

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Мастер академске студије

Модул: Машинске конструкције и механизација

Предмет: Увод у механику лома

Број индекса: 307/2018

Кристина Т. Банић

**Анализа напонско-деформацијског
стања једне заварене металне
конструкције са прслином
Мастер рад**

Комисија за преглед и одбрану:

1. Проф. Др Весна Марјановић, -ментор

2. _____

3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____

У оквиру овог мастер рада кандидат треба да објасни опште појмове и историјат Механике лома. Потребно је размотрити заварене конструкције као и методе прорачуна конструкција. Сажетак рада треба да се заснива на анализи напона и деформација изабране заварене конструкције са прслином.

Препоручена литература:

- [1] Anderson, T.L., Fracture mechanics, Boca Raton, 2005.
- [2] Буђевац, Д., Марковић, З., Богавац, Д., Тошић, Д., Металне конструкције, Грађевински факултет, Београд, 1997.
- [3] Марковић, Б., Машински елементи, Скрипта у електронској форми, Машински факултет, Сарајево, 2016.
- [4] Марјановић, В., Увод у механику лома, Скрипта у електронској форми, Факултет инжењерских наука, Крагујевац, 2020.
- [5] Петковић, З., Острић, Д., Металне конструкције у машиноградњи, Машински факултет, Београд, 1996.

Крагујевац, март 2020. године

Ментор:
Весна Марјановић, проф.др.

САДРЖАЈ

Садржај	
Abstract	4
Резиме	5
1. УВОД.....	6
2.ЗАВАРЕНЕ КОНСТРУКЦИЈЕ	8
2.1. Спајање заваривањем.....	9
2.1.1. Врсте заварених спојева.....	10
2.1.2 Прорачун носивости заварених спојева	15
2.1.3. Конструисање заварених спојева.....	15
2.2. Грешке у шавовима	16
2.3. Контрола квалитета заварених спојева	18
3. МЕТОДЕ ПРОРАЧУНА КОНСТРУКЦИЈА	21
3.1 Метода допуштених напона	22
3.2 Метода граничних стања	24
3.3 Смањење носивости конструкција	25
3.3.1 Замор материјала	25
3.3.2. Крти лом.....	27
3.3.3. Ламеларно цепање заварених спојева	28
4.РАЗВОЈ КОНСТРУКЦИЈЕ	29
5.АНАЛИЗА НАПОНА И ДЕФОРМАЦИЈА	31
6.ЗАКЉУЧАК	48
7.ЛИТЕРАТУРА	49

Abstract

Analysis of stress-strain state of a welded metal structure with a crack

The terms crack and fracture are often used not only in engineering but also in everyday life. In fracture mechanics, a crack means the absence of a bond between two adjacent layers - atoms.

In this master thesis, the stress-strain state of the chassis of a machine for burying cables with a crack is analyzed. The construction can be considered technically acceptable or reliable, if it meets all the requirements regarding safety, functionality and durability. If the safety criterion, for any reason, is not met, there is a fracture of the structure or its part, or loss of stability of the structure as a whole or as a rigid body (overturning, slipping), which results in great material damage, and rarely human victims. The criterion of functionality is reflected in the satisfaction of special requirements important for the smooth functioning of the facility in accordance with its purpose. The durability of the building is primarily influenced by the choice and quality of installed materials, as well as the quality of contractors, but also the structural design of details.

The master thesis contains six chapters: Introduction, Welded Structures, Structural Calculation Methods, Structural Development, Stress and Deformation Analysis and Conclusion. At the end, a list of used literature is given.

The Introduction explains some basic concepts of Fracture Mechanics as well as the historical development of Fracture Mechanics. The chapter on Welded Structures discusses welding joints, types of welded joints, calculation of load capacity of welded joints, Construction of welded joints, Errors in seams as well as Quality control of welded joints.

The third chapter is dedicated to the Permissible Stress Method, the Limit State Method, the Reduction of Structural Load-bearing capacity, which includes Material Fatigue, Fracture, and Lamellar Splitting of Welded Joints.

The fourth chapter presents and describes in more detail the metal welded construction, the material from which it was made and its function.

The fifth chapter is the main part of this paper. It includes analysis of stresses and deformations of the structure with a crack and with loads of 15kN and 30kN as well as with cracks of 1mm and 2.5mm.

The sixth chapter contains a conclusion about the stresses and strains considered in this paper. The list of used literature contains ten references.

Keywords: *Crack, stress, deformation, welded structure, brittle fracture, material fatigue.*

Резиме

Анализа напонско-деформацијског стања једне заварене металне конструкције са прслином

Појмови прслина и лом се често употребљавају не само у техници него и у свакодневном животу. У механици лома се под прслином подразумева одсуство везе између два суседна слоја - атома.

У овом мастер раду анализирано је напонско-деформацијско стање шасије машине за укопавање каблова са прслином. Конструкција се може сматрати технички прихватљивом односно поузданом, ако задовољава све услове у вези сигурности, функционалности и трајности. Уколико критеријум сигурности, из било којег разлога, није задовољен, долази до лома конструкције или њеног дела, односно до губитка стабилности конструкције као целине или као крутог тела (претурање, клизање), што за последицу има велике материјалне штете, а неретко и људске жртве. Критеријум функционалности се огледа у задовољењу посебних захтева битних за несметано функционисање објекта у складу са његовом наменом. На трајност објекта, пре свега, утичу избор и квалитет уграђених материјала, као и квалитет извођачких радова, али и конструкцијско обликовање детаља.

Мастер рад садржи шест поглавља и то: Увод, Заварене конструкције, Методе прорачуна конструкција, Развој конструкције, Анализа напона и деформација и Закључак. На крају је дат и списак коришћене литературе.

У Уводу су објашњени неки основни појмови Механике лома као и историјски развој Механике лома. У поглављу о Завареним конструкцијама разматрано је спајање заваривањем, врсте заварених спојева, прорачун носивости заварених спојева, Конструисање заварених спојева, Грешке у шавовима као и Контрола квалитета заварених спојева.

Треће поглавље је посвећено Методи допуштених напона, Методи граничних стања, Смањењу носивости конструкције а то подразумева Замор материјала, Крти лом, и Ламеларно цепање заварених спојева.

У четвртном поглављу је представљена и детаљније описана метална заварена конструкција, материјал од кога је израђена као и њена функција.

Пето поглавље представља главни део овог рада. Обухвата анализу напона и деформација конструкције са прслином а са оптерећењима од 15kN и 30kN као и са прслинама од 1mm и 2.5mm.

Шесто поглавље садржи закључак о напонима и деформацијама разматраним у овом раду.

Списак коришћене литературе садржи десет референци.

Кључне речи: *Прслина, напон, деформације, заварена конструкција, Крти лом, замор материјала.*

1. УВОД

Корене Механике лома можемо тражити у првим опасним испитивањима механичких особина и лома. Леонардо да Винчи, као и Галилео Галилеј су такође проучавали ове области вршећи различите врсте експеримената, али су били ограничених могућности сходно времену у којем су живели. Бројни су случајеви појаве лома, који су увек привлачили пажњу пројектаната и произвођача материјала. У литератури могу да се нађу неки случајеви катастрофалних ломова. Дубљим проучавањем дошло се до закључка да су изабрана лоша конструкциона решења, али у многим случајевима је било и грешке у материјалу. Развојем метода Математичке анализе и посебно Механике континуума омогућило је напредак у познавању материјала. Напредак у технологији челика довео је до његове велике експлатације, као и до великог броја ломова различитих конструкција (бродова, мостова...). После другог светског рата Механици лома се придаје велики значај, такође креће интензивније да се развија. Ниво развоја који је до данас постигнут у Механици лома омогућава њену практичну примену у веома важним подручјима пројектовања и конструисања. [L1,2,6,7]

Појмови прслина и лом се често употребљавају не само у техници него и у свакодневном животу. У механици се под прслином подразумева одсуство везе између два суседна слоја - атома. Теоријска чврстоћа материјала је максимални напон који идеалне решетке (без дефеката) може да пренесе без прекида атомских веза и зависи пре свега од типа атомских (кохезионих) сила које спречавају одвајање суседних атома.

На основу атомске решетке постоје четири основна дефекта и то:

- дислокација,
- атомска шупљина,
- страни атом у решетки
- атом померен са свог места

Дуктилност (пластичност) је особина материјала да пластично тече при оптерећењу. Сви материјали нису пластични (дуктилни). У материјалима као што су стакло, керамика или гвожђе до лома долази нагло и без приметне пластичне деформације што се објашњава таквом унутрашњом структуром која не допушта несметано клизање дислокације. поменуте материјали сматрамо кртим.

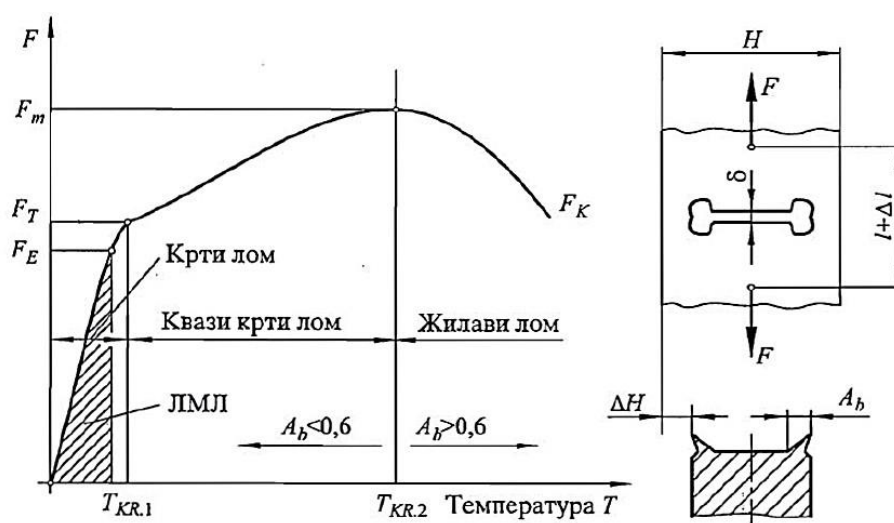
Кртост је особина материјала који се деформишу пластично. Деформација кртих материјала карактерише:

- кидање атомских веза;
- одсуство преостале деформације по растерећењу конструкције.

Ниво пластичности (дуктилности) зависи од температуре, брзине деформације, стања напона и величине зрна.

Крти лом обично настаје попречно на правац главних нормалних напона, а површина прелома је светла без видљивих деформација на месту лома.

Зависно од услова лома може доћи до кртог, квази-кртог или жилавог лома. Појава једног или другог карактера зависе од температуре испитивања. Прелазак жилавог лома у квази крти лом дефинише се првом критичном температуром (T_{KR1}), а квази кртог у крти другом критичном температуром (T_{KR2}), слика 2. прва критична температура означава почетак смањења локалних пластичних деформација и оцењује се по уделу жилавог прелома у укупној површини прелома. Друга критична температура се одређује при снижењу номиналних напрезања на лом.



F_m - Максимална сила,
 F_E - Сила која одговара граници еластичности,
 δ - Отварање прслине,
 ΔH - Смањење дебљине,
 ЛМЛ - Подручје у коме важи линеарна Механика лома
 F_T - Сила која одговара граници течења,
 F_K - Сила лома,
 Δl - Издужење,
 A_b - Удео пластичног дела лома,

Слика 1- Карактеристике деформације и лома при статичком затезању епрувете са прслином у зависности од температуре.[L6]

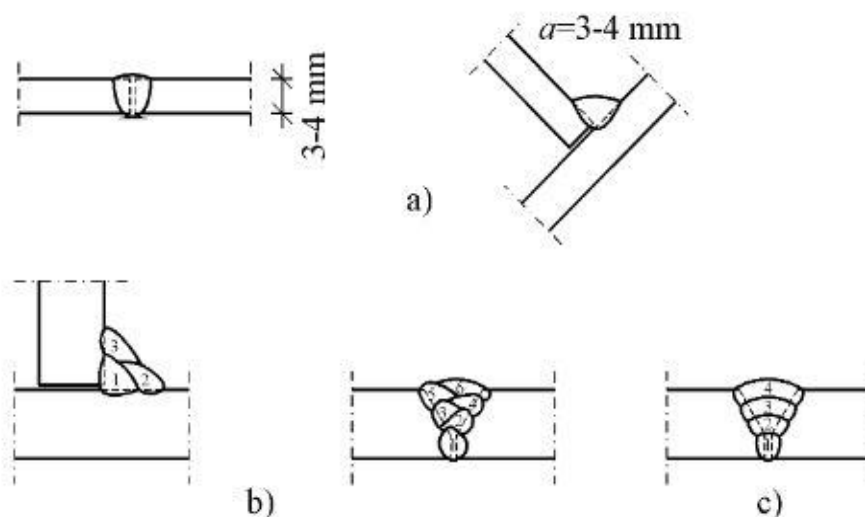
Заваривање је технолошки поступак за спајање истих или сличних метала. Спајање елемената се остварује уз помоћ високе температуре која изазива топљење додатног и основног материјала на месту споја. Растопи основног и додатног материјала (електроде или жице за заваривање) се међусобно мешају и долази до њиховог физичког и хемијског сједињавања. Након хлађења долази до очвршћавања, чиме се ствара шав, као физички континуитет материјала. На овај начин се остварује континуалан спој елемената који се заварују.

Основни материјал је материјал од кога су израђени елементи (делови) који се спајају заваривањем. Додатни материјал је материјал (најчешће жица за заваривање или електрода) који се при заваривању топи и, мешањем са растопљеним металом основног материјала у зони шав, образује растоп који, након хлађења и очвршћавања, формира

шав. Додатни материјал мора да се изабере на адекватан начин како би се омогућило што боље и брже попуњавање жљеба и добро сједињавање са основним материјалом.

Спој одређује међусобни положај делова који се спајају. Шав је материјализовано место спајања, односно материјал између делова који се спајају добијен топљењем додатног и основног материјала на месту споја. Зона утицаја топлоте (ЗУТ) је зона у основном материјалу непосредно уз шав у којој је, услед високих температура (преко 600°C) које настају у растопу приликом заваривања, дошло до структурних промена.

Жљеб је простор предвиђен за депоновање додатног материјала приликом заваривања. Његов облик зависи од врсте споја и дебљине елемената који се спајају. Основна функција жљеба је да се омогући правилно растапање по дебљини основног материјала и добро испуњавање споја растопом. Завар је део шава добијен топљењем додатног материјала у једном пролазу. Код сучеоних спојева танких елемената, дебљине 3-4 mm, као и код угаоних шавова мањих димензија шав може да се изведе само једним заваром (слика 2а). Завар који се прво изводи назива се корени завар. Остали завари могу да се изводе паралелно са осом жљеба, (слика 2б) или управно на њу (слика 2ц).



Слика 2. Поступак израде шавова: а) из једног завара; б) из више завара паралелних са осом жљеба; ц) из више завара управних на осу жљеба[L2]

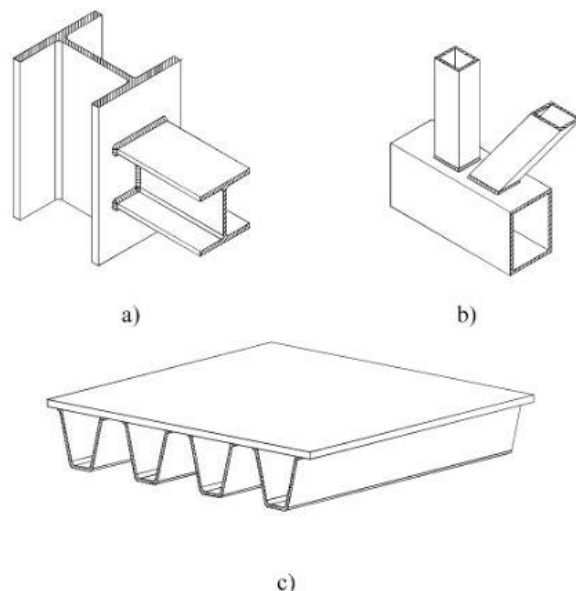
Заварљивост је способност материјала да може да се завари. Разликују се:

- Оперативна заварљивост, као могућност да се оствари материјални континуитет између елемената који се спајају без појаве грешака,
- Металуршка заварљивост, као услов добијања шава захтеваног квалитета и
- Конструктивна заварљивост, као способност формираног шава да се под оптерећењем понаша као и основни материјал.

2. ЗАВАРЕНЕ КОНСТРУКЦИЈЕ

У Југославији се прва опрема за гасно заваривање појавила 1909. Године. Прво електролучно заваривање је изведено 1926.године, на заваривању железничких шина. Недостатак стручних кадрова и домаће опреме су успорили развој заваривања. Тек пред Други светски рат започиње бржи развој. Након завршетка рата, Југославија се

брзо укључује у трансфер знања и технологије из области заваривања. До данас је и код нас изведен велики број значајних металних конструкција у завареној изради. Неколико карактеристичних примера заваривања у металним конструкцијама приказано је на слици 3. [L2]



Слика 3. Примери примене заваривања у металним конструкцијама: а) веза греде са стубом; б) чвор решеткастог носача; ц) ортотропна плоча [L2]

Са применом заваривања у грађевинским конструкцијама отпочела је нова ера металних конструкција. Данас је израда металних конструкција готово незамислива без примене заваривања, које се примењује при изради профила и њихових веза.

2.1. СПАЈАЊЕ ЗАВАРИВАЊЕМ

За разлику од спојева изведених помоћу завртњева или закивака, код којих се сила са једног елемента предаје на други дисконтинуално, заварени спојеви омогућавају континуалан ток сила дуж линија шавова, који је логична последица оствареног материјалног континуитета. Код сучеоних спојева тај ток је непоремећени равномеран, док је веза остварена помоћу угаоних шавова, због скретних сила, ток сила мало поремећен. [L2,4,5]

Заваривање се примењује за израду основних елемената металних конструкција, широког асортимана, као што су И, У, сандучасте, кружни и други профили. Елементи се спајају директно, без додатних елемената као што су појасни угаоници код закованих носача и штапова, чиме се знатно штеди на основном материјалу. Осим тога, нема слабљења елемената услед рупа за закивке, па је њихова носивост већа. Лаким варирањем ширине и дебљине елемената дуж распона носача у зависности од промене статичких утицаја, носивост носача се усклађује са његовим напрезањима. На тај начин се остварује правилан баланс материјала, односно његова расподела сразмерно стварним статичким потребама, што може знатно да утиче на смањење тежине, а самим тим и цене конструкције. Посебно треба истаћи примену заваривања при изради закривљених елемената и елемената сложене геометрије.

Такође, заваривање се примењује за израду веза између мањих или већих склопова металних конструкција. Овакве везе се изводе брзо, квалитетне су и економичне. Њима се омогућава добро искоришћење носивости основног материјала, а додатни елементи у виду подвезица најчешће нису потребни. Везе елемената под углом различитим од 90° које су представљале посебан проблем код веза са закивцима, ефикасно се изводе у завареној изради.

