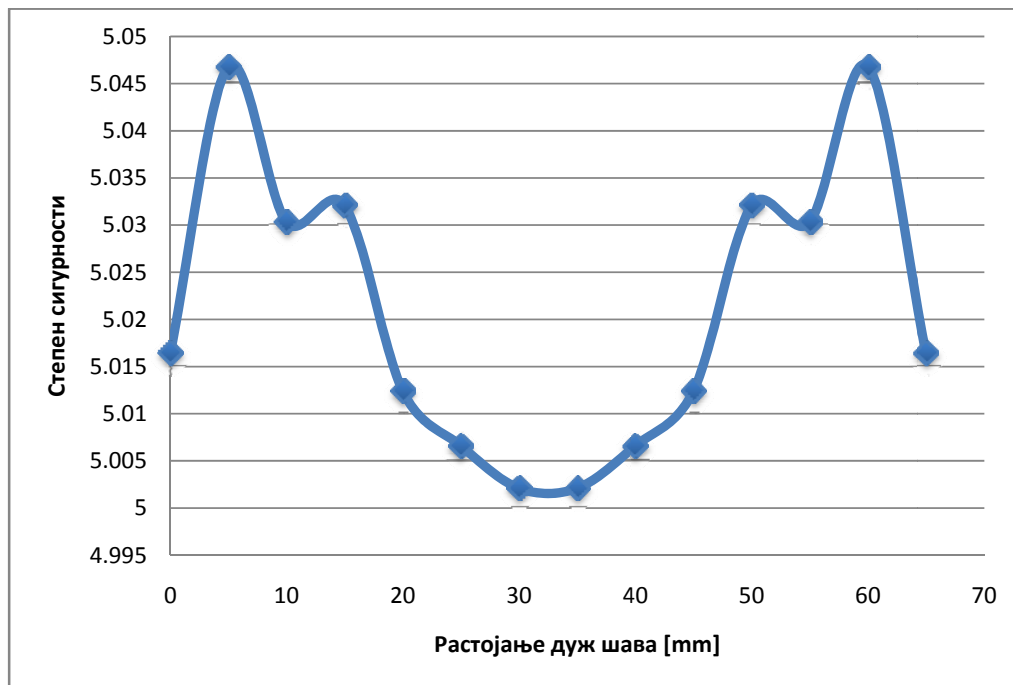


График 6.5 – Степен сигурности дуж шави сучеоног споја за случај истезања

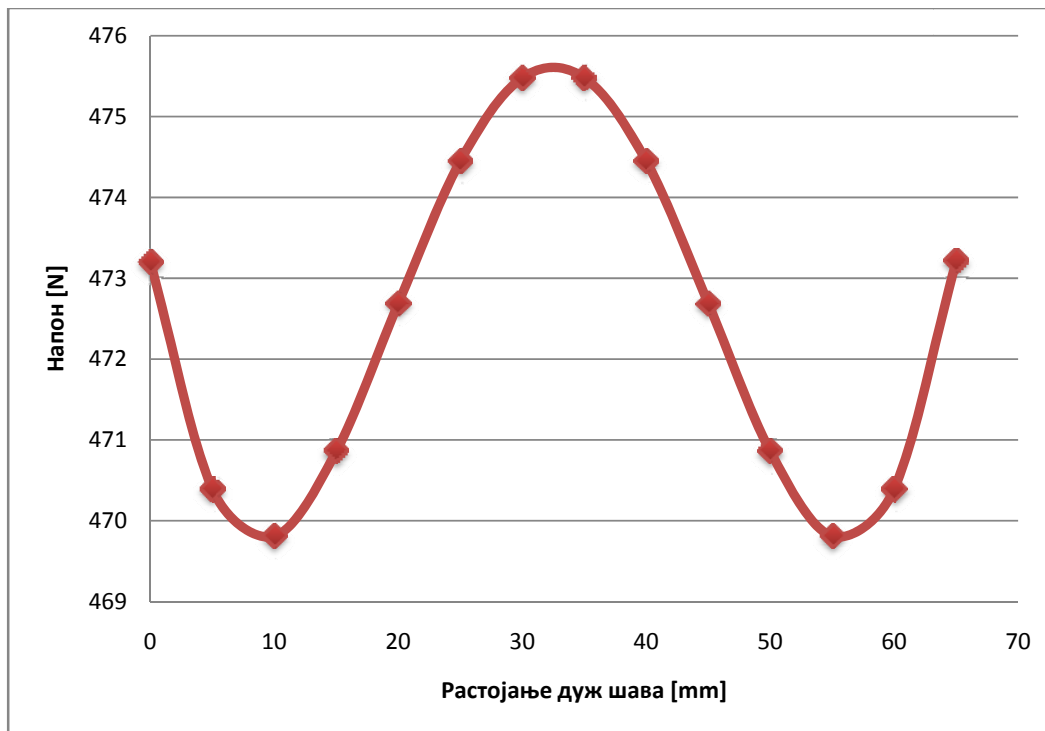
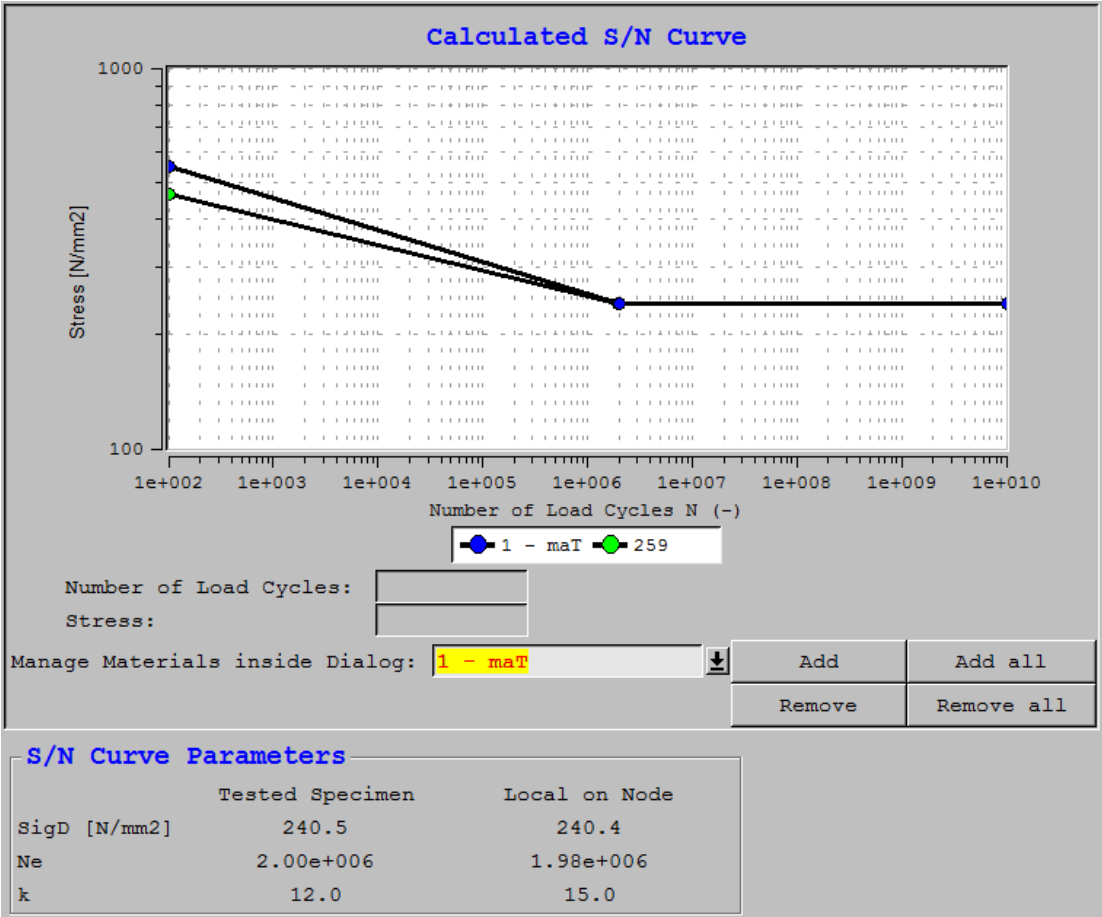