Уколико је потребно да се изврши ојачање конструкције или њеног дела, као и у случају додавања нових елемената, то може једноставно да се изведе заваривањем. При томе треба водити рачуна да се приликом интервенције на постојећој конструкцији омогући њено растерећење (подупирање), јер при заваривању услед загревања постојеће конструкције долази до привременог, драстичног пада механичких карактеристика, који може да проузрокује лом конструкције.

Непропусност заварених спојева је неупоредиво боља него код спојева остварених за-вртњевима и закивцима. Заварени спој је водонепропустљив, што пружа велике могућности за примену металних конструкција за израду резервоара, силоса и бункера, хидротехничких објеката (нпр. затварача брана) итд.

2.1.1. ВРСТЕ ЗАВАРЕНИХ СПОЈЕВА

У зависности од међусобног положаја елемената који се заварују, разликују се следеће врсте спојева: [L2,4,7]

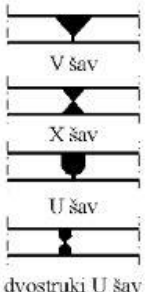
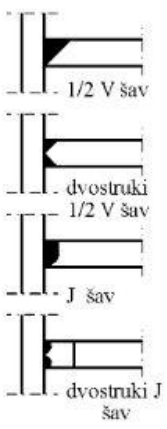
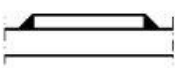
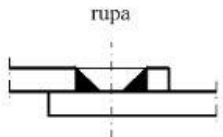
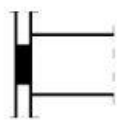
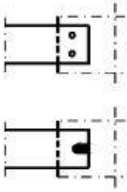
- сучеони спојеви,
- угаони или Т - спојеви,
- преклопни спојеви.

Поменути спојеви могу да се остваре помоћу различитих врста шавова. У савременим металним конструкцијама углавном се примењују следеће врсте шавова:

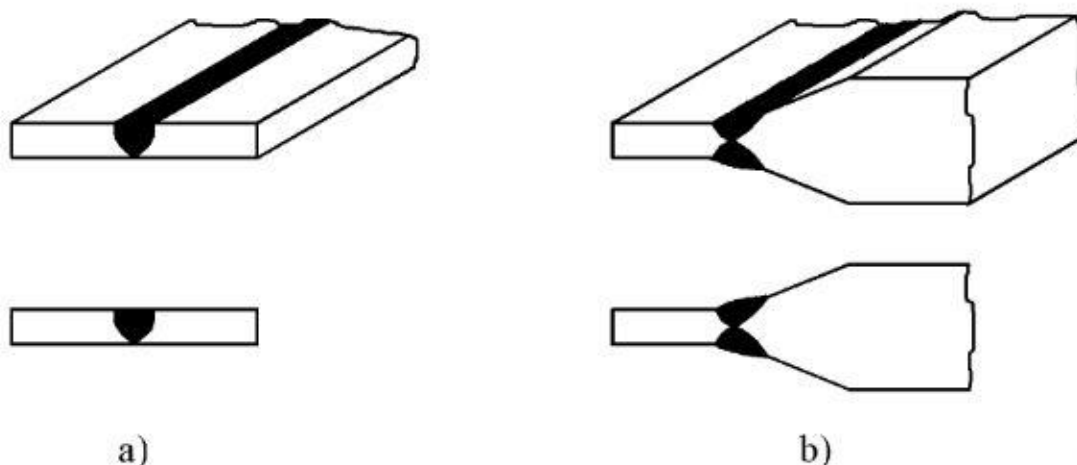
- сучеони шавови са пуном пенетрацијом,
- сучеони шавови са делимичном пенетрацијом,
- угаони шавови,
- шавови у рупама (кружним или елиптичним),
- чеп шавови и
- ужљебљени шавови

Који ће се шав применити зависи од врсте споја, врсте и величине напрезања, дебљине елемената који се спајају и технолошког поступка који се примењује при заваривању. Такође треба истаћи да се не могу користити сви типови шавова за све три врсте спојева. Прегледни приказ врста спојева и шавова дат је у оквиру табеле 1.

Табела 1. Преглед уобичајених врста спојева и шавова.[L2]

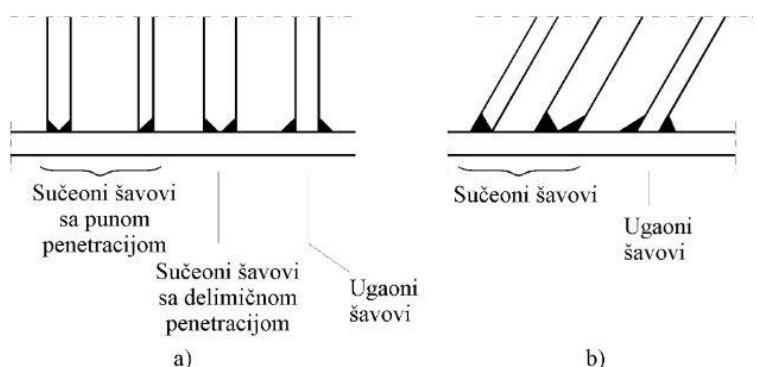
Vrsta šavova	Vrsta spoja		
	Sučeoni spoj	Ugaoni spoj	Preklopni spoj
Sučeoni šavovi sa punom penetracijom	 V šav X šav U šav dvostruki U šav	 1/2 V šav dvostruki 1/2 V šav J šav dvostruki J šav	-
Sučeoni šavovi sa delimičnom penetracijom	 dvostruki V šav dvostruki U šav	 dvostruki 1/2 V šav ojačan ugaonim	-
Ugaoni šavovi	-		
Šavovi u rupama	-	-	 rupa
Čep šavovi	-		

Сучеони спојеви су спојеви код којих елементи који се спајају леже у истој равни. Ови спојеви могу да се изведу помоћу сучеоних шавова са пуном или делимичном пенетрацијом. Могу да се користе за спајање елемената исте (слика 4а), или различите дебљине (слика 4б).



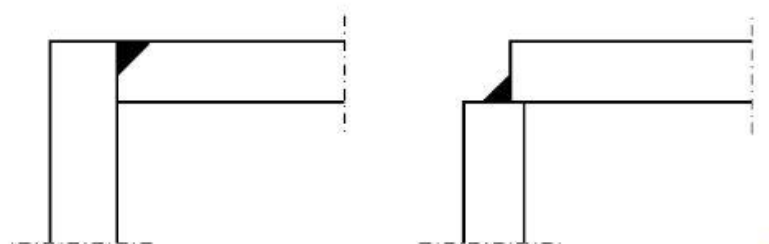
Слика 4. Сучеони спојеви елемената: а) исте дебљине; б) различите дебљине[L2]

Угаони спојеви се изводе између елемената који међусобно заклапају одређени угао, различит од 180° . Најчешће се елементи који се спајају налазе под правим углом (слика 5а), али тај угао може да буде и кос (слика 5б), у ком случају се угаони спојеви називају коси угаони спојеви. Угаони спојеви могу да се изведу помоћу сучеоних шавова са пуном или делимичном пенетрацијом или помоћу угаоних шавова.



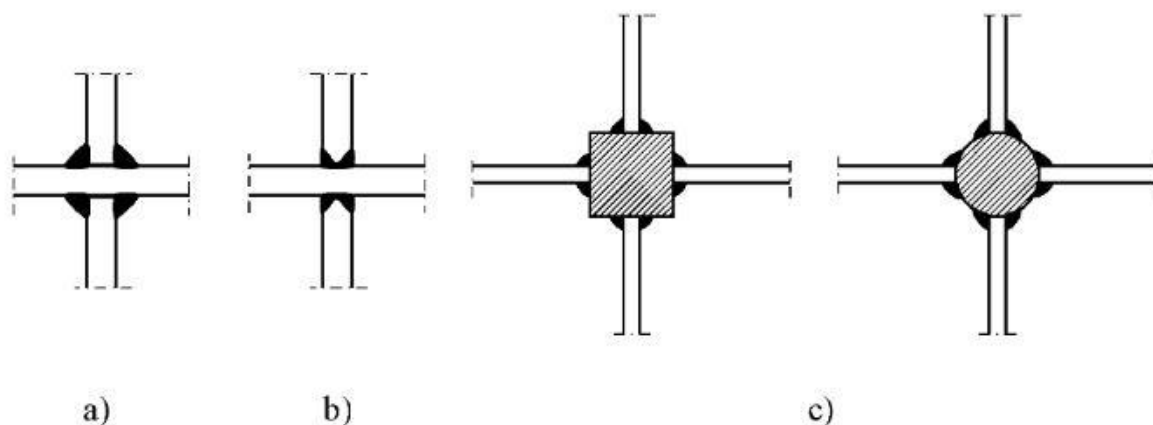
Слика 5. Угаони спојеви са сучеоним и угаоним шавовима: а) прави; б) коси[L2]

Када се један од елемената који се спајају не прекида на месту споја (слика 5) спој се назива *непрекинути угаони спој*. Уколико се оба елемента прекидају на месту споја (слика 6) такви спојеви се називају *прекинути угаони спојеви*. Прекинути спојеви могу да буду отворени (слика 6а) и затворени (слика 6б). Код отворених спојева елементи који се спајају су смакнути један у односу на други, тако да се њихове везе изводе помоћу угаоних шавова. Код затворених спојева површине елемената су у истој равни тако да се изводи сучеони спој.



Слика 6. Прекинути угаони спојеви: а) отворени; б) затворени [L2]

Крстасти спојеви представљају посебан вид угаоних спојева код којих елементи који се спајају образују крст (слика 7). Спој се остварује помоћу угаоних (слика 7а) или сучеоних шавова (слика 7б), или њиховом комбинацијом. Овакви спојеви су неповољни, јер због нагомилавања шавова на једном месту долази до концентрације напона. При заваривању шавова са друге стране, долази до поновног загревања већ изведених шавова и основног материјала, што може да изазове прекристализацију основног материјала. Ово је посебно опасно код лимова мале дебљине. Због тога се крстасти спојеви избегавају код лимова тањих од 7 mm. Уколико је неопходно да се овакав спој изведе код изузетно оптерећених елемената, тада се прибегава посебном конструкционом обликовању. Сви елементи се прекидају на месту споја и умеће се квадратни или округли челични профил за који се заварују прекинути делови споја (слика 7ц).



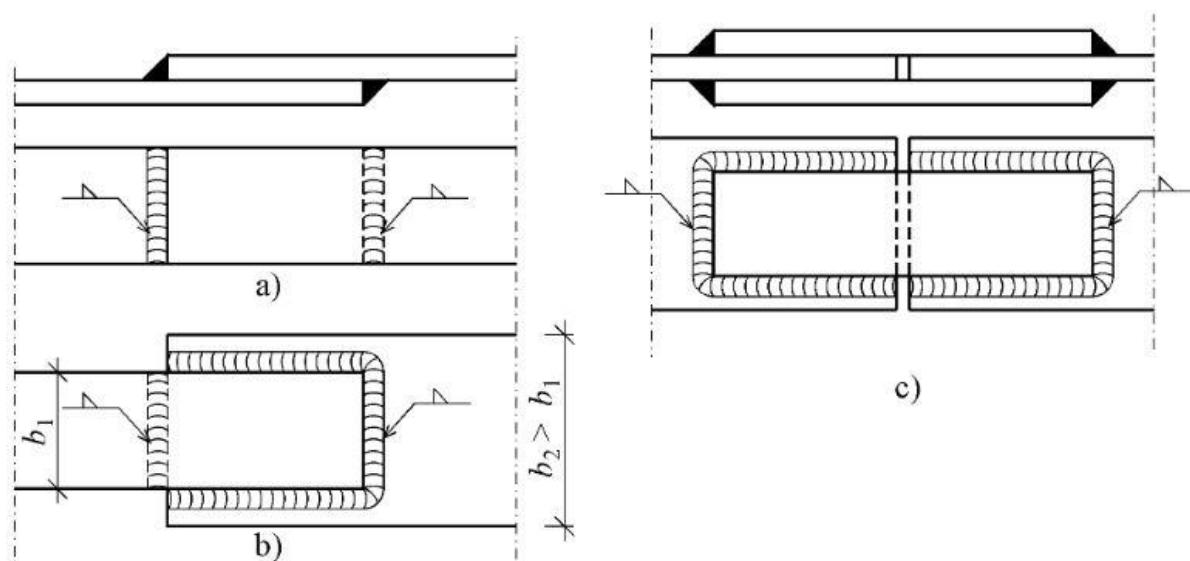
Слика 7. Крстасти спојеви: а) са угаоним шавовима; б) са сучеоним шавовима; в) са уметнутим округлим или квадратним челичним профилем[L2]

Преклопни спојеви су спојеви између преклопљених елемената који леже у две паралелне равни. Постоје две врсте преклопних спојева:

- директни преклопни спојеви и
- преклопни спојеви са подвезицама.

Директни преклопни спојеви се јављају код елемената који су међусобно преклопљени на одређеној дужини. Спој се изводи помоћу угаоних шавова. Уколико су елементи који се спајају исте ширине, тада се изводе само чеони угаони шавови са обе стране (слика 8а). Ако је један елеменат ужи од другог, тада се изводе и бочни (подужни) и чеони угаони шавови (слика 8б).

Преклопни спојеви са подвезицама се изводе када се елементи који се спајају налазе у истој равни. Са обе стране ових елемената се постављају подвезице, које треба да буду уже од основних елемената како би се омогућило њихово заваривање за елементе споја помоћу угаоних шавова по читавом обиму (слика 8ц). Примена оваквих спојева је, са становишта напрезања шавова и самих елемената, повољнија, јер се избегава ексцентрично напрезање. Међутим, неопходни су додатни елементи (подвезице) за остваривање везе, чиме се повећава утрошак материјала.



Слика 8. Преклопни спојеви: а) и б) директни преклопни спојеви; ц) преклопни спојеви са подвезицама[L2]

Табела 2. Основне ознаке шавова[L2]

Naziv šava	Izgled	Oznaka
I - šav		
V - šav		
V - šav sa provarenim korenom		
1/2V - šav		
K - šav		
X - šav		
U - šav		
Ugaoni šav		

2.1.2. ПРОРАЧУН НОСИВОСТИ ЗАВАРЕНИХ СПОЈЕВА

Од заварених конструкција захтева се да имају одговарајућу носивост, што подразумева њихов детаљан прорачун и узимање у обзир свих утицајних фактора. Прорачун мора да обухвати комплетну конструкцију укључујући и саме заварене спојеве. Зависно од врсте конструкције (машиноградња, челичне конструкције, кранови) примењују се различити поступци прорачуна. Заварени спојени су у експлоатационим условима напрегнути на истезање и притисак, савијање, увијање и смицање. Врло често се јављају и сложена напрезања, као комбинација наведених основних напрезања. Напрезања зависно од радних услова могу бити статичка и динамичка.[L2]

Прорачун носивости се према томе своди на одређивање радних и критичних напона за одговарајуће врсте напрезања и одговарајућих степене сигурности. Наравно, при томе треба узети у обзир све утицајне факторе везане за врсту и квалитет заварених спојева, технологију израде и експлоатационе услове.

Радни напони су номинални напони у шаву, одређени на основу оптерећења које се јавља у експлоатационим условима. Зависно од врсте оптерећења, радни напони су нормални, тангентни или еквивалентни напони који се одређују према изразима из Отпорности материјала, узимајући у обзир и специфичности заварених спојева. Носећу површину завареног споја представља попречни пресек шавова који преноси оптерећење између спојених делова.

2.1.3. КОНСТРУИСАЊЕ ЗАВАРЕНИХ СПОЈЕВА

Правилно конструисање заварених склопова игра пресудну улогу у остваривању услова за правилан рад заварених спојева. Оно треба да омогући:[L2,10]

- Лако извођење завареног споја. Спој мора да буде приступачан, а положај заваривања што једноставнији;
- Примену уобичајених поступака заваривања. На избор поступка заваривања утиче квалитет материјала, дебљина лимова, место споја, захтевани квалитет споја, место извођења заваривачких радова (на градилишту или у радионици) итд.;
- Примену заварених монтажних наставака у што мањем броју;
- Извођење шавова са што мањим димензијама. На тај начин се штеди додатни материјал и избегава велико уношење топлоте у ЗУТ;
- Правилан избор врсте и квалитета шавова, као и врсте споја. Извођење угаоних шавова је јефтиније од извођења сучеоних шавова. Шавове специјалног и И-квалитета треба примењивати када за то стварно постоји потреба, јер су знатно скупљи;
- Оптималан положај заваривања. Ако је могуће треба увек примењивати извођење шавова у хоризонталном положају, а шавове изнад главе треба избегавати;
- Равномернији ток сила, чиме се избегавају концентрације напона;
- Мање деформације у конструкцији услед заваривања;
- Прихватљиве вредност сопствених напона насталих услед заваривања.

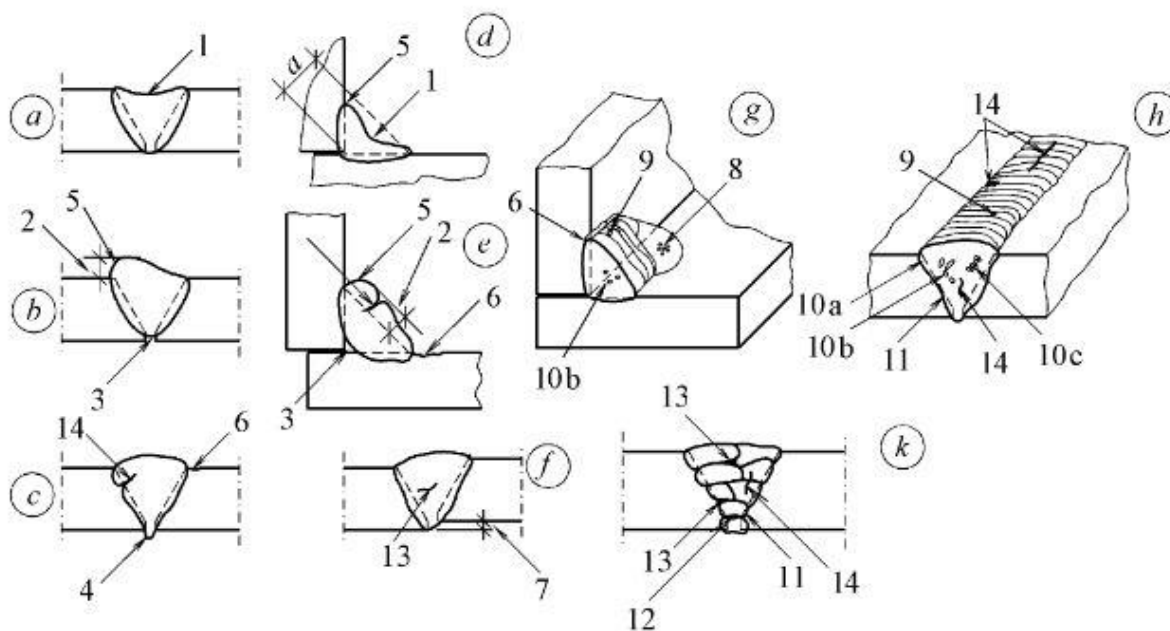
Правилном конструисању заварених елемената мора да се посвети посебна пажња у фази пројектовања и израде радионичке документације за челичну конструкцију.

2.2. ГРЕШКЕ У ШАВОВИМА

Заваривање је поступак којим се омогућава континуирање два или више елемената у споју. Том приликом долази до металуршких, хемијских и физичких промена у елементима. Како се ради о врло комплексном технолошком поступку, на који утичу многи фактори, приликом заваривања могу да настану одређене грешке. Најважнији елементи који утичу на појаву грешака у шавовима су: врста и хемијски састав материјала који се заварује, врста технолошког поступка и примењена опрема, врста додатног материјала, квалификованост радника који изводи заваривање, услови под којим се изводи заваривање и др. Неке од тих грешака немају велики утицај на понашање завареног споја под дејством оптерећења, док друге имају веома неповољан утицај. Познавање узрока настанка грешака, врста грешака и њиховог утицаја на понашање конструкције су од пресудног значаја за сагледавање поузданости заварене конструкције и економичности њеног извођења.[L2,4]

Грешке у шавовима су приказане на слици 10 и могу да се сврстају у две групе:

- димензионалне грешке или грешке облика и
- структурне грешке или грешке компактности.



Слика 9. Грешке у шавовима[L2]

У димензионалне грешке спадају:

1. недовољно испуњавање жљеба (слика 9. а,д),
2. превелико надвишење шавови (слика 9. б,е),
3. непроварен корен шавови (слика 9. б,е),
4. прокапине на месту корена шавови (слика 9. ц),
5. оштар прелаз између шавови и основног материјала (слика 9. б,д,е),
6. зарез на ивици шавови (слика 9. ц,е,г),
7. денивелација елемената у жљебу (слика 9. ф),
8. кратери на почетку и крају шавови (слика 9. г),

9. рупичавост површине шава (слика 9. г,х).

У грешке компактност спадају:

10а. гасне поре (слика 9. х),

10б. расути мехури (слика 9. г,х),

10ц. мехури у ланцу (слика 9. х),

11. недовољно урањање растопа у основни материјал - налепљивање (слика 9. х,к),

12. грешке проваривања корена (слика 9. к),

13. укључци троске (слика 9. ф,к),

14. подужне и попречне прслине у унутрашњости шава (слика 9. ц,х,к) или на лицу шава (слика 9. е,х).

Услед грешака у шавовима долази до концентрација напона па, у случају појаве зареза, прслина или већих укључака троске или ваздуха, напони у овим тачкама могу чак да буду већи од напона на граници развлачења. У случају затезања, због смањене дуктилноности материјала у зони утицаја топлоте долази до формирања прслина у материјалу које се под дејством динамичког оптерећења проширују. Ове појаве биле су узрок рушења неколико конструкција. Посебно су осетљиве динамички оптерећене конструкције и конструкције које су изложене дејству ниских температура. Степен ризика услед грешака насталих при заваривању металних конструкција зависи од: *врсте грешке, врсте напрезања и карактера оптерећења.*

Нису све грешке подједнако опасне. Уколико се правци грешака поклапају са правцем тока сила оне су мање опасне од грешака управних на ток сила, као што су на пример подужне и попречне прслине, непроварен корен, недовољна висина шава и надвишење.

Са становишта врсте напрезања најнеповољније је затезање. Концентрације напона које настају у затегнутим елементима услед грешака у шавовима проузрокују стварање прслина или пропагацију (проширење или продужење) постојећих прслина. Поред тога, грешке у шавовима као што су укључци троске и ваздуха, прслине, непроварен корен, недовољна висина шава итд. Изазивају смањење њихових димензија, односно пројектованих бруто површина шавова које преносе оптерећење. Напонска стања притиска су много повољнија, јер код њих не долази до значајних концентрација напона. Међутим, код грешака као што су недовољна висина шава и непроварен корен, због смањења бруто површине попречног пресека шава и појаве ексцентричног напрезања у споју, услед непоклапања тежишта површине шава и површине елемената који се спајају, и код притиснутих елемената може доћи до значајног смањења носивости.

У погледу врсте напрезања динамички оптерећене конструкције су знатно подложније негативним утицајима услед грешака у шавовима. Код статички напрегнутих конструкција многе грешке у шавовима нису опасне, сем оних које директно угрожавају носивост споја. Код динамички напрегнутих конструкција, а поготово код спојева напрегнутих на затезање, грешке у шавовима могу да проузрокују концентрације напона које изазивају појаве прслина у шавовима. Ово произилази из чињенице да услед промене смера оптерећења не може да се изврши постепена прерасподела сила пластификацијом појединих делова попречног пресека. Та способност пластификације је знатно смањена у зут-у због прекристализације основног материјала.

Димензионалне грешке шавова су видљиве голим оком и могу да се открију једноставним приручним помагалима. Неке од тих грешака је могуће отклонити (нпр.

надвишење шавова може се скинути брушењем). Ово треба да се изведе скидањем надвишења у правцу тока сила да се не би створио попречни зарез. Код јако напрегнутих сучеоних спојева обавезно се захтева брушење шавова. У том случају основним ознакама шавова се додају ознаке: ∇ - када се захтева равна површина лица шавова или $\nabla\nabla$ - када се захтева равна и глатка површина лица шавова. Дозвољена одступања димензија шавова су ограничена прописима за толеранцију мера и облика код носећих челичних конструкција. Од извођача заваривачких радова се тражи извођење шавова са димензијама датим у техничкој документацији то без смањења димензија шавова. Надвишење шавова се толерише до 10% од најмање дебљине у споју, код сучеоних шавова, односно од дебљине угаоног шавова, с тим да је максимално надвишење 2 mm. Уколико постоји зарез, тада се брушење изводи тако да се створи благи прелаз између елемената у споју. При томе основни материјал не сме да се ослаби више од 5%. Поред дозвољених грешака прописују се и дозвољена одступања димензија жљебова (табела 3).

Међународни институт за заваривање је извршио класификацију свих грешака у шавовима и сврстао их у шест група. Групе су означене троцифрним целим бројевима. Основне ознаке су:

- 100 пррлине,
- 200 порозност и друге шупљине,
- 300 укључци,
- 400 налепљивање и непроварен корен,
- 500 грешке облика и
- 600 остале грешке.

Табела 3. Дозвољена одступања димензија шавова и жљебова[L2]

Način zavarivanja	Veličina	Izgled spoja				
Ručno elektrolučno (E)	p	$\leq 2 \text{ mm}$			$+2 \text{ mm}; -1 \text{ mm}$	
	d	$+2 \text{ mm}; -1 \text{ mm}$			–	–
	a	–	$\pm 5^\circ$			–
	ℓ	–	–	–	$\pm 5 \text{ mm}$	$\pm 6 \text{ mm}$
Automatsko pod praškom (EPP)	p	$\leq 1 \text{ mm}$			$\pm 0,5 \text{ mm}$	$\pm 0,8 \text{ mm}$
	d	$\pm 0,5 \text{ mm}$	$\pm 0,8 \text{ mm}$	$\pm 0,8 \text{ mm}$	–	–
	a	–	$\pm 5^\circ$			–
	ℓ	–	–	–	$\pm 5 \text{ mm}$	$\pm 6 \text{ mm}$

2.3. КОНТРОЛА КВАЛИТЕТА ЗАВАРЕНИХ КОНСТРУКЦИЈА

Шав има функцију да споји делове конструкције у јединствену конструктивну целину како би она била способна да пренесе одговарајућа оптерећења или испуни другу поверену јој функцију. Стога је поузданост квалитета изведеног шавова од пресудног значаја за понашање споја, како у погледу поверене му функције, тако и у погледу

понашања конструкције као целине. Обим и врста контроле квалитета шавова зависи од интензитета и врсте напрезања шавова, као и од значаја тог шавова за целу конструкцију. Због тога је врло важно познавати функцију и значај шавова у конструкцији и проценити неопходан и довољан обим и врсту контроле. Некономично је и непотребно све шавове подврћи строгој контроли. Чак и свака откривена грешка у шаву не значи да је треба отклонити или ублажити. [L2]

Пре приступања контроли квалитета изведеног шавова неопходно је знати следеће чињенице:

- којим технолошким поступком је изведено заваривање и ниво стручности радника,
- врсту материјала, његове карактеристике, дебљину елемената и понашање при заваривању,
- тип и значај конструкције,
- значај појединих шавова у конструкцији (статички или конструктивни шав),
- начин напрезања конструкције (статичко или динамичко),
- врсту напрезања (затезање или притисак) и интензитет напрезања,
- радна температура конструкције.

Међународни институт за заваривање је направио каталог референтних радиографија (еталона) са класификацијом грешака. Откривене грешке се упоређују са овим еталонима и на тај начин се врши њихова класификација. Проблем не представља откривање грешке, већ одлука шта радити са утврђеном грешком. Тешко је нумерички и експлицитно тврдити колики је ризик лома и рушења конструкције услед откривене грешке. Проблем је врло комплексан и задире у област Механике лома. Многи феномени, а нарочито услови под којим настаје неконтролисано ширење прслине, ни до данас нису у потпуности расветљени.

Међу многобројним методама контроле квалитета шавова, најзначајније су следеће методе контроле без разарања:

- визуелна контрола,
- радиографска контрола,
- ултразвучна контрола,
- магнетска или електромагнетска контрола,
- пенетрацијска контрола.

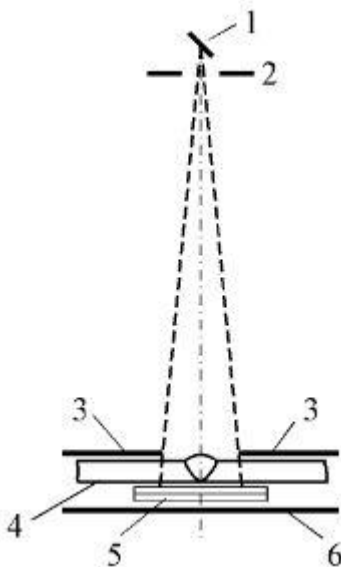
Визуелна контрола се обавља детаљним прегледом шавова, од стране квалификованог лица, а у смислу провере квалитета извођења, потребних димензија шавова, постојања неравнина, зареза, кратера, непровареног корена, површинских пора и напрслина.

Радиографска контрола (Рс) се састоји у снимању шавова радиографским путем и може да се врши у радионици и на монтажи. Уређај за снимање (слика 10) је преносив и састоји се од: командног ормана, произвођача високог напона, високонапонских каблова, рендгенске цеви, уређаја за хлађење и сталка.



Слика 10. Рендген уређај за радиографску контролу [L2]

Поступак контроле (слика 11) се састоји у постављању филма са осетљивом емулзијом (5) са једне стране завареног споја (4). Филм се налази у посебној фолији (6), најчешће од олова, како би се појачала експозиција фотоемулзије и спречило расипање рендгенских зрака. Са друге стране споја поставља се локализација шавова (3) кроз коју пролазе рендгенски или гама зраци из рендгенске цеви (1), кроз бленду (2).



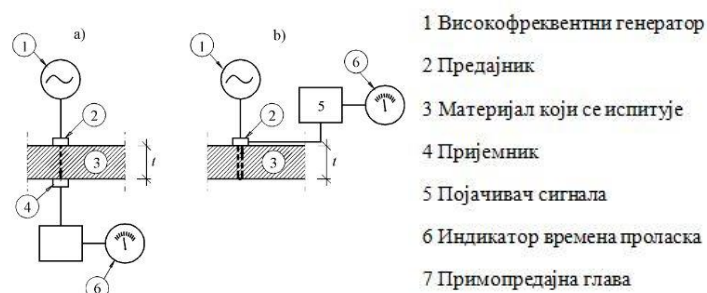
Слика 11. Шематски приказ радиографске контроле [L2]

Ултразвучна контрола је метода испитивања без разарања помоћу које могу да се одреде врста, место и величина грешака компактности у шавовима. За испитивање се користе ултразвучни таласи са високом фреквенцијом (0,5-15 MHz). Брзина простирања ултразвучних таласа кроз одређену средину зависи од запреминске масе материјала (ρ), динамичког модула еластичности (E_D) и динамичког Пуасоновог коефицијента (ν_D). Дакле, брзина простирања ултразвучних таласа је

константна за одређене врсте материјала и износи: за челик $v=5850$ m/s, а за алуминијум $v=6300$ m/s. Ови подаци важе за компактне, неоштећене материјале. Уколико на путу ултразвук наиђе на метални дисконтинуитет, односно на грешку у шаву, он се одбија или продужава даље ослабљеним интензитетом, у зависности од таласне дужине (1).

Генерално се разликују две методе испитивања, односно контроле шавова, које се заснивају на мерењу брзине лонгитудиналних ултразвучних таласа:

- метода прозвучавања (слика 12а),
- ехо метода (слика 12б).



Слика 12. Шематски приказ ултразвучних метода контроле квалитета шавова: а) метода прозвучавања; б) ехо-метода [L2]

Метода прозвучавања се заснива на мерењу интензитета таласа послатог преко предајника (одашиљача) и интензитета примљеног таласа, регистрованог помоћу пријемника. Уколико постоји разлика у интензитету послатих и примљених ултразвучних таласа, значи да су они на свом путу наишли на материјални дисконтинуитет, односно грешку.

Ехо метода се заснива на особини ултразвучних таласа да се при наиласку на површину (ивицу) метала рефлектују (слично светлосним зрацима) под углом који је једнак упадном углу и без значајнијих губитака интензитета. Код ове методе упоређују се интензитети послатог и примљеног таласа. Одашиљање и пријем таласа врши се помоћу примопредајне главе.

3. МЕТОДЕ ПРОРАЧУНА КОНСТРУКЦИЈА

Конструкција се може сматрати технички прихватљивом односно поузданом, ако задовољава све услове у вези сигурности, функционалности и трајности. Најважнији од ових критеријума који при пројектовању треба да су задовољени јесте критеријум сигурности. Конструкција мора да буде прорачуната (димензионисана) тако да са одговарајућим степеном сигурности прихвати сва очекивана оптерећења која ће се јавити током њеног животног века, односно у фази монтаже и за време предвиђеног експлоатационог периода. Уколико критеријум сигурности, из било којег разлога, није задовољен, долази до лома конструкције или њеног дела, односно до губитка стабилности конструкције као целине или као крутог тела (претурање, клизање), што за последицу има велике материјалне штете, а неретко и људске жртве. Критеријум функционалности се огледа у задовољењу посебних захтева битних за несметано функционисање објекта у складу са његовом наменом. Најчешће се односе на деформације које могу неповољно да утичу на удобност корисника, функционисање опреме или да имају неповољан естетски ефекат. И вибрације, такође, могу неповољно утицати на функционалност објекта. Стога при пројектовању челичних конструкција никако не треба изоставити проверу ових критеријума функционалности.[L2,8]

На трајност објекта, пре свега, утичу избор и квалитет уграђених материјала, као и квалитет извођачких радова, али и конструкцијско обликовање детаља. Правилним обликовањем може се знатно повећати трајност конструкције с обзиром на корозиону заштиту, посебно код инжењерских објеката (нпр. мостови, стубови далековода, антенски стубови, димњаци, силоси, итд.), који су директно изложени дејству атмосферских утицаја. Осим тога, примена одговарајуће антикорозионе и противпожарне заштите такође повољно утиче на трајност металних конструкција, наравно уз одговарајуће, редовно и периодично одржавање. Методе прорачуна помоћу којих се може доказати сигурност и функционалност конструкције деле се на детерминистичке и пробабилистичке, у зависности од приступа одређивања сигурности и од начина увођења коефицијента сигурности. Већина инжењерских прорачуна у прошлости заснивала се на детерминистичком приступу. Оптерећења и карактеристике материјала сматрани су за детерминисане (одређене) вредности и обично су били прописани Правилником. Коефицијент сигурности (ν), као трећи основни елемент прорачуна, такође је детерминисана величина. На основу коефицијента сигурности прописују се допуштени напони који не смеју да буду премашени у елементима конструкције ни у једној фази њеног животног века. Имајући у виду да се ова детерминистичка метода прорачуна заснива на допуштеним напонима, најчешће се у литератури назива *метода или теорија допуштених напона*. Са развојем теорије вероватноће (пробабилистичке теорије) дошло се до сазнања да параметри који се користе при прорачуну имају стохастички карактер, па се развио нов начин прорачуна који је у свом приступу пробабилистички. Наиме, параметри који утичу на сигурност конструкције уводе се у прорачун као случајне променљиве величине и у обзир се узима вероватноћа њихових појава, а коефицијенти сигурности се везују и за оптерећење и за особине материјала. Према овом концепту не постоји апсолутна сигурност конструкције, већ је могућа и таква случајна комбинација при којој долази до рушења, али са прописаном, довољно малом вероватноћом појаве. Метода прорачуна која је настала као резултат оваквог концепта назива се *метода граничних стања* и заснива се на полупробабилистички, јер садржи низ поједностављења у односу на чисту пробабилистичку теорију.

3.1. МЕТОДА ДОПУШТЕНИХ НАПОНА

Развој линеарне теорије еластичности у последњим деценијама XIX века омогућио је математички апарат за анализу понашања челичних конструкција у домену еластичног - линеарног понашања. С обзиром да су експерименти показали да је челик до достизања границе развлачења идеално еластичан материјал, који се понаша сагласно Хуковом закону, у прорачуну је уз ту претпоставку усвојен и став да напон на граници развлачења одређује почетак лома конструкције. Као директна последица усвојених претпоставки настала је метода допуштених напона, једна од најстаријих метода прорачуна која, модификована током времена, још увек представља широко прихваћен концепт доказа сигурности челичних конструкција. Метода допуштених напона се заснива на услову да услед спољашњег оптерећења, ни у једном пресеку конструкције, максималани нормални (σ_{max}) и смичући (τ_{max}) напон не смеју да буду већи од допуштених (σ_{dop} и τ_{dop}). [L2]

где су:

f_y -напон на граници развлачења,

ν -коефицијент сигурности, чија је вредност обавезно већа од 1,0.

На тај начин је конструкција обезбеђена од лома, а еластично понашање њених елемената је осигурано за све време њеног трајања. При томе коефицијент сигурности обухвата све неправилности у вези процене оптерећења, карактеристика материјала, претпостављене и стварне геометрије елемената конструкције, као и одступања стварних утицаја у конструкцији од рачунских услед неадекватног статичког модела или методе анализе.

За различите елементе у конструкцији меродавне су различите комбинације оптерећења, па се они проверавају с обзиром на утицаје услед тих меродавних комбинација. Како су променљива оптерећења углавном независна и променљива кроз време (снег, ветар, сеизмика, температурни утицаји...), могуће је њихово истовремено дејство. Метода допуштених напона не допушта никакву редукцију ових оптерећења при истовременом деловању, којом би се на изврстан начин узела у обзир смањена вероватноћа истовременог деловања више различитих променљивих оптерећења. Дакле, при комбиновању различитих оптерећења сва оптерећења се узимају са пуним износом, али се за различите комбинације прописује различит коефицијент сигурности. Законска техничка регулатива дефинише три случаја оптерећења и њима одговарајуће коефицијенте сигурности (табела 4).