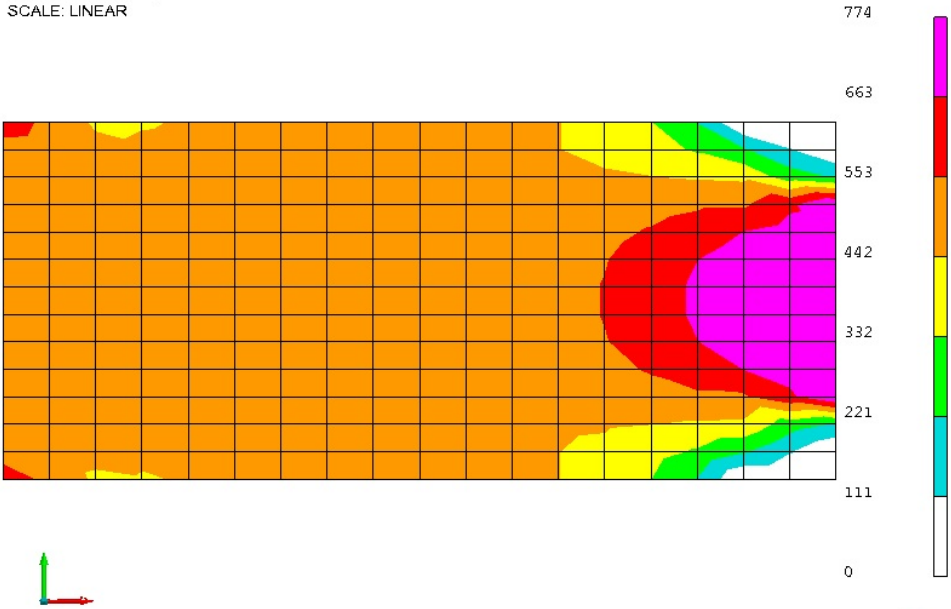
График 6.6 – Напони дуж шави сучеоног споја за случај истезања

На слици 6.14 је дат приказ амплитудног напона на моделу. Слика 6.15 је дата илустрација напонског стања. S-N криве материјала и прорачуната S-N крива на чвору у коме се јавља највећи напон су дати на слици 6.16.

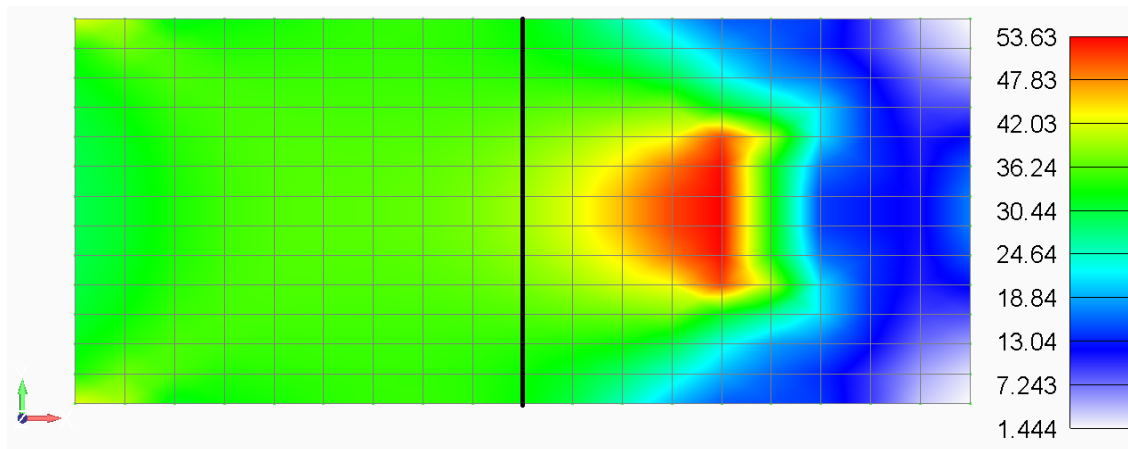


Слика 6.14 – S-N криве - Пример 2

FEMFAT VISUALIZER V2.0f
FE-MODEL
RESULT: Stress Ampl.
SCALE: LINEAR



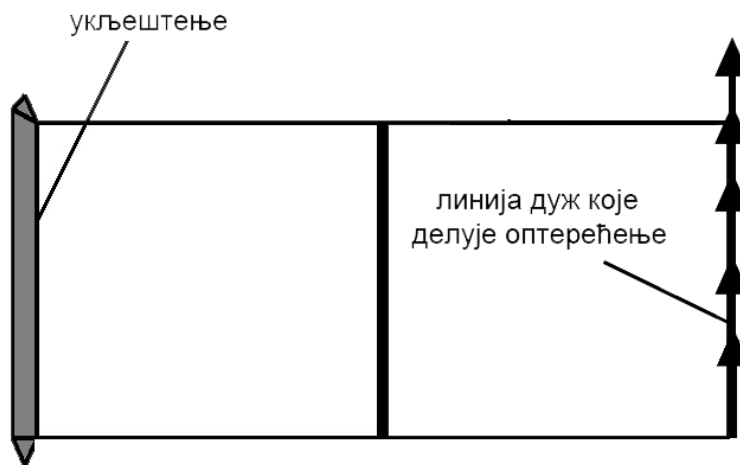
Слика 6.15 – Амплитуда напона - Пример 2



Слика 6.16 – VonMises напонско стање- Пример 2

Пример 3: Сучеони спој оптерећен на смицање

Геометрија и димензије овог примера су исте као и за сучеони спој из примера 2. Линија дуж које делује оптерећење прати бочну страну једне од плоча, док је укљештење постављено на супротној страни друге плоче (слика 6.17). Оптерећење и укљештење се не налазе на чворовима шава. Укупно оптерећење износи 31815N.



Слика 6.17 – Схематски приказ оптерећења и укљештења - Пример 3

Табела 6.5 даје вредности степена сигурности и напона које су добијене анализом. Вредности су измерене у чворовима на датим растојањима дуж шава. Подаци из табеле 6.5 служе за лакше предвиђање критичне зоне шава у којој се може очекивати појава пукотине услед заморног оптерећења.

Табела 6.5 – Степени сигурности и напони на датим растојањима дуж шава

Растојање дуж шава [mm]	Степен сигурности	Напон [N]
0	1.5307	163.54
5	1.8056	139.13
10	2.1475	117.26
15	2.6101	96.76
20	1	0
25	1	0
30	1	0
35	1	0
40	1	0
45	1	0
50	2.562	96.76
55	2.1932	117.26
60	1.85	139.13
65	1.5726	163.54

Степени сигурности на датим растојањима су приказани на графику 6.7. Напони у чворовима шава су дати на графику 6.8. На слици 6.18 је дат приказ амплитудног напона на моделу. Сликаом 6.19 је дата илустрација напонског стања. S-N криве материјала и прорачуната S-N крива на чвору у коме се јавља највећи напон су дати на слици 6.20.