Tabela 4. Коефицијенти сигурности за различите случајеве оптерећења [L2]

	Slučaj opterećenja	Koeficijent sigurnosti
1	I slučaj opterećenja (osnovno)	$v^I = 1,50$
2	II slučaj opterećenja (osnovno+dopunsko)	$v^{II} = 1,33$
3	III slučaj opterećenja (osnovno+dopunsko+izuzetno)	$v^{III} = 1,20$

Први случај оптерећења обухвата комбинације основних оптерећења (сопствена тежина, корисно оптерећење, снег, итд.), која се најчешће јављају током експлоатационог века конструкције, па је самим тим и коефицијент сигурности за овај случај оптерећења највиши. У други случај оптерећења спадају комбинације оптерећења које поред основних обухватају и допунска оптерећења (ветар, бочни удари код кранских носача и железничких мостова, силе кочења, температурни утицаји итд.). Под трећим случајем оптерећења подразумевају се комбинације оптерећења које поред поменутих основних и допунских утицаја узимају у обзир и изузетна оптерећења као што су сеизмика, различито слегање ослонаца, силе удара возила, итд. Треба напоменути да за димензионисање различитих елемената једне исте конструкције могућа буду меродавни различити случајеви оптерећења. Тако на пример, ако се има у виду однос вредности коефицијената сигурности за I и II случај оптерећења може се закључити да је II случај оптерећења меродаван само ако је допринос напрезања посматраног елемента услед разматраног допунског оптерећења већи од 12,5% напрезања проузрокованог основним оптерећењем. Слично важи и за III случај оптерећења, само је у овом случају овај однос већи и износи 25%. Такође се истиче да за поједине елементе конструкције (нпр. спрегови за пријем сила ветра, бочних удара или кочења) чија је основна функција пријем неког оптерећења из групе допунских, ова оптерећења не спадају у II већ у I случај оптерећења, јер за посматрани елемент представљају основно оптерећење. Као што се види, оптерећења су прописана (детерминисана) законском техничком регулативом и по комбинацијама и по интензитету. Међутим, методу прорачуна према допуштеним напонима не карактеришу само детерминисана вредност оптерећења, комбинација оптерећења и коефицијент сигурности, који су одређени на основу историјског наслеђа. У њене

карактеристике спадају и следеће претпоставке: елементи се рачунају са средњим напонима у пресецима; прорачуном се не обухватају заостала напонска стања усред ваљања, сечења, заваривања и других поступака обраде; у прорачун се не уводе утицаји концентрације напона при девијацији тока сила и геометријске имперфекције елемената.

Иако је неминован закључак да су учињене апроксимације веома грубе, ипак је метода димензионисања челичних конструкција према допуштеним напонима јасна и једноставна и са задовољавајућом тачношћу се употребљава и при решавању нелинеарних проблема. Правилно примењена у прорачуну, уз адекватно конструисање и извођење, никада није била узрок хаварије и рушења носеће челичне конструкције, што потврђују светска искуства из многих протеклих година, када је метода допуштених напона била једина позната метода за прорачун, не само челичних већ и бетонских, затим спрегнутих и дрвених конструкција. Ипак, имајући у виду изразито еластопластично понашање готово свих реалних материјала за конструкције, а посебно челика, ограничавање напона у области еластичног понашања, како се захтева у методи допуштених напона прилично је конзервативно, а претпоставка о идеално еластичном материјалу не важи за напоне изнад границе развлачења.

3.2. МЕТОДА ГРАНИЧНИХ СТАЊА

Постепено спознавање свих недостатака и грубих апроксимација у методи допуштених напона, као и стохастичка природа већине повремених оптерећења (ветар, снег, сеизмика, температура, људска навала итд.) довела је до сасвим оправданих и очекиваних покушаја конструктора да у прорачун конструкција уведу што реалније параметре. Крајњи циљ пројектанта-конструктора у обликовању концепта прорачуна јесте пробабилистичка метода заснована на примени теорије вероватноће. По тој методи све параметре који утичу на прорачун треба увести преко њихових стварних кривих расподеле, па вишеструком интеграцијом проверити да ли је постигнут захтеван степен сигурности. Међутим, и поред поседовања моћних рачунара, ова метода није применљива у инжењерској пракси, јер захтева изузетно обиман рад на кривама расподеле, које због свог обима никако не би могле да нађу место у техничким регулативама.[L2,8]

Поједностављење ове методе може се постићи усвајањем Гаусове криве расподеле вероватноће за све параметре у прорачуну, и преко карактеристичних вредности - средње вредности и стандардне девијације, одредити степен сигурности.

Метода граничних стања која налази примену у савременим регулативама представља даље поједностављење поступка, у том смислу што су од свих параметара који утичу на прорачун само својства материјала и оптерећења обрађени у статистичком смислу. Они се у прорачун уводе путем својих карактеристичних вредности. Карактеристична вредност одређује величину која са одређеним степеном вероватноће неће бити прекорачена у неповољнијем смислу. Остали фактори неизвесности обухватају се трансформисањем карактеристичних вредности у прорачунске, помоћу парцијалних коефицијената сигурности. Дакле, уместо јединственог коефицијента сигурности који је био прописан у методи допуштених напона, метода граничних стања користи више парцијалних коефицијената сигурности који се односе на оптерећења и на отпорност.

Јасно је да овде није у питању чисто пробабилистички приступ, те је и концепт назван полупробабилистички. Суштинска разлика између досадашњег детерминистичког концепта реализованог кроз методу допуштеног напона и новог пробабилистичког концепта на коме се заснива метода граничних стања јесте у томе што се више не димензионише конструкција која има апсолутну сигурност у односу на дејство нормираног оптерећења, већ се пројектује конструкција која са одређеном вероватноћом неће доживети извесно гранично стање, или више могућих граничних стања.

Основни захтев који се поставља пред пројектанта је да испројектује и конструише конструкцију која ће са прихватљивом вероватноћом остати погодна за употребу ради које је пројектована, водећи рачуна о њеној трајности. Степен вероватноће којим се гарантује сигурност конструкције у сваком од наведених случајева усваја се према тежини последица одмогућих незгода. Пројектом треба одговорити на захтев да конструкција издржи дејства и утицаје који ће се јавити за време изградње (монтаже), евентуалног пробног оптерећења и експлоатације, затим да адекватно одговори захтевима функционалности у току коришћења и да има одговарајућу трајност.

Гранично стање може да наступи у било ком тренутку коришћења, односно живота конструкције и представља стање у коме конструкција или неки њен део губи функцију за коју је пројектован. У зависности од начина на који конструкција престаје да испуњава одређену функцију, постоје и различите врсте граничних стања. Она су подељена у две основне групе:

- гранична стања носивости и
- гранична стања употребљивости.

Гранична стања носивости су везана за рушење или неке друге видове губитка носивости конструкције, који могу да угрозе безбедност људи. Најчешћи узроци настанка граничног стања носивости су: губитак статичке равнотеже или велика померања конструкције као крутог тела, лом конструкције или њеног дела услед прекорачења отпорности попречног пресека, губитак стабилности елемента или конструкције као целине услед ефеката другог реда, прелазак система у потпуни или делимични механизам формирањем пластичних зглобова, прекомерне деформације и замор материјала.

3.3. СМАЊЕЊЕ НОСИВОСТИ КОНСТРУКЦИЈА

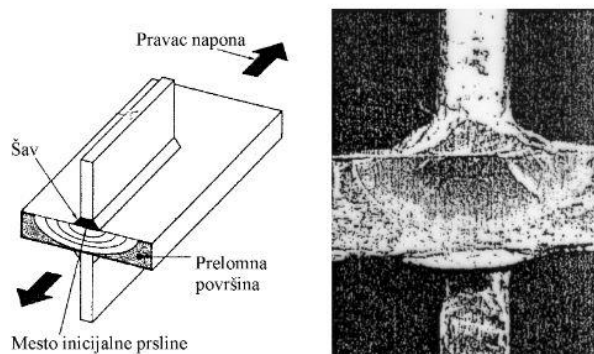
На смањење носивости конструкције утичу замор, крти лом и ламеларно цепање.

3.3.1. ЗАМОР МАТЕРИЈАЛА

Услед оптерећења чији се интензитет вишеструко циклично мења, може да дође до лома напрегнутог елемента, иако ни у једном тренутку није достигнута статичка чврстоћа материјала. Ова појава се назива *замор материјала*. Вишедеценијско градитељско искуство показује да се велики број хаварија инжењерских конструкција приписује замору. Лом изазван замором материјала дешава се у конструкцијским елементима мостова, кранова, носача дизалица, платформи, јарбола, димњака, бродова итд. Оптерећења која могу да доведу до лома конструкције услед

замора пре свега су саобраћајна оптерећења или променљива оптерећења услед дејства ветра, таласа, вибрација, па и температурних промена.[L2,4,6,9]

Лом изазван вишеструким оптерећењем најчешће настаје на месту унутрашње или спољашње грешке. На таквим местима у конструкцији, при наизменичном напрезању променљивим оптерећењем долази до неравномерне расподеле напона која се огледа у стварању јаким локалних концентрација напона. Како природа оптерећења не омогућава остварење процеса пластификације, то се на овим местима редовно јавља микроскопска прелина, која се потом шири и изазива лом. Преломна површина је карактеристична по томе што се прелом постепено шири око микроскопске прелине (која је због своје улоге названа "иницијална прелина") остављајући концентричне трагове.



Слика 13. Шематски и фотографски приказ типичног прелома услед замора једног завареног конструктивног елемента[L2]

Слика 13 представља типичан лом услед замора (кртилом) на месту иницијалне прелине у једном завареном конструкцијском елементу. На местима грешака у материјалу или завареном шаву, где је поремећен ток сила, долази до концентрације напона (стварања напонских врхова). Уколико је материјал статички оптерећен, а материјал има пластична својства, долази до прерасподеле напона, па се дијаграм напона изравнава. Међутим, уколико је материјал изложен променљивом, односно динамичком оптерећењу, не може доћи до достизања границе развлачења, јер се на местима где је прекорачена отпорност на замор јавља прелина која изазива лом.

Замор материјала представља предмет изучавања великог броја истраживача. Међутим, уочљиво је да по појединим питањима постоје одређене разлике у мишљењима између истраживача и пројектаната. Препоруке за прорачун дефинисане од стране експерата су бројне, али су понеке и међусобно контрадикторне. Зато се прорачун конструкција на замор, у зависности од примењених прописа, може разликовати какоу приступу тако и у нумеричким вредностима.

Разлика између ранијег, класичног приступа проблему замора и новог, савременог приступа је суштински. Класичним концептом замор се дефинише као појава смањене статичке чврстоће на елементу који је довољно пута изложен променама напона, док се савременим концептом замор дефинише као оштећење конструкцијског елемента услед постепеног ширења прелина које је узроковано учесталим понављањем напона.

Савремени приступ проблематици замора заступљен је у европском стандарду Еврокод 3. Овај документ унифицира различите националне стандарде и даје алгоритам

прорачуна челичних конструкција на замор, који је поједностављен и прилагођен примени у конкретним пројектним задацима.

Параметри који утичу на замор челичних конструкција могу се сврстати у четири основне категорије:

- напрезање (напонска разлика, средњи напон, број циклуса напонских промена, заостали напони, итд.),
- геометрија (конструкцијска обрада, локалне концентрације напона, мали дисконтинуитети, итд.)
- карактеристике примењеног челичног материјала (σ - ϵ дијаграм, жилавост, микроструктурални дисконтинуитет, итд.) и
- услови околине (корозија, температура, итд.).

3.3.2. КРТИ ЛОМ

Снижавањем спољашње температуре код челика долази до смањења његове дуктилности. Постоји температурна граница испод које лом челика настаје дуж површина кристала пропраћен са мало или без икакве пластичне деформације, за разлику од класичног лома који је праћен знатним пластичним деформацијама. Основна карактеристика кртог лома је да нема никаквих пропратних деформација, па се настале прслине у конструкцији тешко откривају пре рушења конструкције. Запажено је да такве прслине настају на местима високих концентарација напона. Најчешће је извор пукотине грешка у завареном шаву. У свим случајевима околина извора прслине има гладак изглед, који се протеже до границе подручја подложног кртом лому. Подручје кртог лома је ишарано мрежом радијалних и концентричних линија помоћу којих се лако може открити почетак напрслине. Генерално, крти лом настаје у конструкцији при комбинацији конструктивног дисконтинуитета (дејства зареза) и неповољних услова као што су напони затезања. Појава кртог лома се може избећи избором адекватног материјала и стања која нису подложна кртом лому.[L2,4]

Под кртим ломом подразумева се појава брзог ширења пукотина у конструкцији без директне везе са спољашњим оптерећењем. Оваква појава је запажена 1886. године при пуцању водоводних цеви, а затим рушење низа мостова у Белгији и Немачкој, као и потапање око 200 бродова типа Либерту (грађени у II светском рату). Фактори који утичу на крти лом су:

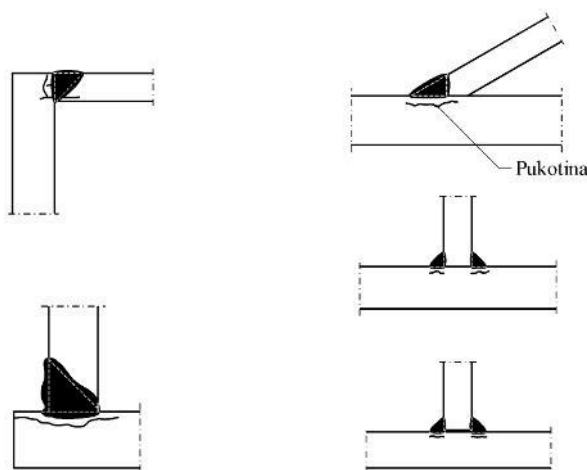
- карактеристике основног материјала (већи проценат угљеника, већа опасност од кртог лома),
- радна температура (нижа температура, већа опасност),
- интензитет радног напрезања (већи напон, већа опасност),
- дебљина елемената (већа дебелина, већа опасност),
- крутост конструкције (већа крутост, већа опасност),
- врста напрезања у конструкцији (треба избегавати стања са $\tau = 0$) и
- хладна обрада (смањена пластичност, већа опасност).

Установљено је да пластичне деформације могу настати само ако делују и смичући напони. У триаксијалном стању напона највећи смичући напон приближава се нули када се главна напрезања приближавају истој вредности, услед чега у троосном стању напона лом често настаје раздвајањем кристала без пластичних деформација. Утицај зареза повећава концентацију напрезања у корену зареза. Попречна контракција је

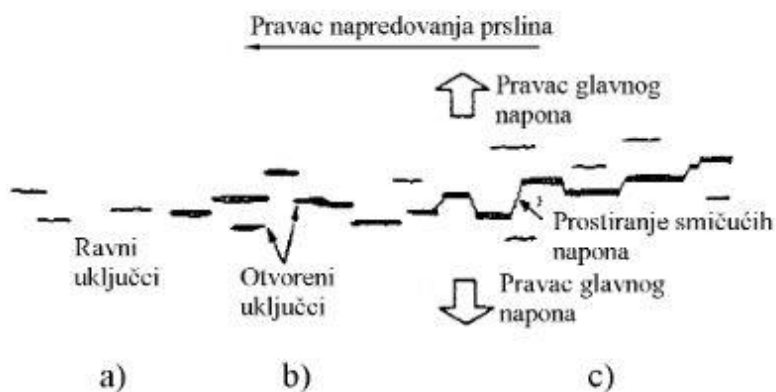
делимично спречена суседним мање напрегнутим материјалом. Тако се у попречном пресеку елемента уз подужни напон високог интензитета јавља и попречно напрезање. На такав начин се ствара троосно напонско стање у непосредној близини зареза. Геометријски дисконтинуитет ствара слична опасна места по појаву кртог лома. Конструкције са неадекватно решеним детаљима, као што је нагла промена попречног пресека, додатни заварени шавови у затегнутој зони носача, често су подложне кртом лому.

3.3.3.ЛАМЕЛАРНО ЦЕПАЊЕ ЗАВАРЕНИХ СПОЈЕВА

Ламеларно цепање је феномен који се јавља код ваљаних производа оптерећених управно на раван ваљања. Иако заваривање није неопходан услов да би се оно појавило, у пракси се овај феномен дешава готово искључиво код заварених конструкција, поготову код дебелих шавова који се изводе из више завара (слојеви шавова), а где су елементи који се спајају дебели са значајним заосталим напонима. Ово доводи до великих напрезања и локалних деформација у шаву, што резултира цепањем основног материјала, односно ламеларном цепању. Ламеларно цепање је последица пукотина које се јављају непосредно испод зоне утицаја топлоте у основном материјалу (слика 14). Механизам ламеларног цепања приказан је на слици 15 за општи случај настајања и напредовања прслина у основном материјалу. [L2,9]



Слика 14. Примери заварених спојева подложних ламеларном цепању [L2]



Слика 15. Механизам настајања и напредовања процеса ламеларног цепања: а) почетно стање; б) зона декохезије; ц) зона прслина [L2]

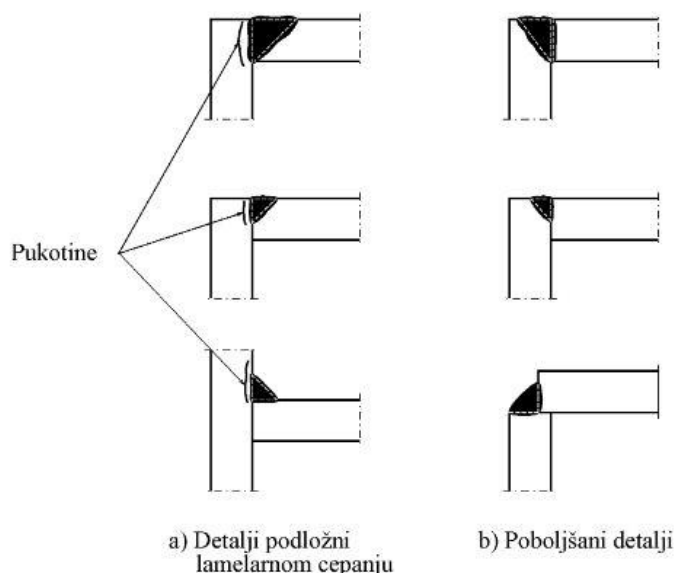
Описани механизам започињања ламеларног цепања јасно указује на три неопходна услова да би се оно јавило:

–Основни материјал мора бити подложен овом феномену. Практично се ова подложност јавља или код равних пукотина или код конструкција оптерећених на савијање. Може се открити механичким деструктивним испитивањем или посебним ултразвучним скенирањем;

–Спојеви са значајним заосталим напонима проузрокују велику пластичну деформацију основног материјала у близини завареног споја. Напони се јављају услед скупљања током хлађења завареног споја и већи су, што је количина додатног материјала при заваривању већа;

–Подложност ламеларном цепању је већа када облик споја допушта развој деформација скупљања управно на раван ваљања материјала.

Смањење опасности од ламеларног цепања постиже се избором погодног материјала и правилним обликовањем заварених детаља (слика 16). Еврокод 3 даје препоруке за правилно обликовање детаља челичних конструкција како би се избегао феномен ламеларног цепања.