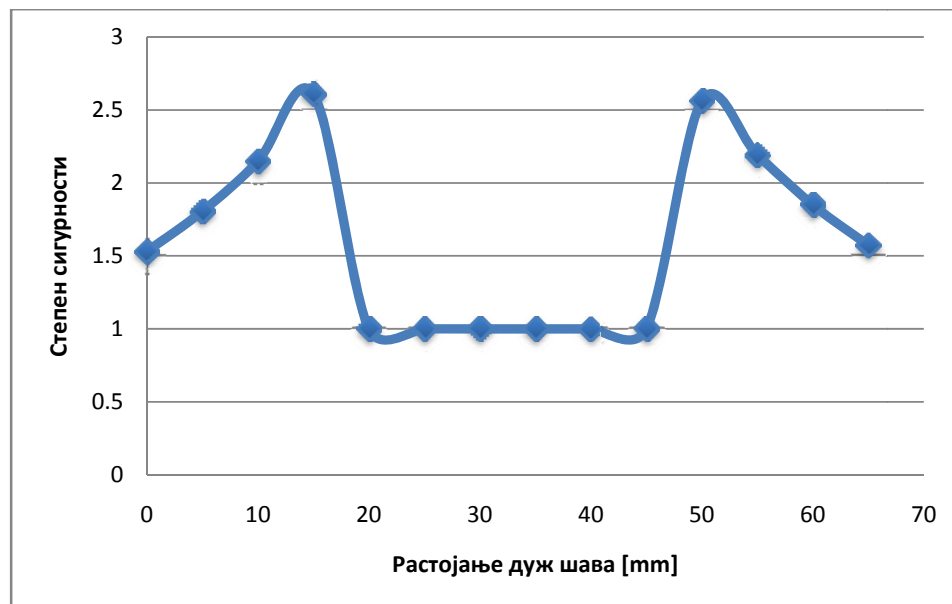


График 6.7 – Степен сигурности дуж шава сучеоног споја за случај смицања

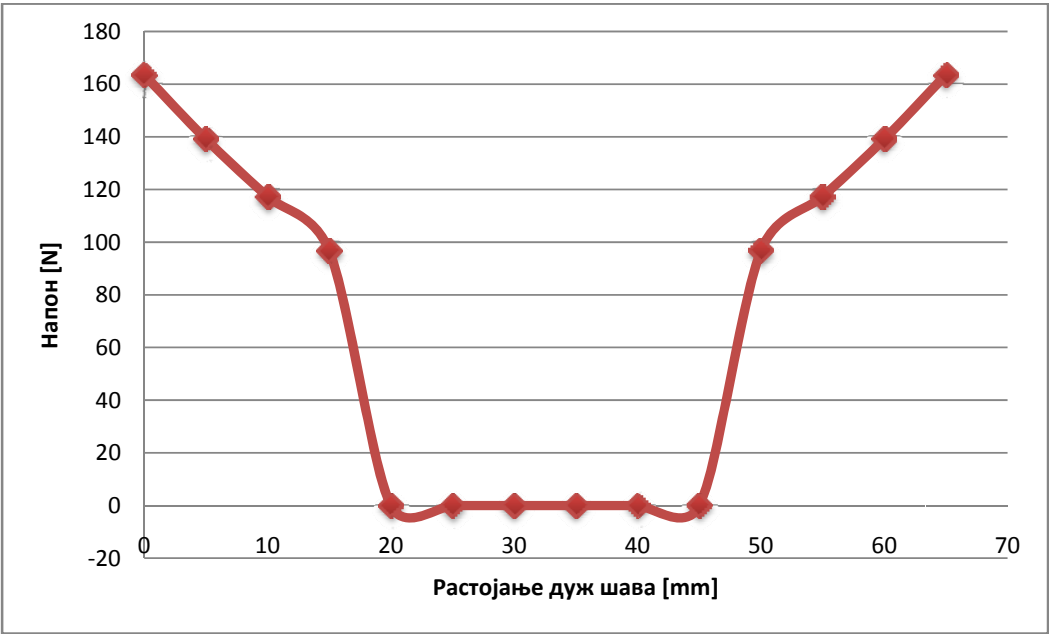
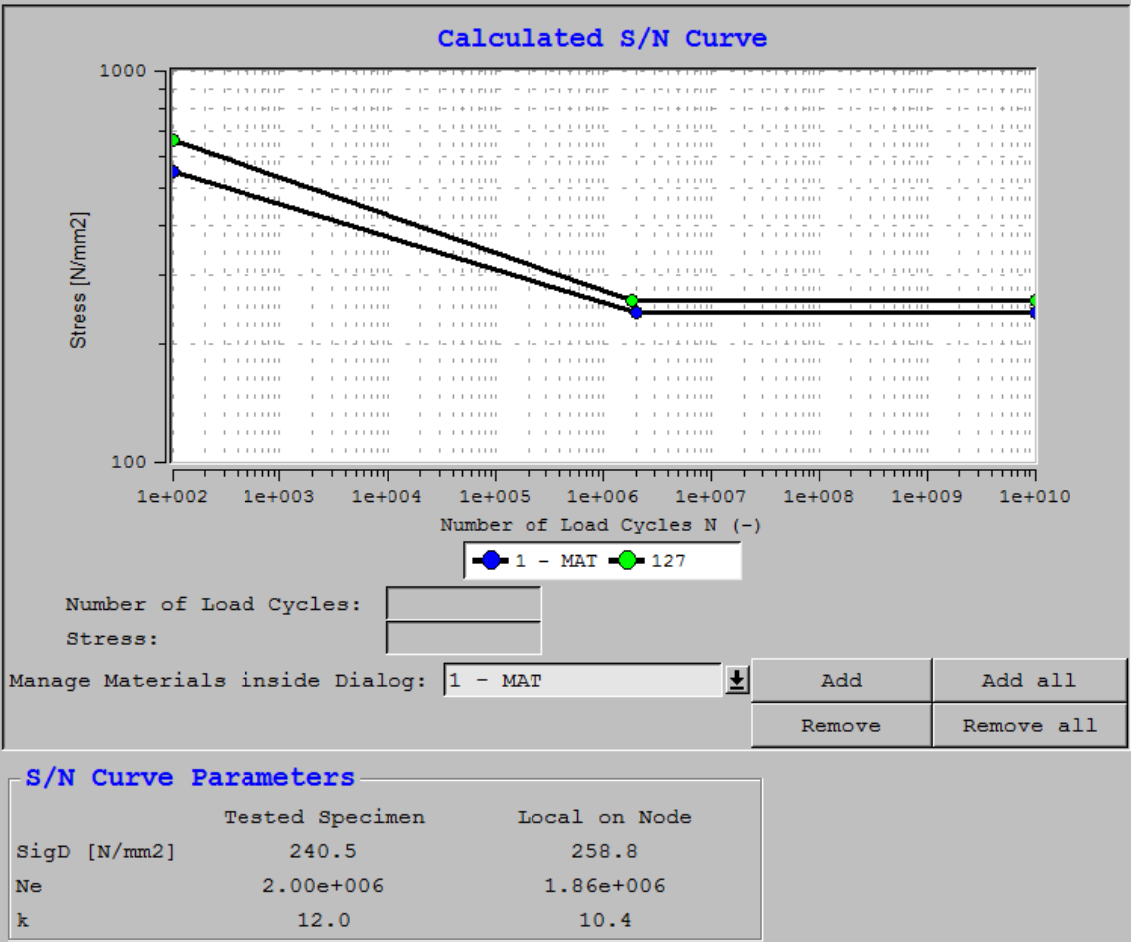
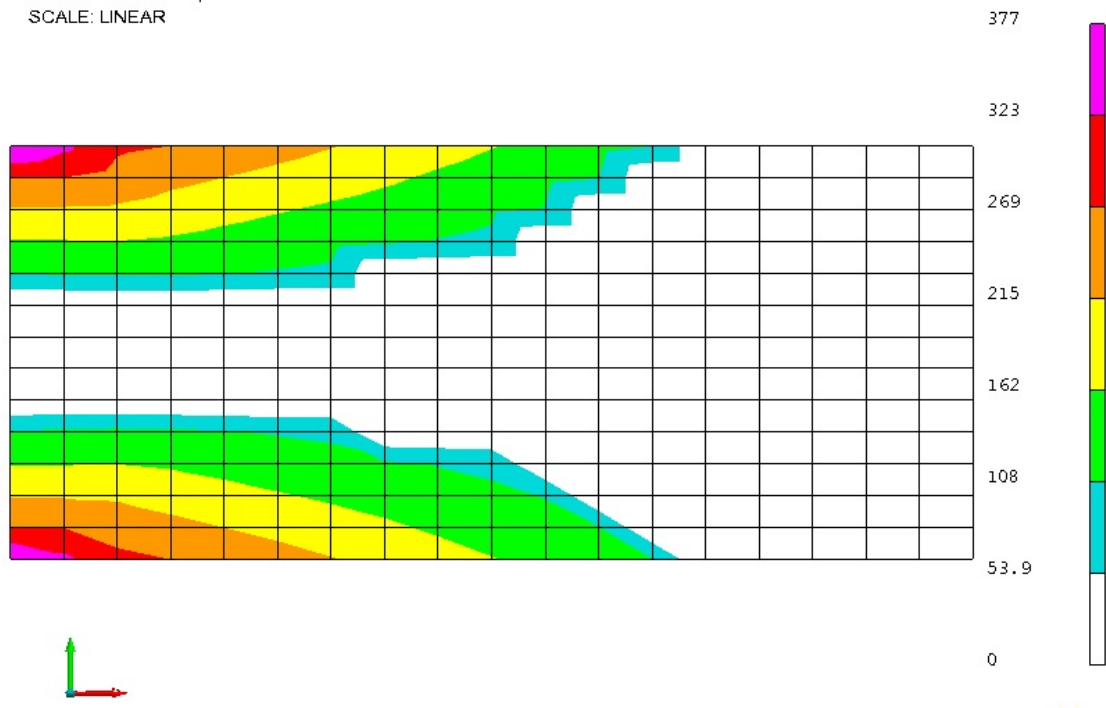


График 6.8 – Напони дуж шави сучеоног споја за случај смицања

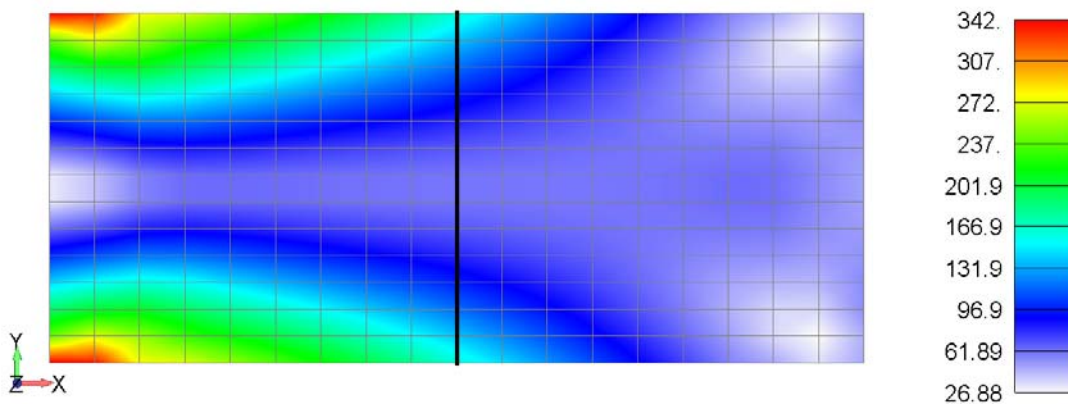


Слика 6.18 – S-N криве - Пример 3

FEMFAT VISUALIZER V2.0f
FE-MODEL
RESULT: Stress Ampl.
SCALE: LINEAR



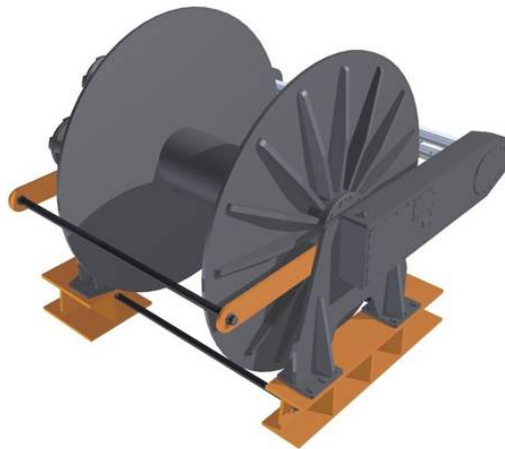
Слика 6.19 – Амплитуда напона - Пример 3



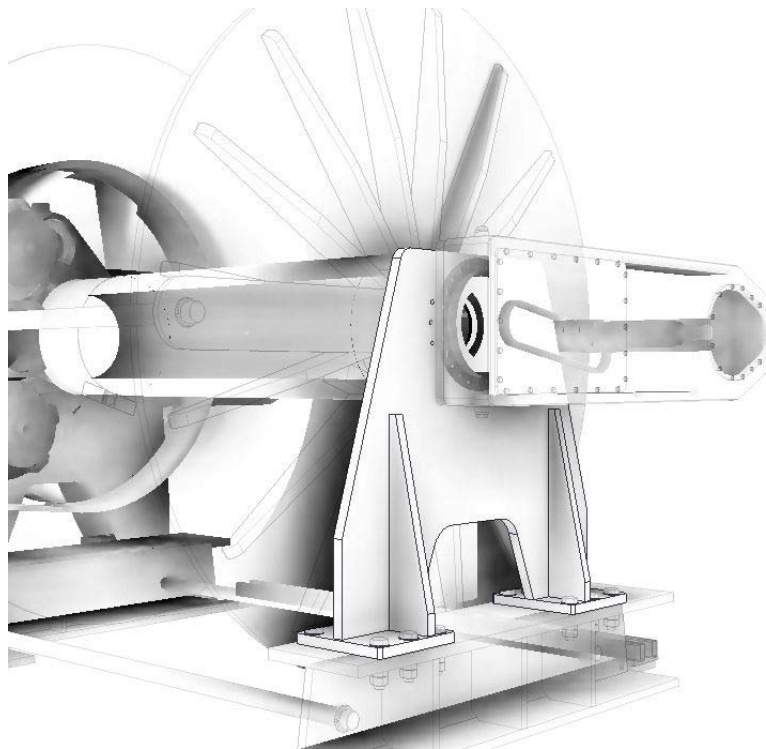
Слика 6.20 – VonMises напонско стање- Пример 3

6.3 Пример анализе десне стране кућишта конструкције витла TWS10030

Десна страна кућишта витла за рибарење повлачним мрежама ознаке TWS 10030 (слика 6.21), произвођача RAPP Marine Group, је коришћено за анализу. Кућиште преноси силе са добоша витла на постоље. Овај конкретан модел витла има кућиште које је израђено из више делова спојених завртањском везом. Десна страна кућишта (слика 6.22) је израђена од заварених плоча од конструкционог челика S355.

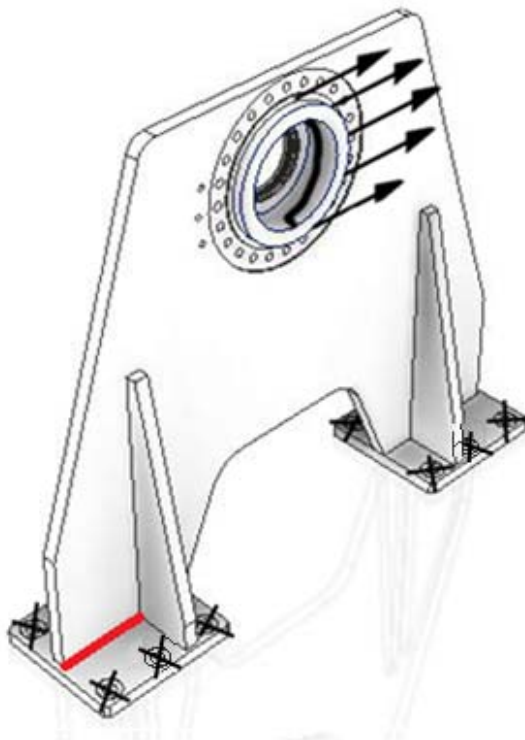


Слика 6.21 – Модел витла TWS 10030



Слика 6.22 – Десна страна кућишта

Дебљина плоча је 35mm, остале мере се могу наћи у техничкој документацији витла. Модел је ограничен у чворовима на местима завртањских веза, отвори за завртње нису моделирани. Укупна сила која делује на ред елемената дуж половине отвора за улежиштење добоша износи 594510 N. Схематски приказ граничних услова и места деловања притиска су приказана на слици 6.23. Посматрани шав је такође обележен на истој слици црвеном линијом.



Слика 6.23 – Схематски приказ граничних услова, места притиска и посматраног шав

Табела 6.6 даје вредности степена сигурности и напона које су добијене анализом. Вредности су измерене у чворовима на датим растојањима дуж шав. Растојање дуж шав је мерено од спољашње стране кућишта ка средини. Подаци из табеле 6.6 служе за лакше предвиђање критичне зоне шав у којој се може очекивати појава пукотине услед заморног оптерећења.

Степени сигурности на датим растојањима су приказани на графику 6.7. Напони у чворовима шав су дати на графику 6.8. Илустрација напонског стања у плочи је дата на слици 6.26. У чворовима који имају вредност напона 0 се приписује степен сигурности 2,5.

На слици 6.25 је дат приказ амплитудног напона на моделу. Слика 6.26 је дата илустрација напонског стања. S-N криве материјала и прорачуната S-N крива на чвору у коме се јавља највећи напон су дати на слици 6.24.

Табела 6.6 – Степени сигурности и напони на датим растојањима дуж шави.

Растојање дуж шави [mm]	Степен сигурности	Напон [N]
0	0.8484	344.92
20	1.0438	278.72
40	1.1483	253.08
60	1.3144	221.06
80	1.5499	187.89
100	1.8902	155.06
120	2.5	0
140	2.5	0
160	2.5	0
180	2.5	0
200	2.5	0
220	2.5	0
240	2.5	0