Слика 16. Адекватно обликовање детаља с обзиром на спречавање ламеларног цепања[L2]

4. РАЗВОЈ КОНСТРУКЦИЈЕ

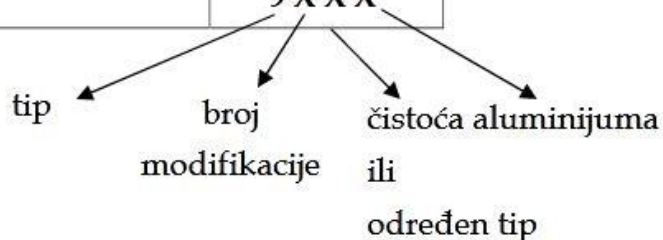
Анализа напонско-деформацијског стања је вршена на шасији машине за укопавање каблова. Идући у кораку са техником може се рећи да је посебан акценат стављен на прављење машина што мањих маса којим се олакшава транспорт и постиже уштеда новца путем уштеде материјала приликом њихове израде. Шасија је израђена од легуре алуминијума тј. алуминијума 6061.

Легуре алуминијума су легуре у којима је алуминијум (Al) доминантан метал, а типични елементи за легирање су бакар, магнезијум, манган, силицијум, калај и цинк (табела 5). Постоје две главне класификације: ливене легуре и вучене легуре, обе су даље подељене на категорије које се могу и не могу термички третирали. Око 85% алуминијума се користи за ваљане производе, на пример ваљани лимови, фолије и екструзију. Ливене легуре алуминијума доносе исплативе производе због ниске тачке топљења, иако имају генерално

слабије затезне чврстоће од вучене легура. Најважнији елемент ливеног алуминијума је Al-Si, где имамо висок ниво силицијума (4,0-13%) што даје нове карактеристике. Алуминијумске легуре нашироко се користе у инжењерским конструкцијама и компонентама где је потребна слабија тежина или отпорност на корозију.

Табела 5. Означавање легура алуминијума

OZNAČAVANJE LEGURA ALUMINIJUMA	
aluminijum (min 99%)	1 X X X
aluminijum-bakar (Al-Cu)	2 X X X
aluminijum-mangan (Al-Mn)	3 X X X
aluminijum-silicijum (Al-Si)	4 X X X
aluminijum-magnezijum (Al-Mg)	5 X X X
aluminijum-magnezijum-silicijum (Al-Mg-Si)	6 X X X
aluminijum-cink (Al-Zn)	7 X X X
aluminijum-drugi elementi	8 X X X
nepoznato	9 X X X



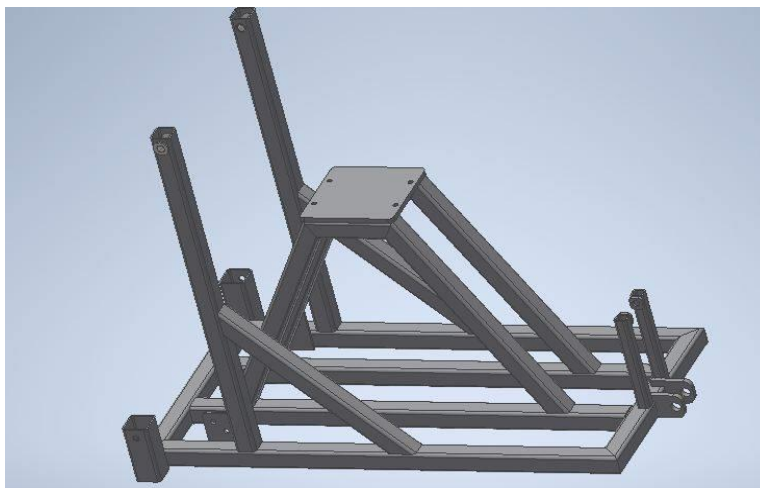
Серија 6000 има добру могућност екструзије и може да се термички обрађује на температури екструдирања. Надаље, те легуре имају средње до велике чврстоће, лако се могу заварити и нуде добру отпорност на корозију, чак и у морским срединама. Већи део екструдираног материјала за носиве конструкције израђен је од тих својстава. Користе се за носиве конструкције како на копну тако и на мору.

Затезна чврстоћа свих типова алуминијумских легура се повећава са порастом параметара заваривања, пре свега брзине заваривања. При томе, постигнута ефикасност споја веома зависи од типа легуре. Код легуре групе 5xxx ефикасност споја може да износи и до 100%, док је за легуре групе 2xxx, 6xxx и 7xxx ефикасност споја износи до 90%, до 75% и преко 90%, респективно. Приликом испитивања на затезање заварених спојева легура које таложно ојачавају, до лома долази на повратној страни вара. Накнадна термичка обрада спојева повећава ефикасност споја, али знатно смањује савојну чврстоћу. Испитивањем на замор узорака оптерећених у попречном и подужном правцу, утврђено је да отпорност споја на замор износи свега 50% од отпорности основог материјала.

Машина за укопавање каблова чија се шасија анализира као и сама шасија су приказане на слици.



Слика 17. Машина за укопавање каблова



Слика 18. Шасија машине за укопавање каблова

5. АНАЛИЗА НАПОНА И ДЕФОРМАЦИЈА

Анализа напона и деформација шасије машине за укопавање каблова је рађена у програму Inventor кроз неколико фаза и то:

I фаза: прелиминарно дефинисање геометрије конструкције, односно 3Д моделирање.

II фаза: дефинисање карактеристика материјала за сваку зону: ОМ, ЗУТ, ЗТМУ и Г. Уносе се вредности E -Young-овог модула еластичности, ν -Poisson-овог коефицијента, зависност напона- σ од релативне деформације- ϵ : $\sigma = f(\epsilon)$

III фаза: одређивање дејствујућег оптерећења (тип оптерећења, интензитет и место дејства)

IV фаза: одређивање граничних услова, односно типа (врсте) везе испитиваног конструкционог елемента са остатком склопа (са којим чини функционалну целину).

V фаза: прелиминарни прорачун (напонско-деформационо стање за конструкцију без прслина) на бази којих се врши процена критичних места за појаву иницијалне прслине

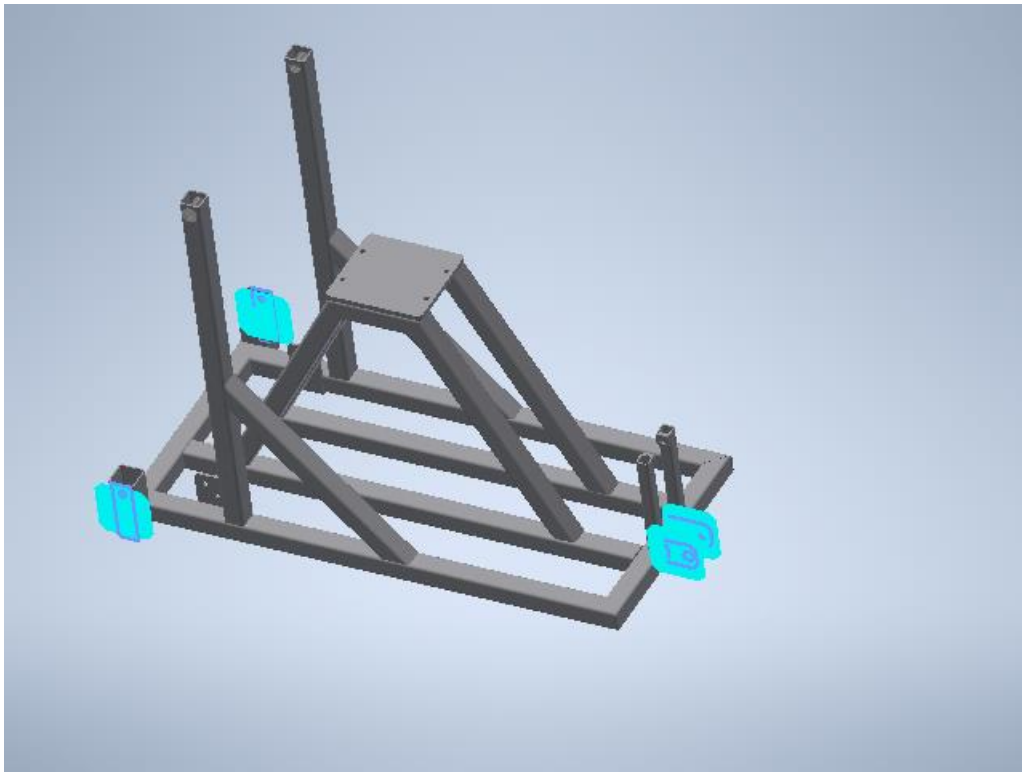
у структури. На основу искуства, потом се врши дефинисање величине, положаја и облика прслине.

VI фаза: нови прорачун са прслином, при чему се добијају сви неопходни подаци потребни за процену века конструкције, односно одређивање стабилности ширења прслине.

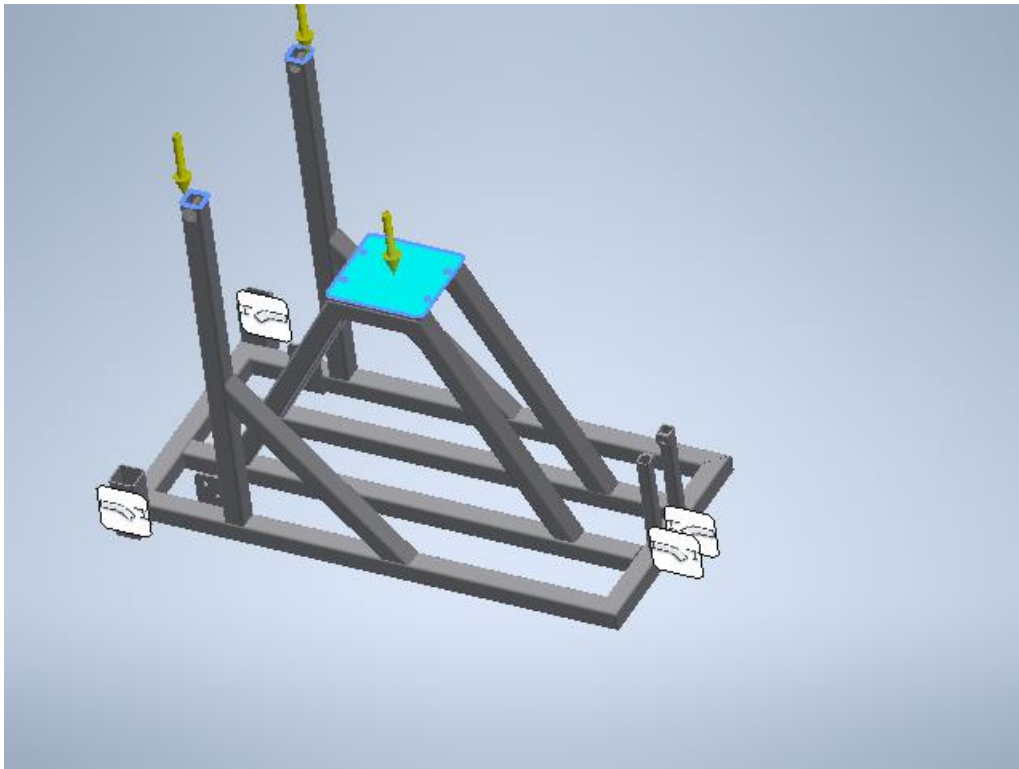
VII фаза: уколико добијени подаци не задовољавају са аспекта сигурности или поузданости, конструктор је принуђен да примени бар једну од следећих мера:

- измена постојеће геометрије конструкције (уколико је то могуће са аспекта склопивости),
- израда конструкције од новог, квалитетнијег материјала,
- примена нове технологије спајања (коришћење неког другог поступка, као што је FSW, којим се постиже већи квалитет споја),
- примена адекватног технолошког поступка у циљу постизања бољих карактеристика конструкционог елемента.

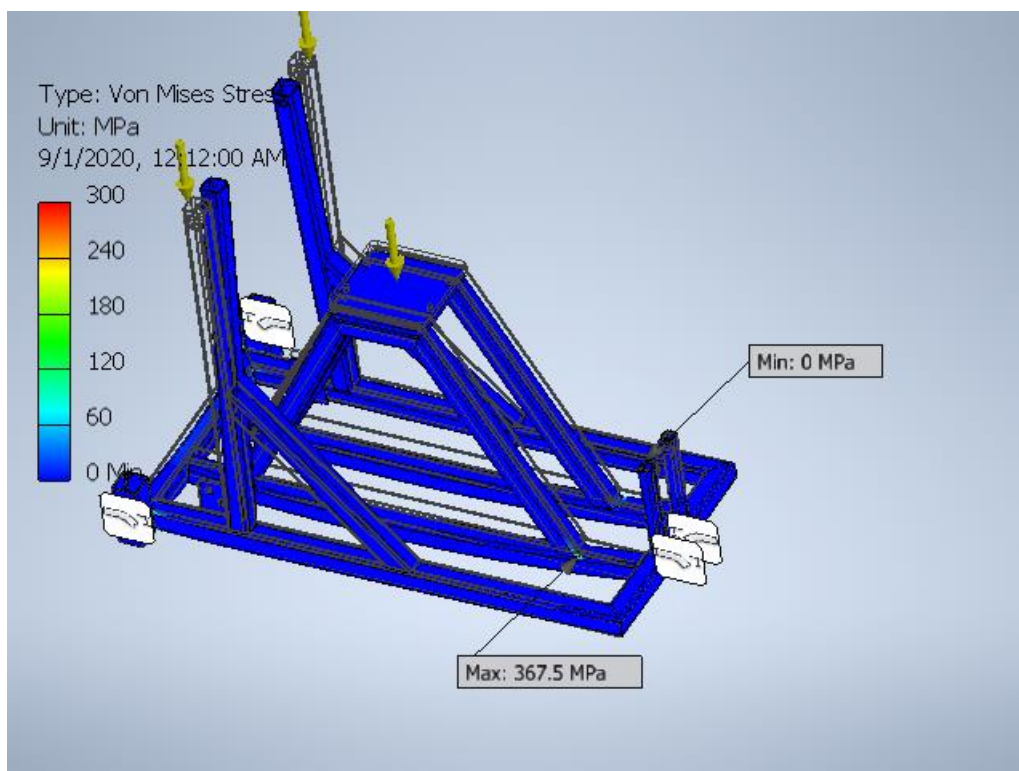
Дакле, целокупан алгоритам се понавља док год се не добију жељени резултати.



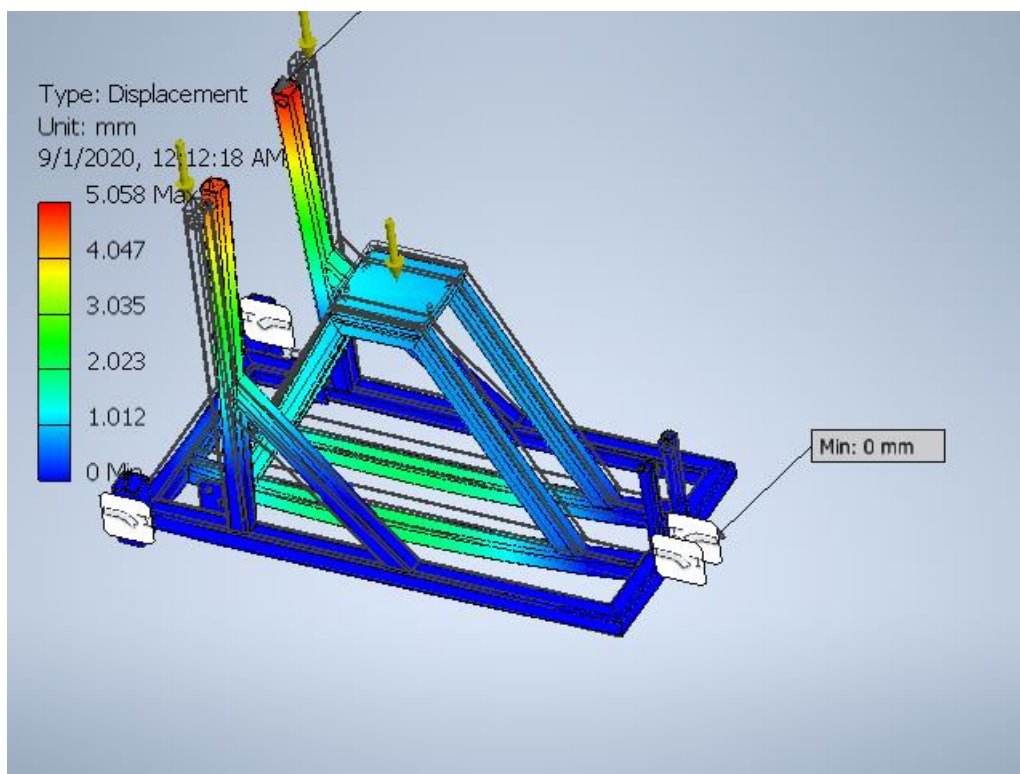
Слика 19. Фиксирани делови конструкције при оптерећењу 15kN без прслине



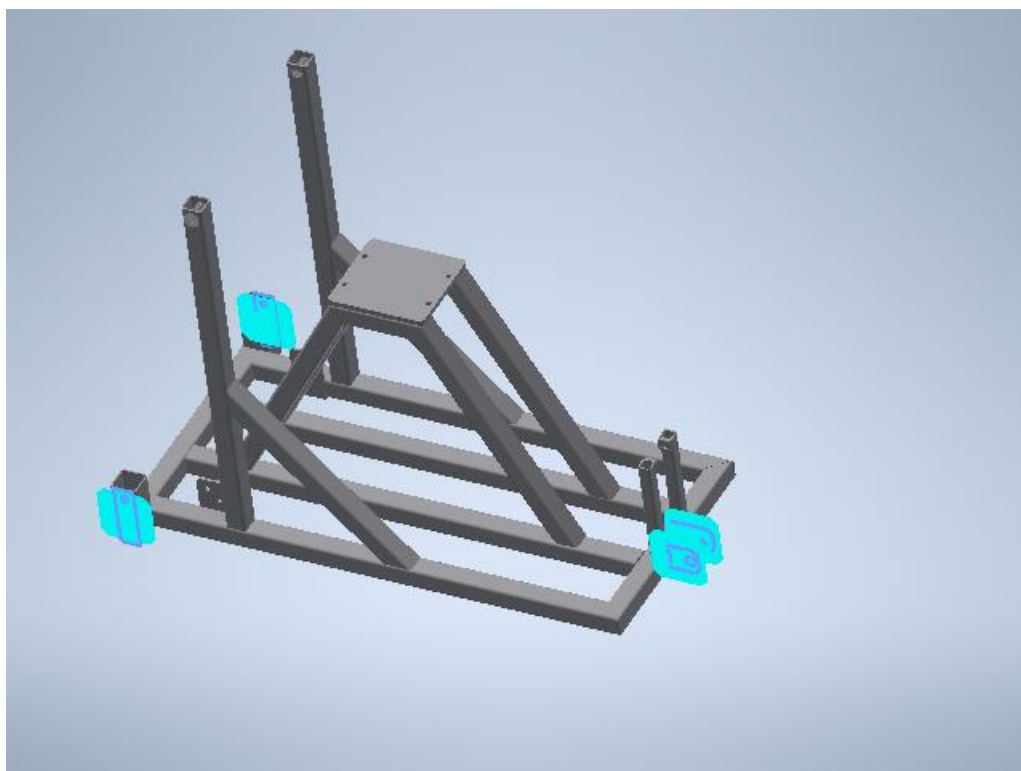
Слика 20. Оптерећење од 15kN на конструкцији без прсине