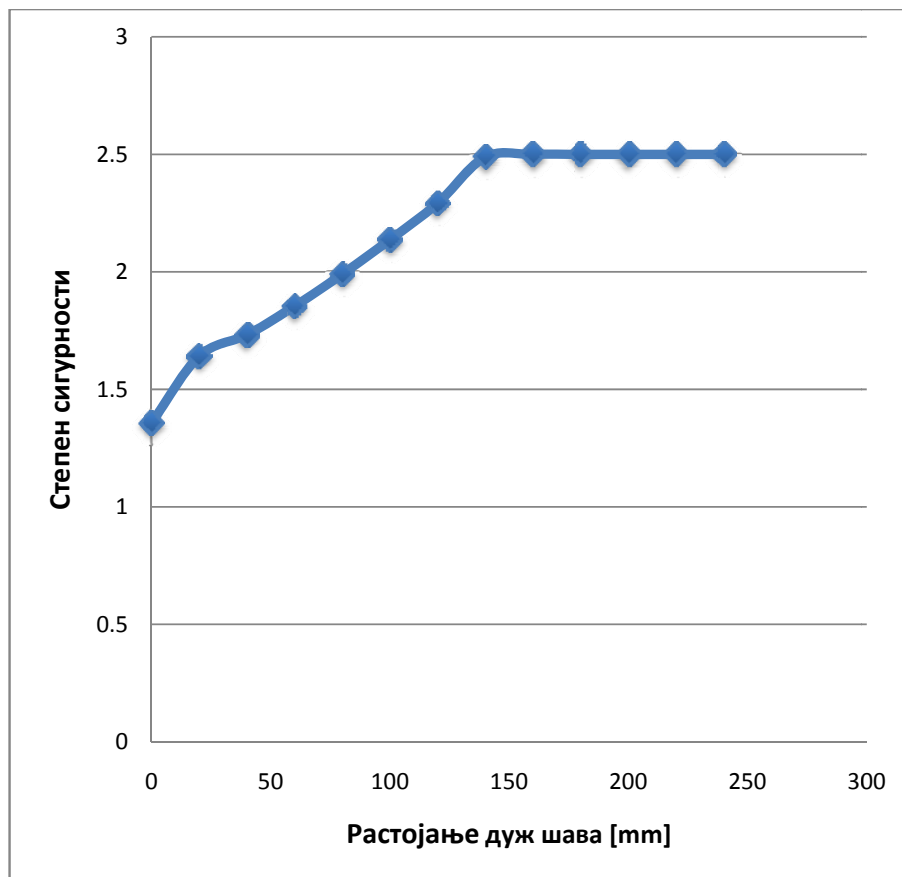


График 6.9 – Степен сигурности дуж шави

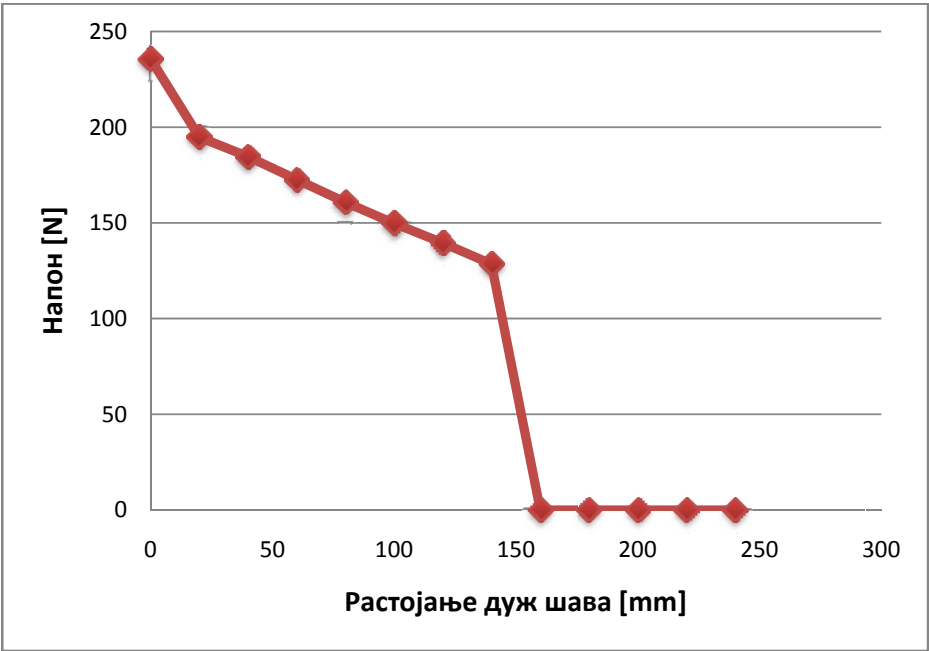
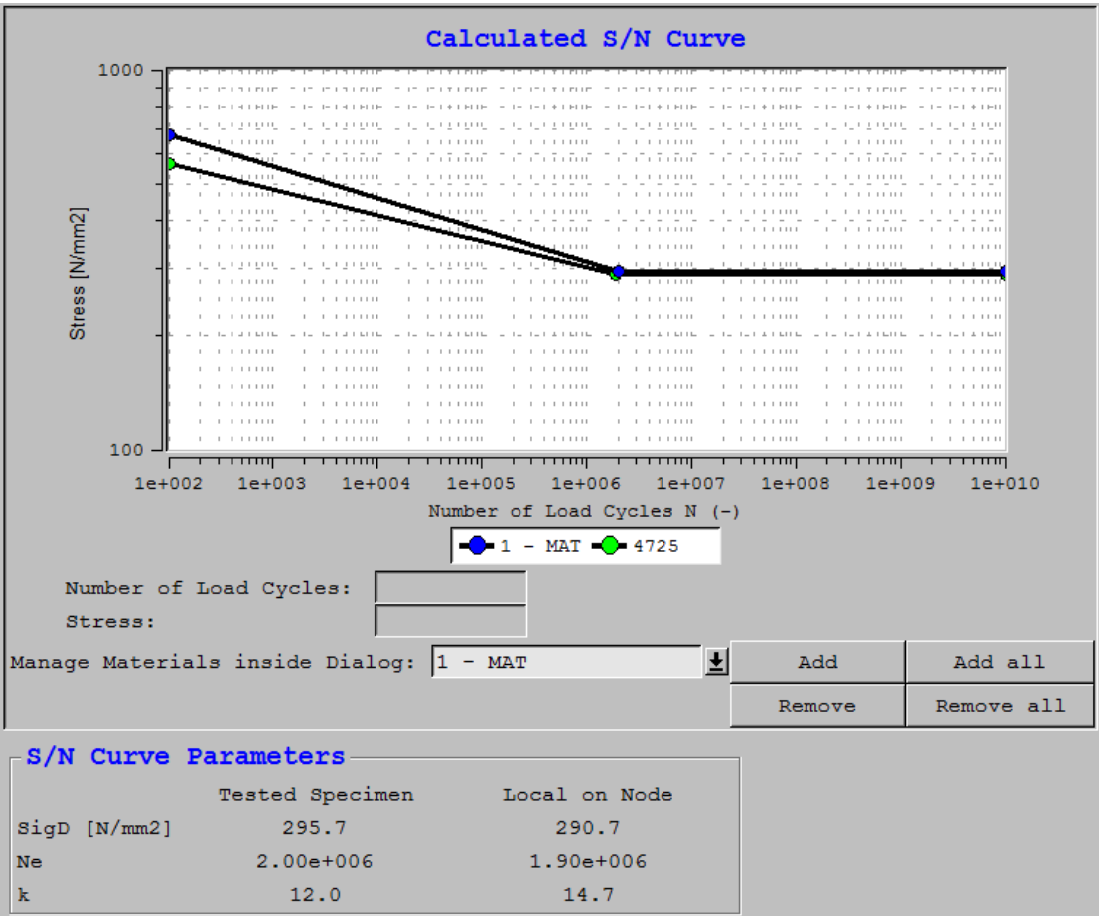
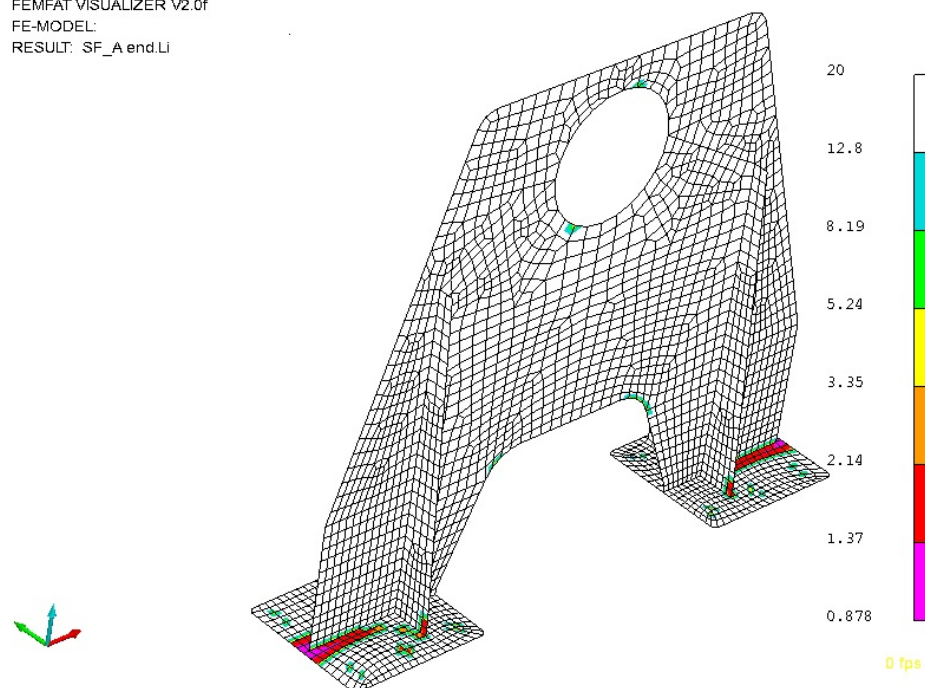


График 6.10 – Напони дуж шави

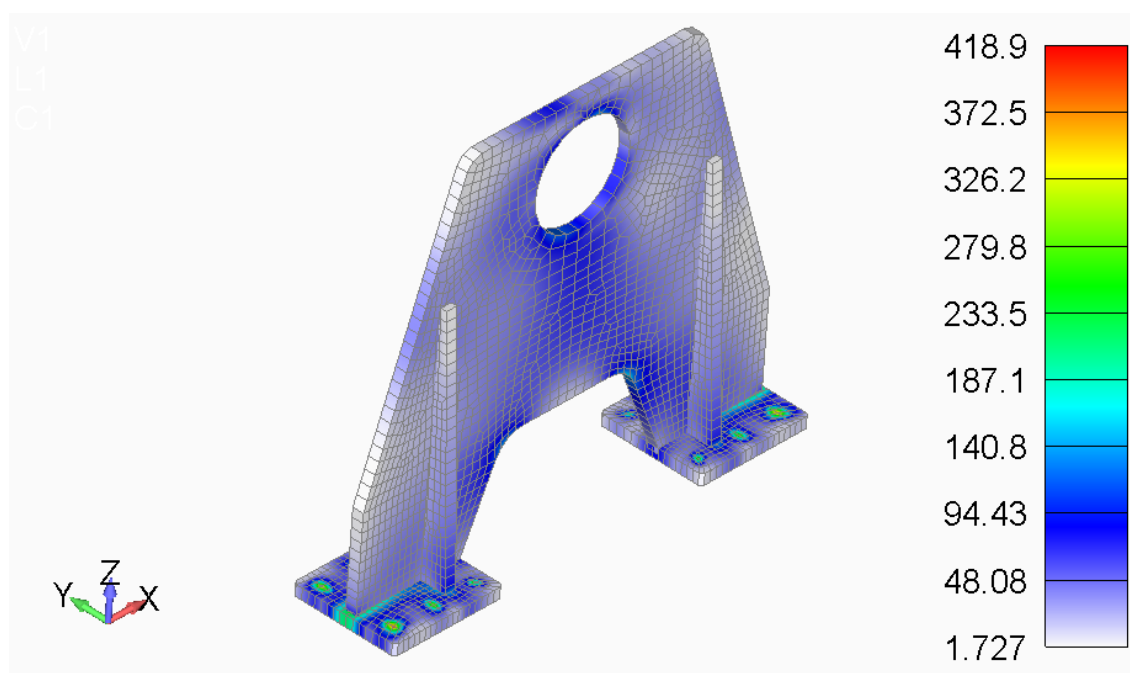


Слика 6.24 – S-N криве

FEMFAT VISUALIZER V2.0f
FE-MODEL:
RESULT: SF_A end.Li



Слика 6.25 – Амплитуда напона



Слика 6.26 – VonMises напонско стање модела

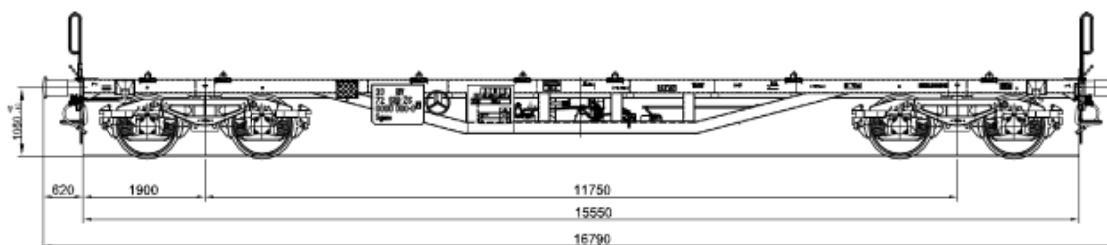
6.4 Пример анализе вагона за превоз контејнера типа Sgmns

Вагон типа Sgmns је намењен за превоз контејнера и заменљивих судова у блок возовима (слика 6.27). Анализа заморне чврстеће заварених спојева је урађена по истом принципу као у претходним примерима. Вагон је предвиђен за саобраћај на свим пругама нормалног колосека, изузев пруга у Великој Британији.

Главне техничке карактеристике вагона типа Sgmns (слика 6.28) дате су у Табели 6.7. Карактеристике делова склопа, гранични услови анализе, материјали и оптерећења су дати у литератури [23].

Табела 6.7 - Технички подаци о вагону типа Sgmns

Ширина колосека	1435mm
Дужина кола преко несабијених одбојника	16790mm
Товарна дужина	15550mm
Размак сворњака обртних постоља	11750mm
Ширина вагона	2930mm
Највеће оптерећење по осовини	20t
Висина одбојника од ГИШ-а	1.060^{+5}_{-10} mm
Висина пода од ГИШ-а	≈ 1.210 mm
Маса празног вагона	cca 19t
Мах. носивост кола	cca 61.0 t
Мах. брзина празних кола	120km/h
Мах. брзина пуних кола (режим "S")	100km/h

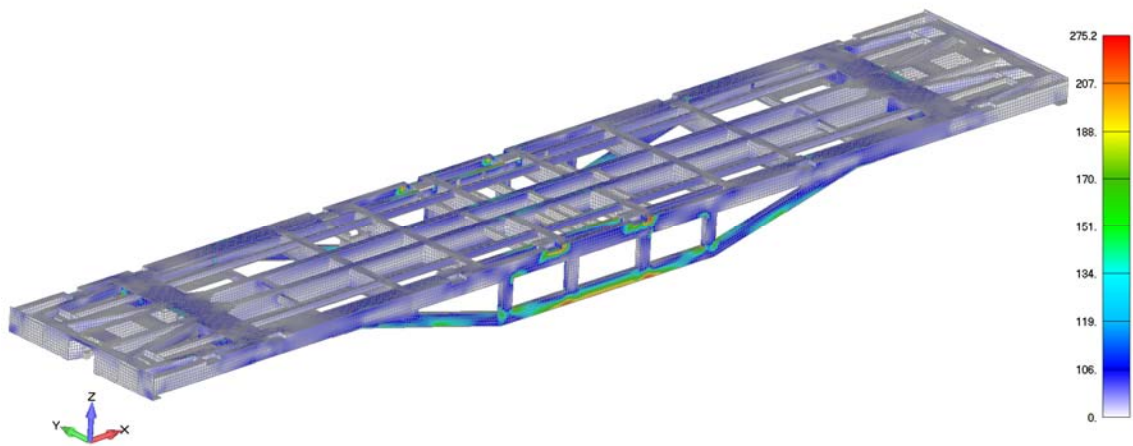


Слика 6.27 - Скица вагона за превоз контејнера типа Sgmns

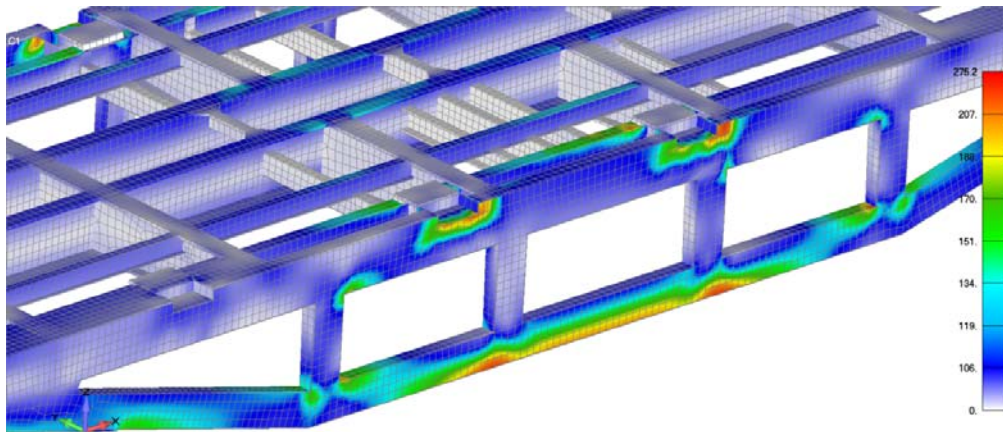
Слика 2.29 приказује ефективно поље напона за посматрани случај оптерећења. Амплитуда напона у моделу је дата на слици 6.30. Детаљни приказ једне од локација на којима је напон већи од дозвољеног је дат на слици 6.30, као и степен сигурности у овој области на 6.31.