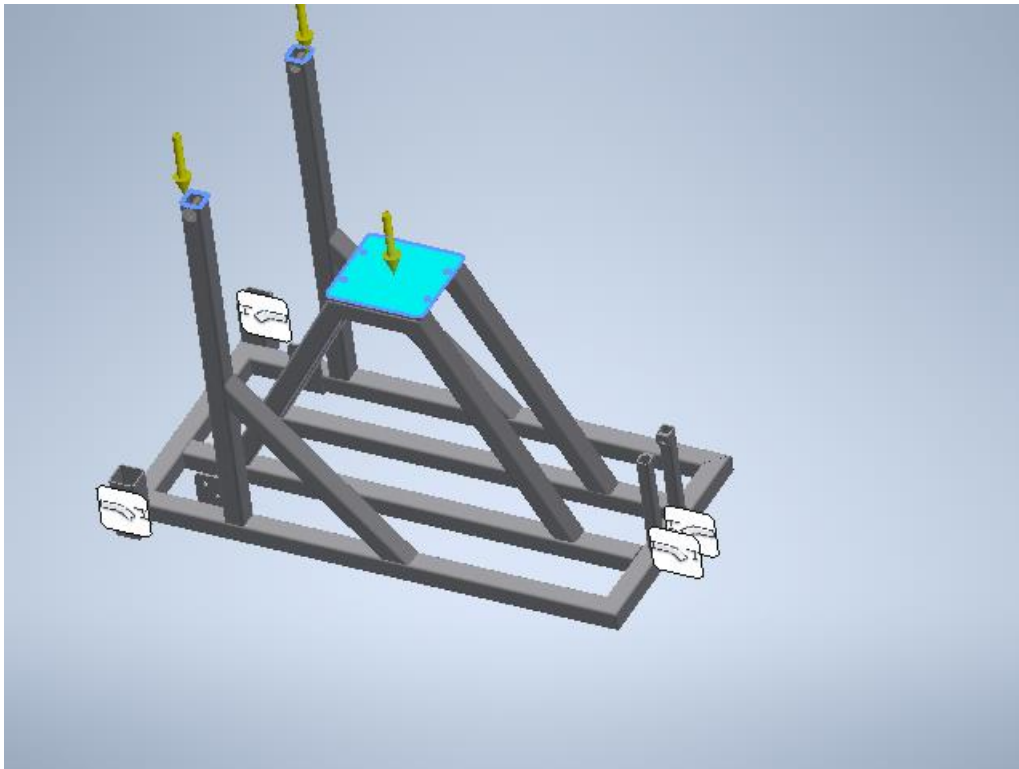
Слика 21. Von Mises–ови напони при оптерећењу 15kN без прсине



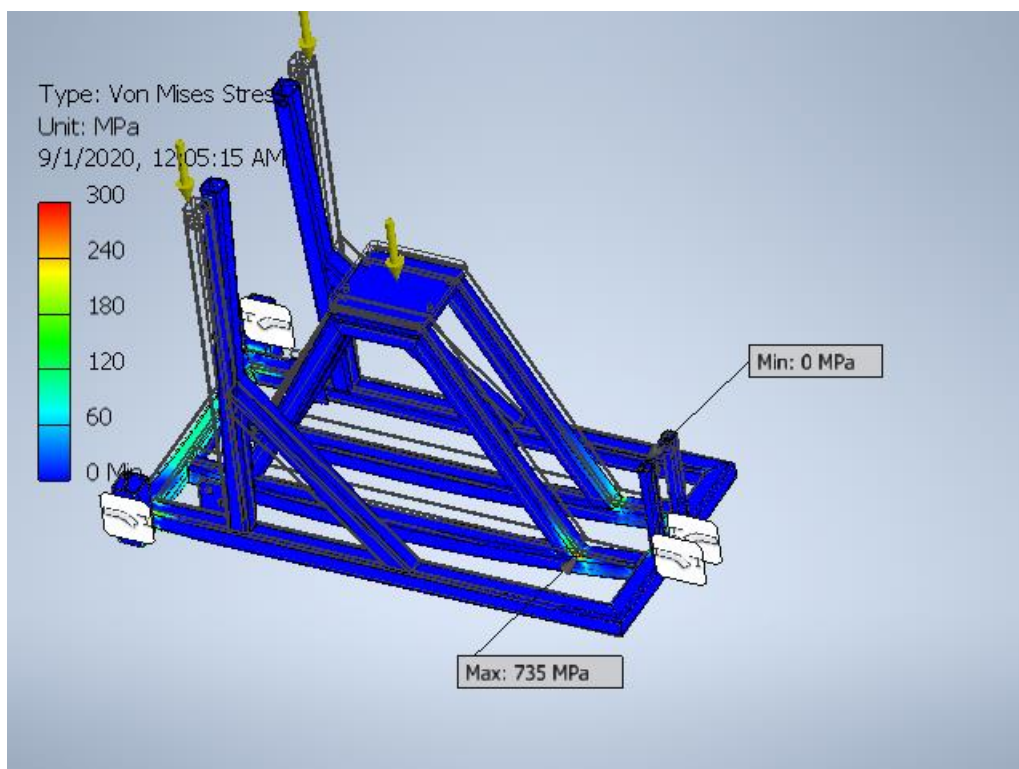
Слика 22. Деформације при оптерећењу 15kN без прслине



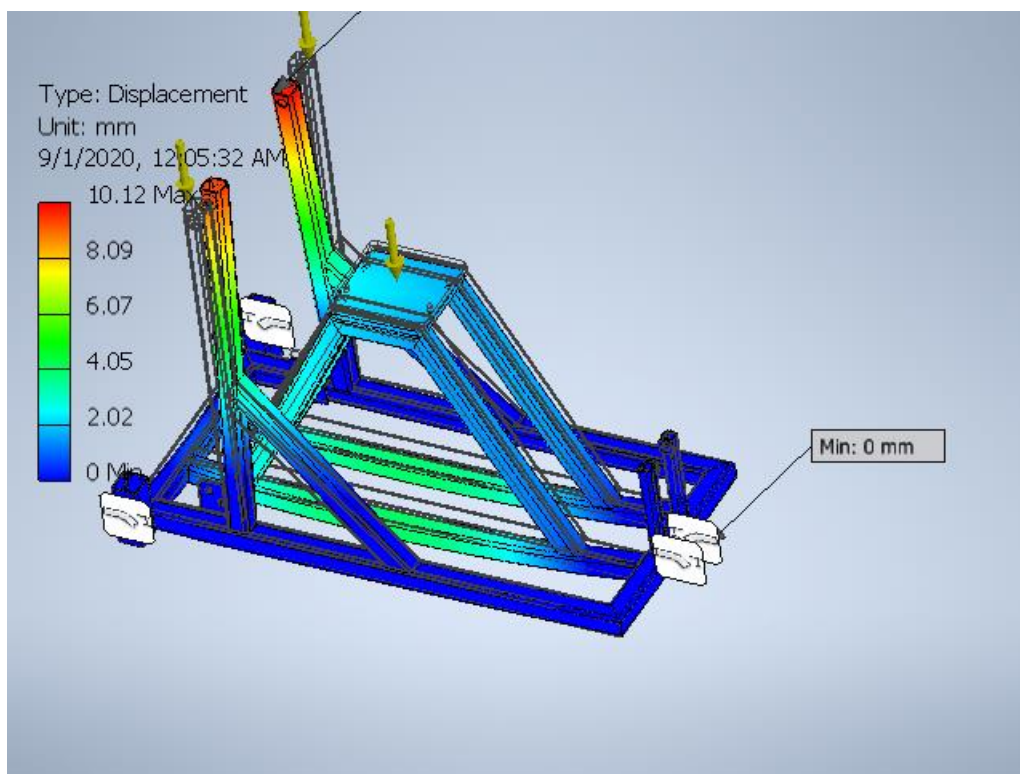
Слика 23. Фиксирани делови конструкције при оптерећењу 30kN без прслине



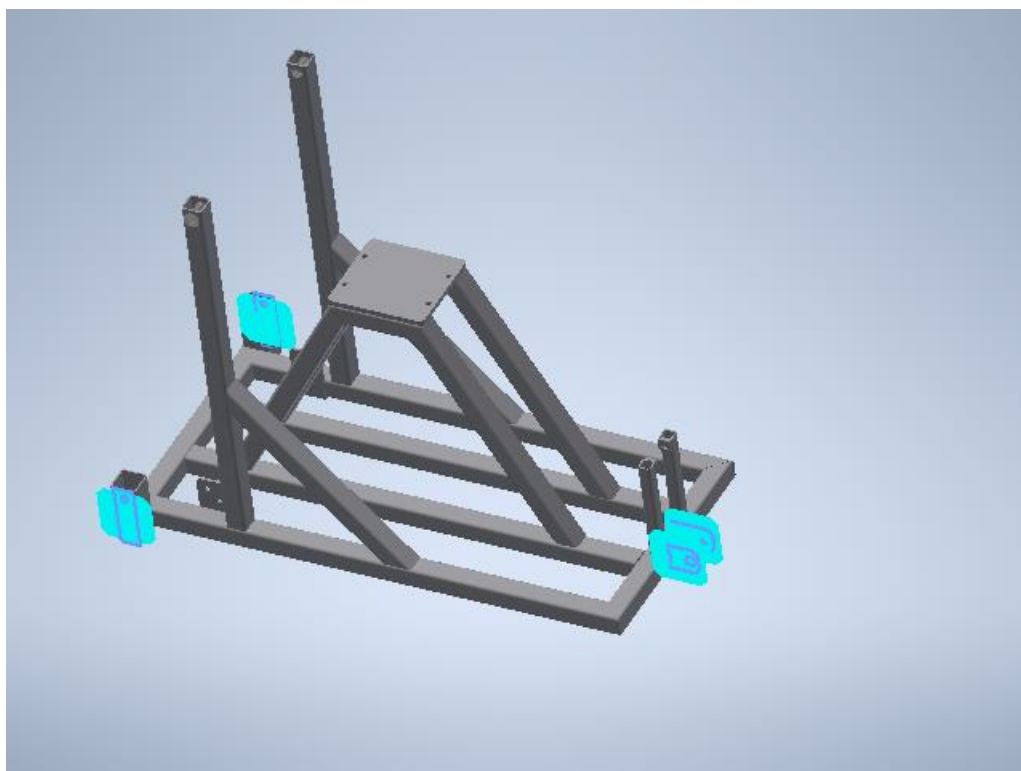
Слика 24. Оптерећење од 30kN на конструкцији без прсине



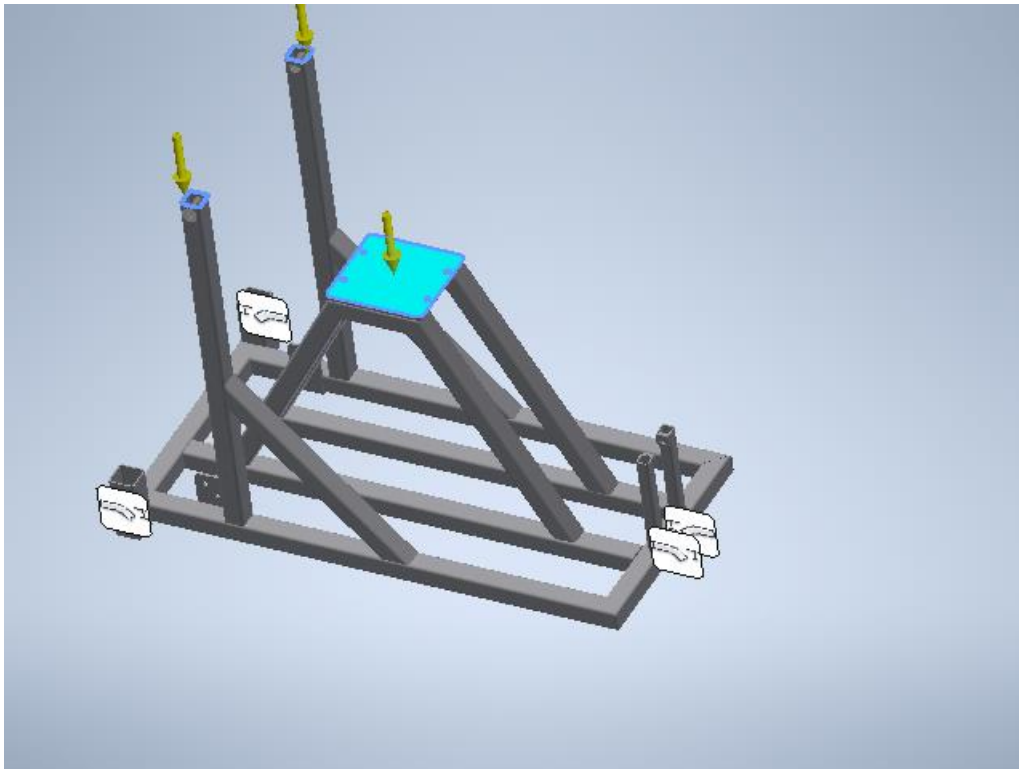
Слика 25. Von Mises–ови напони при оптерећењу 30kN без прсине



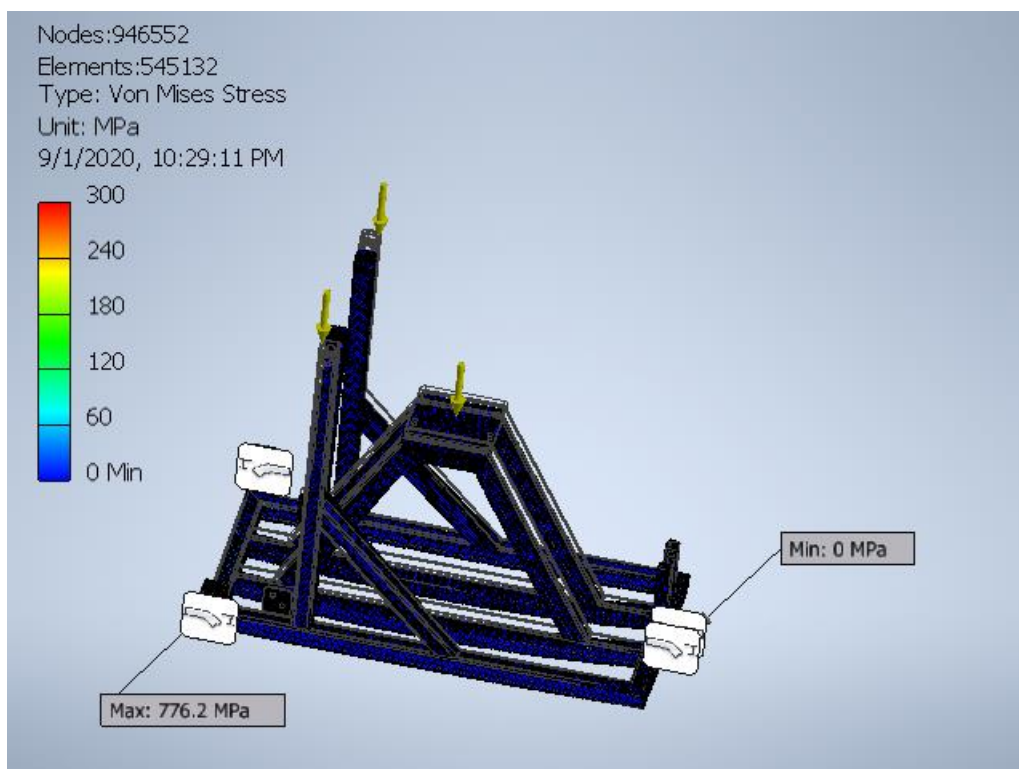
Слика 26. Деформације при оптерећењу 30kN без прслине



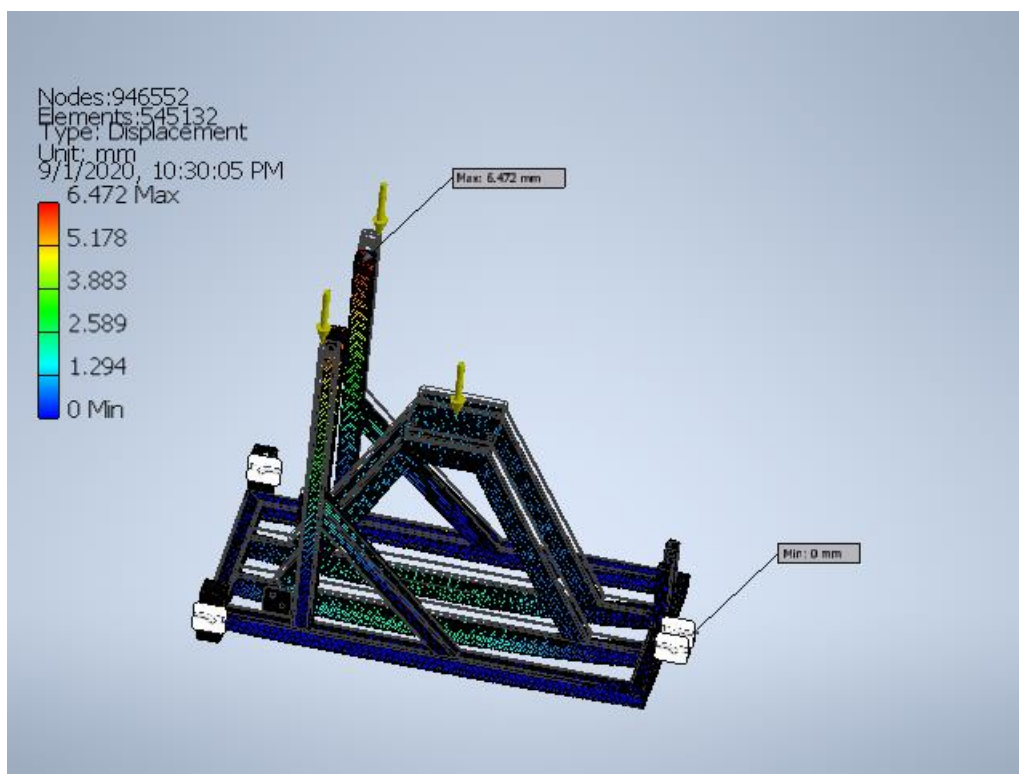
Слика 27. Фиксирани делови конструкције при оптерећењу 15kN са прслином 1mm