Слика 6.28 - Изглед вагона Sgmns

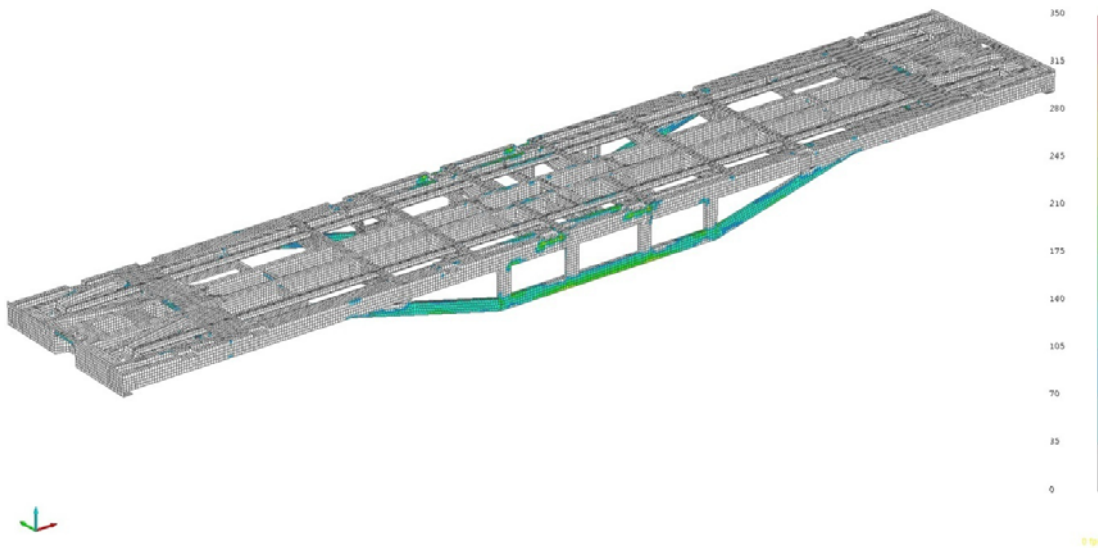


Слика 6.29 - Поље ефективног напона

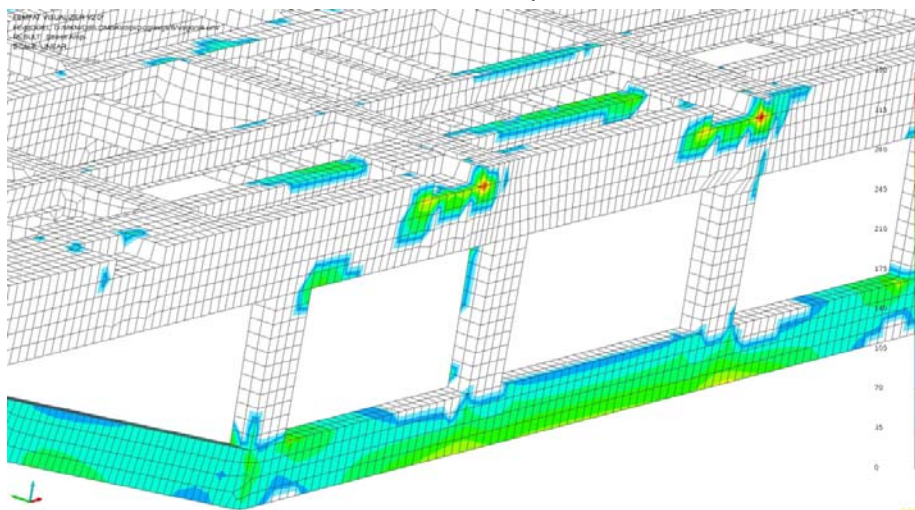


Слика 6.30 - Поље ефективног напона

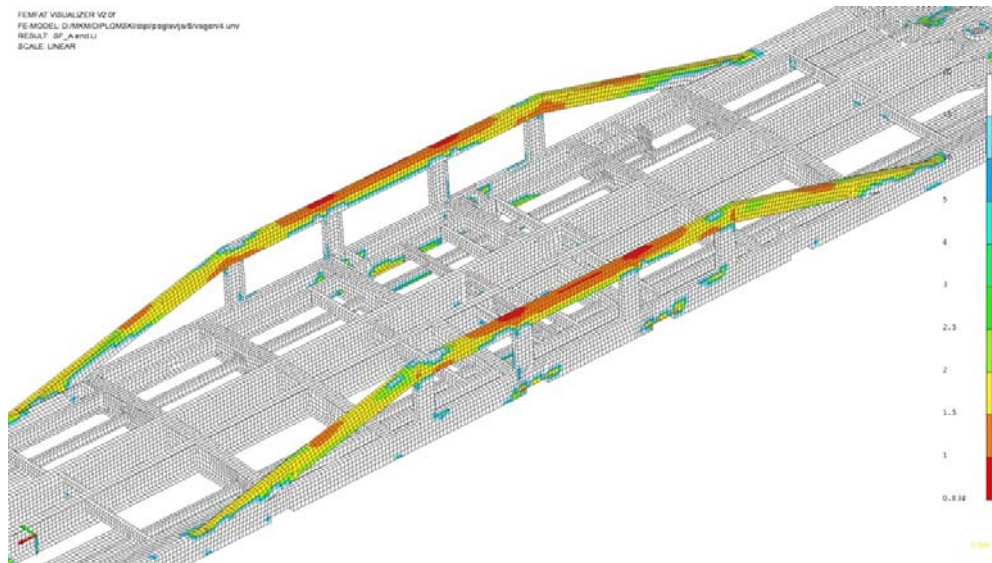
FEMFAT VISUALIZER V2.07
FE-MODEL: D:\MKM\DIPLOMSKI\projekt\glavni\glavni_k.unv
RESULT: Stress Amplitude
SCALE: LINEAR



Слика 6.31 - Амплитуда напона



Слика 6.31 - Амплитуда напона – увећан приказ



Слика 6.32 - Степен сигурности – поглед одоздо

Анализом се добија степен сигурности нижи од 1 у вару у коме се на вагону у реалним условима експлоатације јавила пукотина (слика 6.33). Пукотина је иницирана у вару, чиме се потврђује поузданост података добијених анализом. Коришћењем истог приступа из претходних примера могуће је извадити табеларно податке за све шавове, као и графички приказати резултати свих варова у конструкцији.



Слика 6.33 - Пукотина на конструкцији

7 Закључак

У последњих тридесет година дошло је до наглог развоја науке, техничко-технолошких процеса, подизања квалитета, знатних промена у прописима и стандардима, начину прорачуна носивости и века трајања машинских елемената, склопова и машина. Поред класичних прорачуна и метода израчунавања, све више се користе рачунарски програми и модерне нумеричке методе за прорачун и конструисање. Анализа замора заварених спојева игра велику улогу у препознавању критичних места и претпостављању животног века конструкције до појаве прслине.

У транспортној индустрији као и у разним сферама машинства, нумеричко предвиђање животног века производа постаје све важније у циљу повећања опште безбедности, смањења броја физичких тестова и уштеде новца.

На основу поређења различитих приступа моделирању коначних елемената завареног споја долази се до закључка да сви приступи дају веће вредности напона од реалних што је повољно. У циљу скраћивања времена израде МКЕ модела и саме анализе препоручено је коришћење најједноставнијег приступа моделирању спојева, а то је коришћењем елемената љуске, без додатних елемената.

Даље истраживање би подразумевало коришћење знања из механике лома, метода поузданости и оптимизације конструкција.