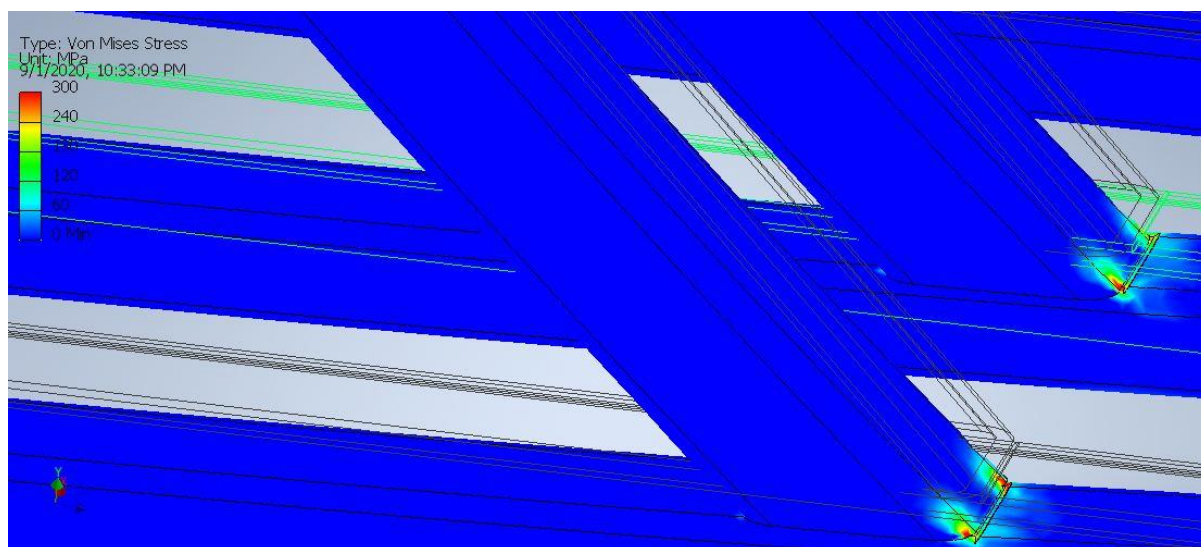
Слика 28. Оптерећење од 15kN на конструкцији са прслином 1mm



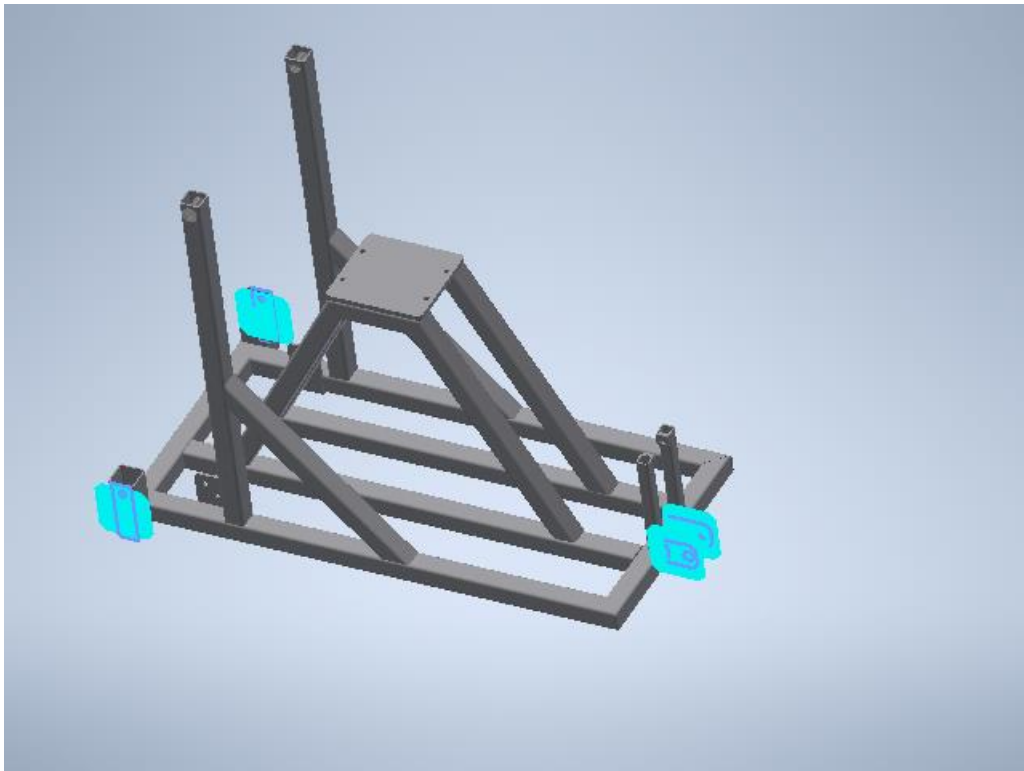
Слика 29. Von Mises–ови напони при оптерећењу 15kN са прслином 1mm



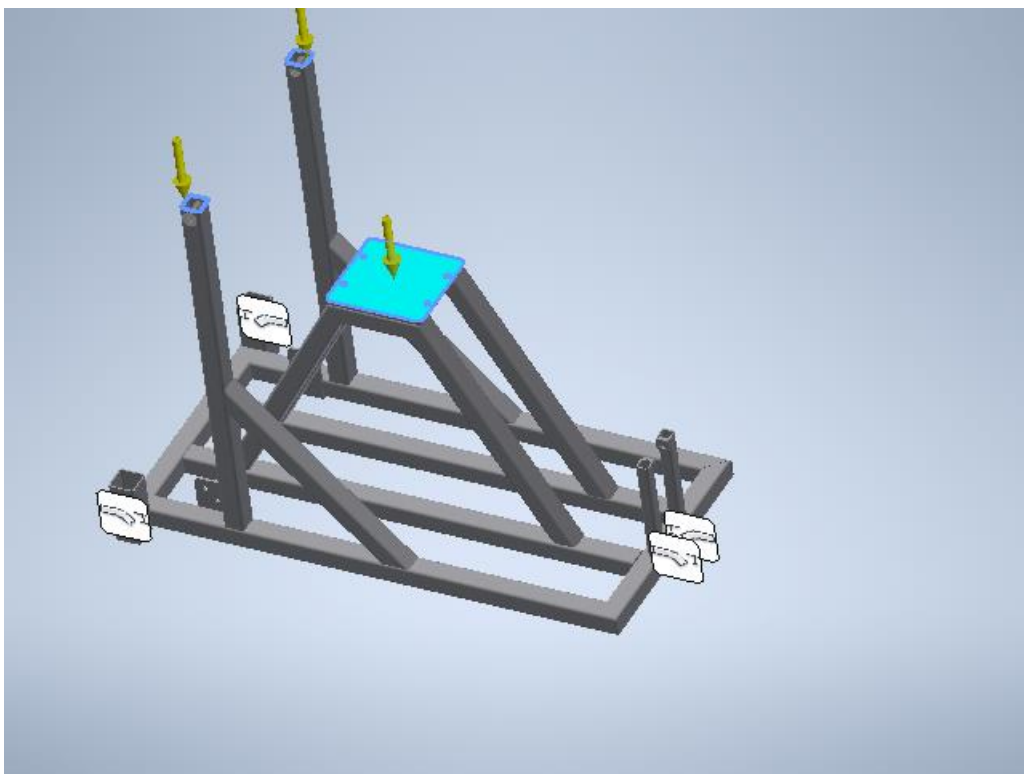
Слика 30. Деформације при оптерећењу 15kN са прслином 1mm



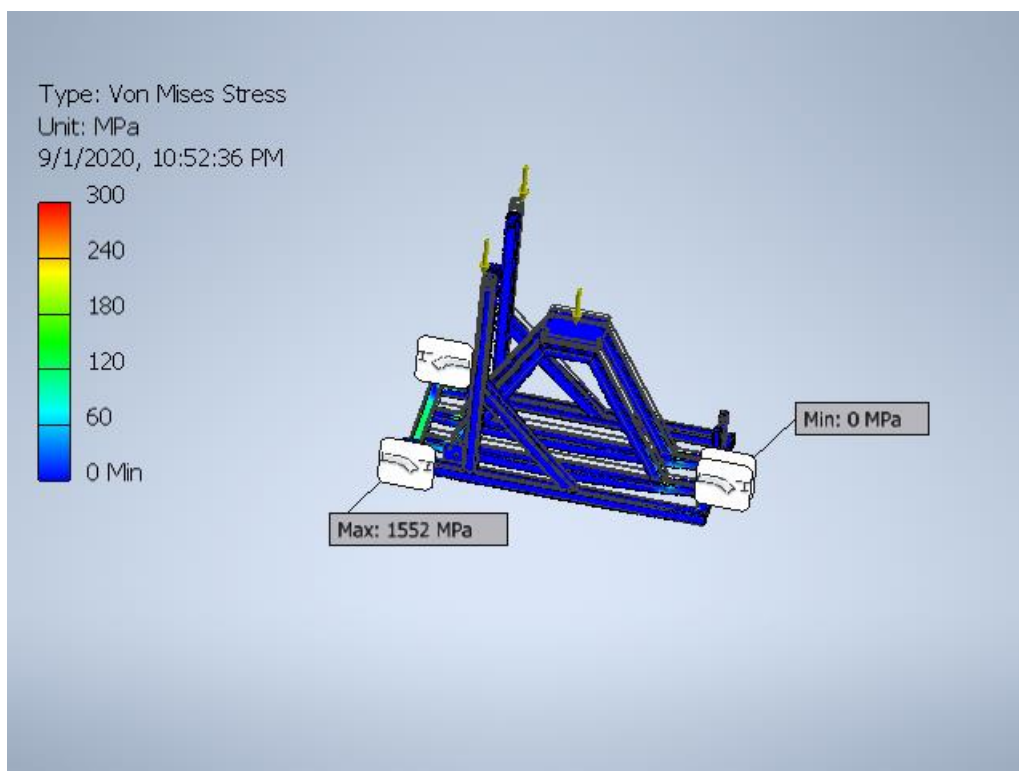
Слика 31. Прслина 1mm са оптерећењем од 15kN



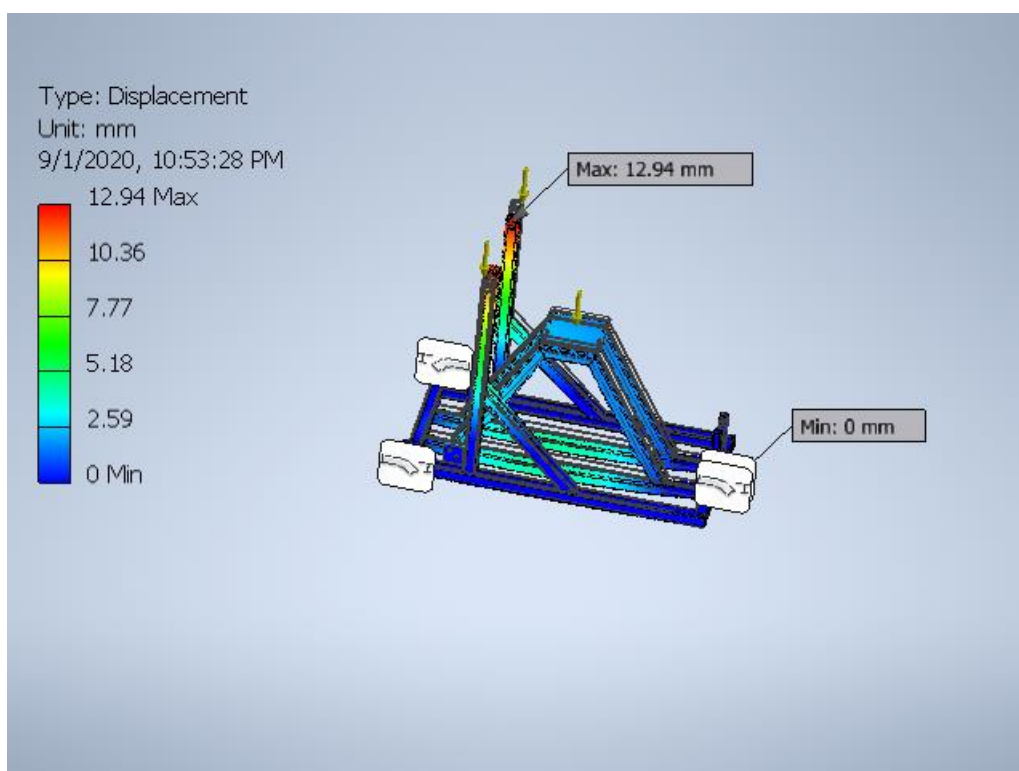
Слика 32. Фиксирани делови конструкције при оптерећењу 30kN са прслином 1mm



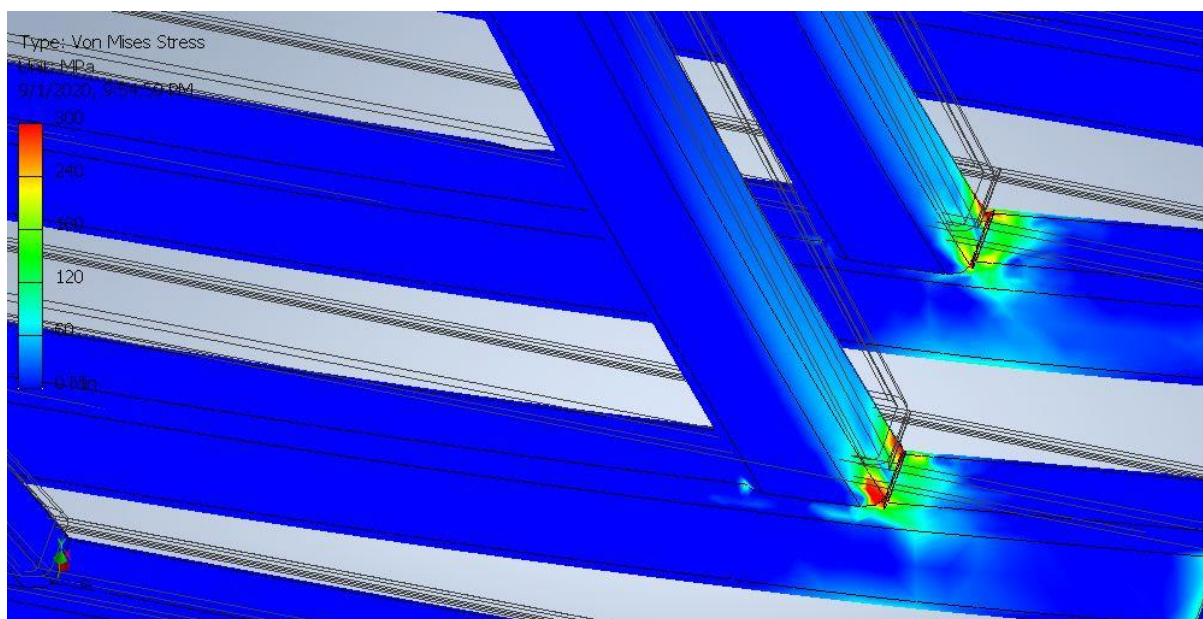
Слика 33. Оптерећење од 30kN на конструкцији са прслином 1mm



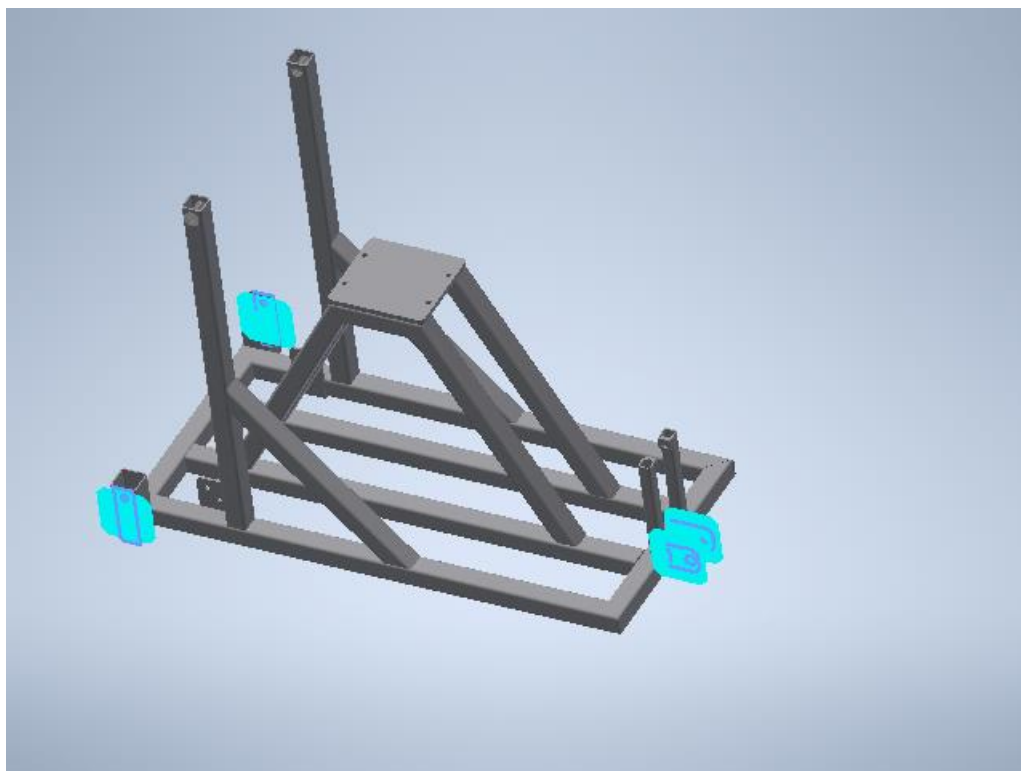
Слика 34. Von Mises–ови напони при оптерећењу 30kN са прслином 1mm



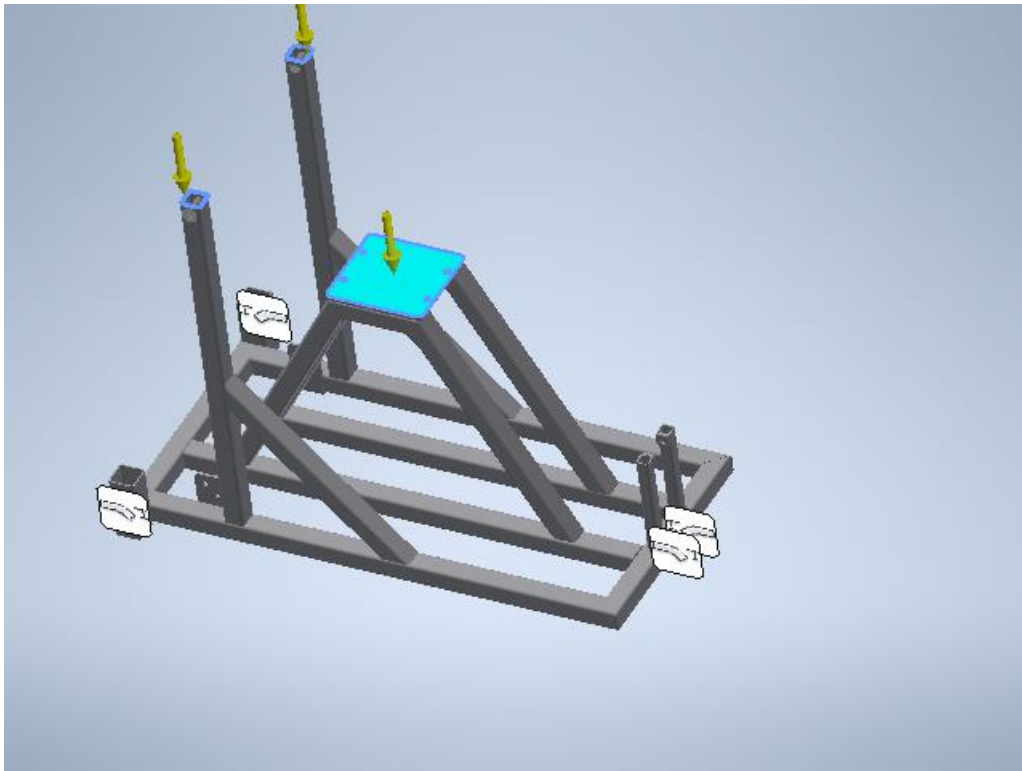
Слика 35. Деформације при оптерећењу 30kN са прслином 1mm