Списак слика и табела и графика

	страна
Слика 2.1 - Основни елементи завареног споја по JUS C.ТЗ.001	5
Табела 2.1 - Класификација поступака заваривања	6
Слика 2.2 - Основни и нагнути положаји заваривања плоча и цеви	7
Табела 2.2 - Облици најчешће коришћених жлебова и одговарајућих шавова	7
Слика 2.3 - Основне врсте заварених спојева а,б,в,г	8
Слика 2.4 - Подела шавова по континуитету: а,б,в,г	8
Слика 2.5 - Положаји заваривања – сучеони и угаони, за плоче и цеви	9
Слика 3.1 – Компоненте еквивалентних напона	11
Слика 4.1 – Синусоидна промена напона у односу на време	14
Слика 4.2 – Места појаве заморних прслина	16
Слика 4.3 – а) Концентрације напона, б) дефекти унутар споја, в) заостали напони	17
Слика 4.4 – Заварени спој две плоче различитих дебљина	18
Слика 4.5 – Случајеви постављања шава у односу на оптерећење	19
Слика 4.6 – Постављање шава у области ниског оптерећења	19
Слика 4.7 – Велерова крива у истим условима за два квалитета шава	20
Слика 4.8 – Велеров дијаграм	22
Слика 4.9 – Велерова крива	22
Слика 5.1 – Моделирање елемената вара на примеру Т-споја	28
Слика 5.2 – Моделирање оријентације елемената вара на примеру Т-споја	29
Табела 5.1 – Боје чворова шава и њихова значења	30
Слика 5.3 – Типови шава	30
Слика 5.4 – Креирани МКЕ елементи комбинованих заварених спојева	31
Слика 5.5 – Сучеони спој	31
Слика 5.6 – Рубни спој	31
Слика 5.7 – Т-спој	32
Слика 5.8 – Рубни Т-спој	32
Слика 5.9 – Преклопни спој	32
Слика 5.10 – Могући начини моделирања преклопног завареног споја	32
Слика 5.11 – Пример Т-споја	33
Слика 5.12 – Смер интерполација	34
Слика 5.13 – Тачка процене у односу на елемент шава	35
Слика 6.1 – Геометрија и димензије испитиваног Т-споја (димензије дате у mm)	37
Слика 6.1 – Геометрија и димензије испитиваног Т-споја (димензије дате у mm)	37
Слика 6.3 – Схематски приказ постављеног узорка са позицијама мерних трака	38
Слика 6.4 – Модел „а“ – обичан спој.	38
Слика 6.5 – Модел „б“ – са експлицитно додатим редом ел. који претстављају шав.	39
Слика 6.6 – Модел „в“ – спој са крутим елементима.	39
Слика 6.7 – Модел „д“ - са солид елементима (3D мрежа).	39
Табела 6.1 – Резултати мерења	40
График 6.1 – Резултати мерења на узорку и на моделима	40
График 6.2 – Резултати поновног мерења на узорку и на моделима	41
Табела 6.2 – Резултати поновног мерења	41

<i>Слика 6.8 – S-N крива за коришћени материјал</i>	42
<i>Слика 6.9 – Поставка оптерећења и укљештења примера Т-споја</i>	43
<i>Табела 6.3 – Степени сигурности и напони на датим растојањима дуж шава</i>	43
<i>График 6.3 – Степен сигурности дуж шава Т-споја</i>	44
<i>График 6.4 – Напони дуж шава Т-споја</i>	44
<i>Слика 6.10 – S-N криве – Пример 1</i>	45
<i>Слика 6.11 – Амплитуда напона – Пример 1</i>	46
<i>Слика 6.12 – VonMises напонско стање- Пример 1</i>	46
<i>Слика 6.13 – Схематски приказ примера 2</i>	47
<i>Табела 6.4 – Степени сигурности и напони на датим растојањима дуж шава</i>	47
<i>График 6.5 – Степен сигурности дуж шава сучеоног споја за случај истезања</i>	48
<i>График 6.6 – Напони дуж шава сучеоног споја за случај истезања</i>	48
<i>Слика 6.14 – S-N криве - Пример 2</i>	49
<i>Слика 6.15 – Амплитуда напона - Пример 2</i>	49
<i>Слика 6.16 – VonMises напонско стање- Пример 2</i>	50
<i>Слика 6.17 – Схематски приказ оптерећења и укљештења примера 2</i>	50
<i>Табела 6.5 – Степени сигурности и напони на датим растојањима дуж шава</i>	51
<i>График 6.7 – Степен сигурности дуж шава сучеоног споја за случај смицања</i>	51
<i>График 6.8 – Напони дуж шава сучеоног споја за случај смицања</i>	52
<i>Слика 6.18 – S-N криве - Пример 3</i>	52
<i>Слика 6.19 – Амплитуда напона - Пример 3</i>	53
<i>Слика 6.20 – VonMises напонско стање- Пример 3</i>	53
<i>Слика 6.21 – Модел витла TWS 10030</i>	54
<i>Слика 6.22 – Десна страна кућишта</i>	54
<i>Слика 6.17 – Схематски приказ граничних услова, места притиска и посматраног шава</i>	55
<i>Табела 6.6 – Степени сигурности и напони на датим растојањима дуж шава</i>	56
<i>График 6.9 – Степен сигурности дуж шава</i>	56
<i>График 6.10 – Напони дуж шава</i>	57
<i>Слика 6.24 – S-N криве</i>	57
<i>Слика 6.25 – Амплитуда напона</i>	58
<i>Слика 6.26 – VonMises напонско стање модела</i>	58
<i>Табела 6.7 - Технички подаци о вагону типа Sgmns</i>	59
<i>Слика 6.27 - Скица вагона за превоз контејнера типа Sgmns</i>	59
<i>Слика 6.28 - Изглед вагона Sgmns.</i>	60
<i>Слика 6.29 - Поље ефективног напона</i>	60
<i>Слика 6.30 - Поље ефективног напона</i>	61
<i>Слика 6.31 - Амплитуда напона</i>	61
<i>Слика 6.31 - Амплитуда напона – увећан приказ</i>	61
<i>Слика 6.32 - Степен сигурности – увећан приказ</i>	62
<i>Слика 6.33 - Пукотина на конструкцији</i>	62

Литература

- [1] JUS С.ТЗ.001, Техника заваривања метала - Дефиниције појмова и називи, 1971;
- [2] Седмак А., Шијачки-Жеравчић В., Милосављевић А., и др., Машински материјали, I и II део, Машински Факултет Универзитета у Београду, Београд, 2010;
- [3] Марјановић Н., Методе конструисања, Машински факултет у Крагујевцу, Крагујевац, 1999;
- [4] SRPS ISO/IEC Упутство 2:2007, Закон о стандардизацији, 2005.године;
- [5] Eurocode 3: Design of steel structures: Part 1-9: Fatigue. EN 1993-1-9:2005;
- [6] DIN 15018 Part 1 (1984), "Cranes; principles for steel structures, stress analysis";
- [7] DS 952, Немачки стандард за железничка возила;
- [8] DNV Lifting appliances No 2.22, Det Norske Veritas AS, 2011;
- [9] TSI standard: Commission decision of 28 July 2006 concerning the technical specification of interoperability relating to the subsystem rolling stock: freight wagons of the trans-European conventional rail system. notified under document number C 3345;
- [10] М. Живковић, В. Миловановић, Д. Ракић, С. Вуловић, *НУМЕРИЧКА АНАЛИЗА ЗАВАРЕНИХ СПОЈЕВА ВАГОНСКИХ КОНСТРУКЦИЈА*, Наука-Истраживање-Развој, УДК: 621.791.05: 656.223.4 :519.6, 2011;
- [11] Буђевац Д., Марковић З., Богавац Д, Тошић Д., Металне конструкције – Основе прорачуна и конструисања, Грађевински факултет Универзитета у Београду, Београд 1999;
- [12] SSAB Oxelösund #42, Outline of Fatigue of Welded Joints or Six Ways of Counteracting Fatigue, SSAB Oxelösund AB, Sweden, 2004;
- [13] EN 1992-1-1-2004 Eurocode 2 –Београд Фебруар 2006
- [14] Светислав Јовичић, Ненад Марјановић, Основи конструисања, Машински факултет у Крагујевцу, Крагујевац, 2011;
- [15] Ralph I. S, Ali Fatemi, Robert R. S, Henry O. F., "Metal Faigue in Engineering", 2001;
- [16] Јовичић Г., Живковић М., Вуловић С., *Прорачунска механика лома и замора*, Машински факултет у Крагујевцу, Крагујевац, (2011);
- [17] Којић М., Славковић Р., Живковић М., Грујовић Н., *Метод коначних елемената Линеарна анализа*, Машински факултет у Крагујевцу, Крагујевац, СЦГ, (1998);
- [18] Дуница Ш., Колунџија Б., *Нелинеарна Анализа Конструкција*, Научна књига, Београд, (1986);

- [19] Femfat 4.6 Weld user manual;
- [20] Femfat 4.6 Weld modelling guideline;
- [21] Femfat 4.6 Basic user manual;
- [22] Alewyn Petrus Grové, master thesis "Development of a Finite element Based Nominal Stress Extraction Procedure for Fatigue Analysis of Welded Structures, University of Pretoria, Pretoria, 2006;
- [23] Прорачун статичке и заморне чврстоће вагона за превоз контејнера типа Sgmns, Факултет инжењерских наука, Лабораторија за инжењерски софтвер, Крагујевац, 2011.