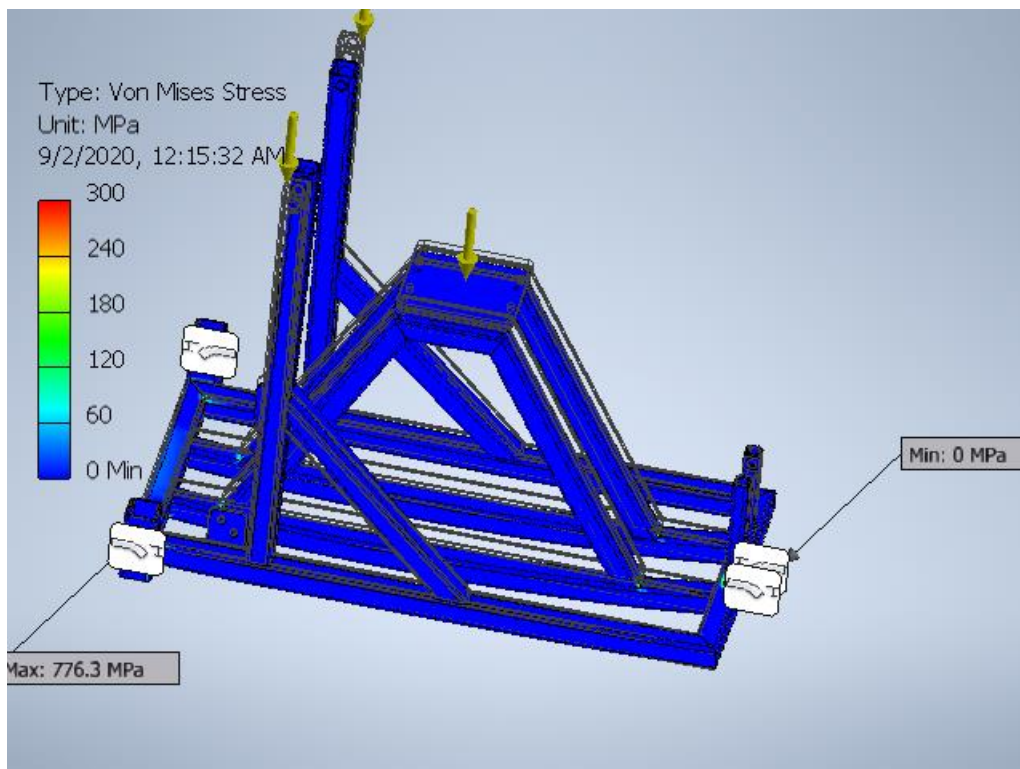
Слика 36. Прслина 1mm са оптерећењем од 30kN



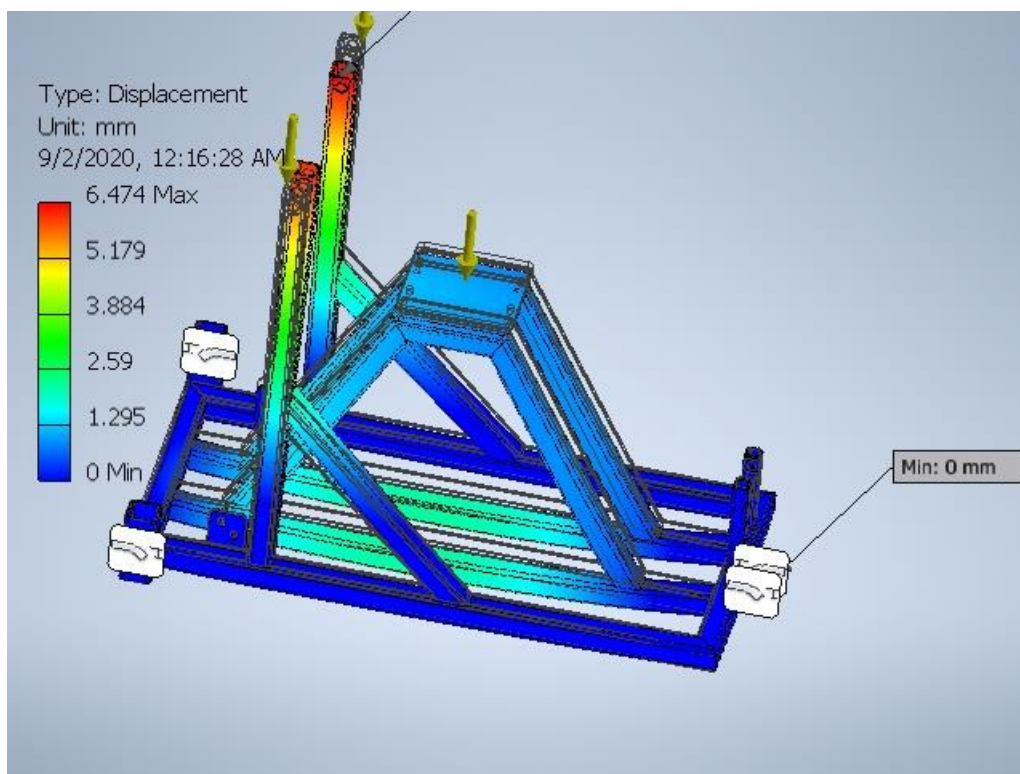
Слика 37. Фиксирани делови конструкције при оптерећењу 15kN са прслином 2.5mm



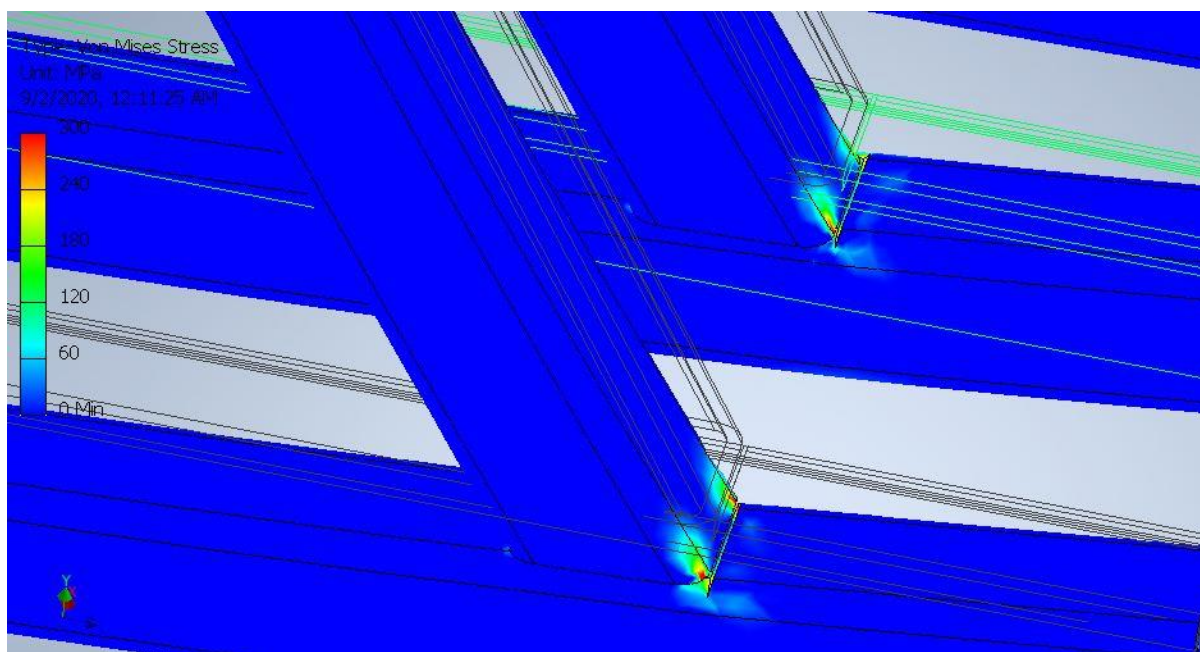
Слика 38. Оптерећење од 15kN на конструкцији са прслином 2.5 mm



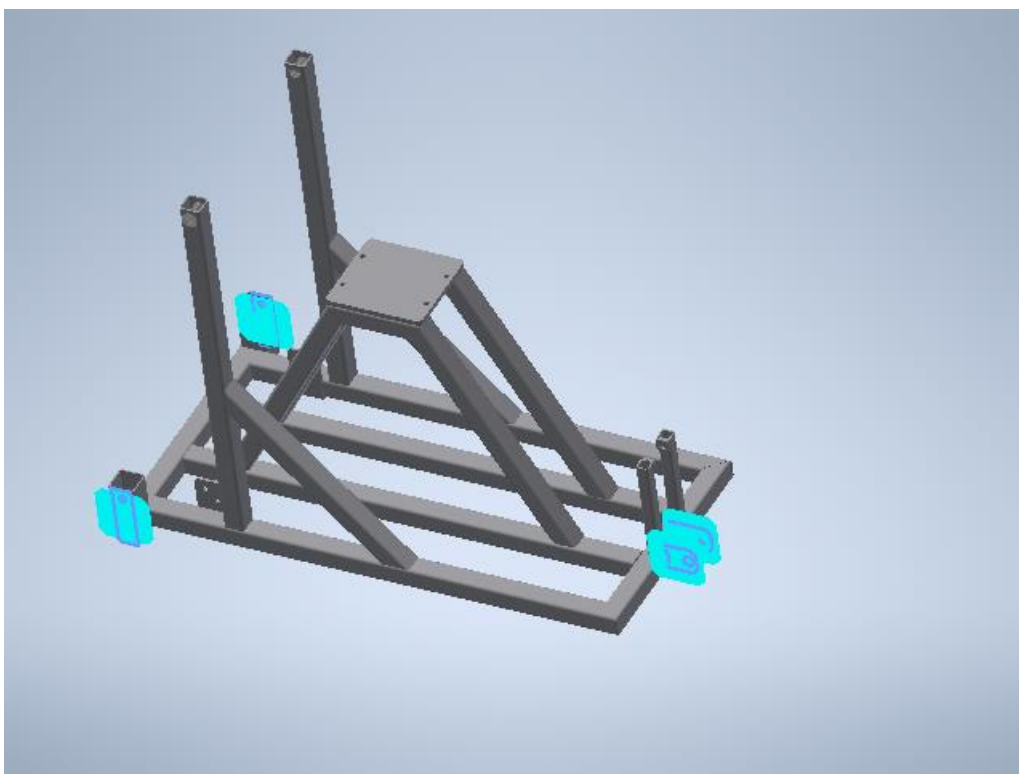
Слика 39. Von Mises–ови напони при оптерећењу 15kN са прслином 2.5mm



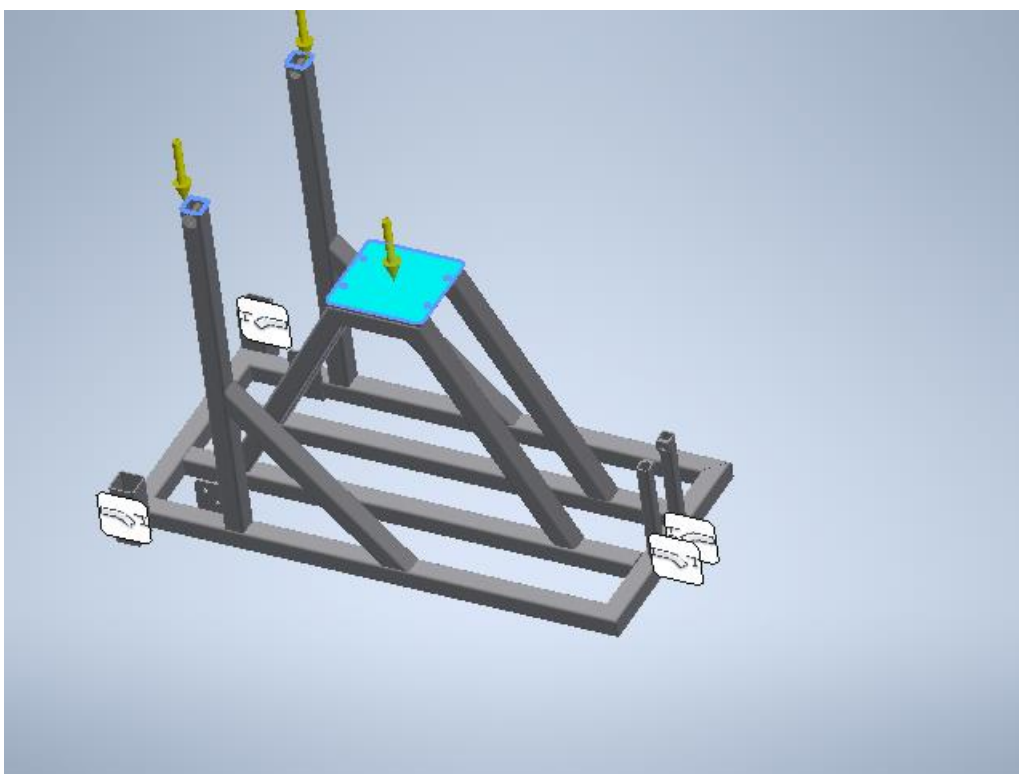
Слика 40. Деформације при оптерећењу 15kN са прслином 2.5mm



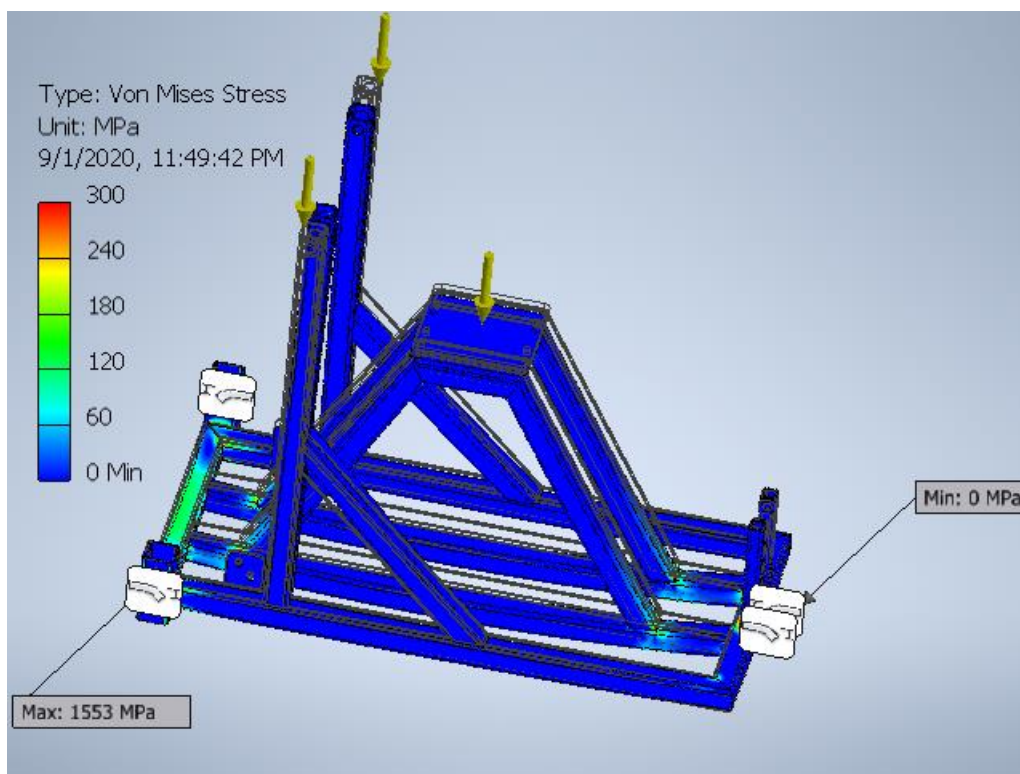
Слика 41. Прслина 2.5mm са оптерећењем од 15kN



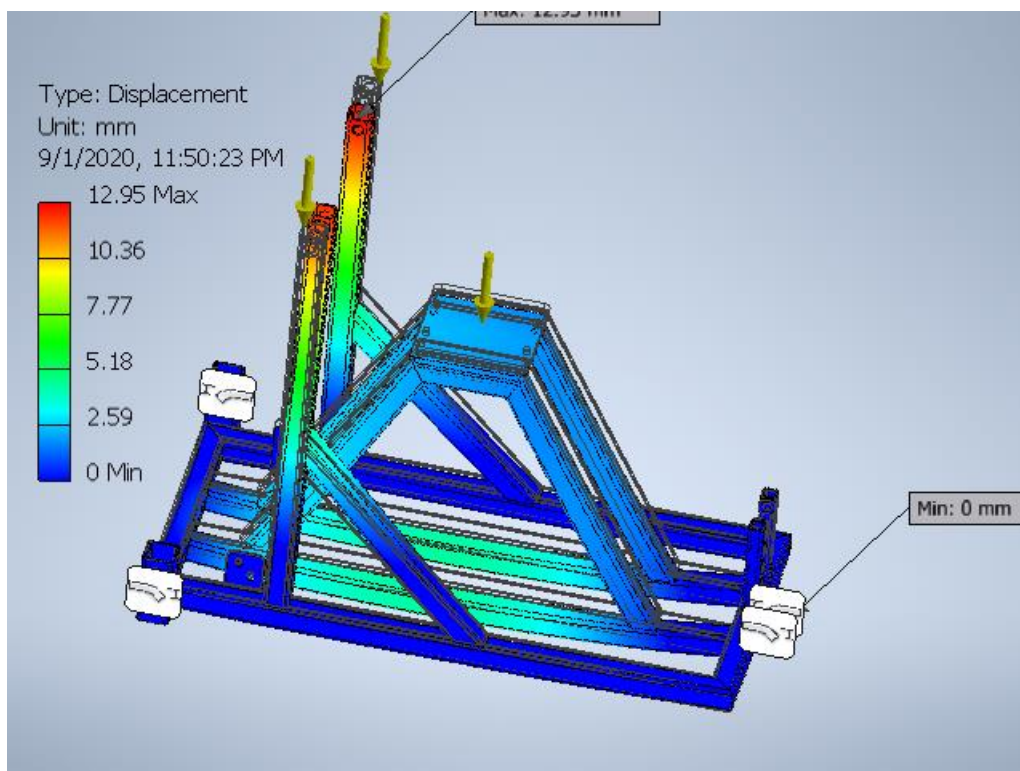
Слика 42. Фиксирани делови конструкције при оптерећењу 30kN са прслином 2.5mm



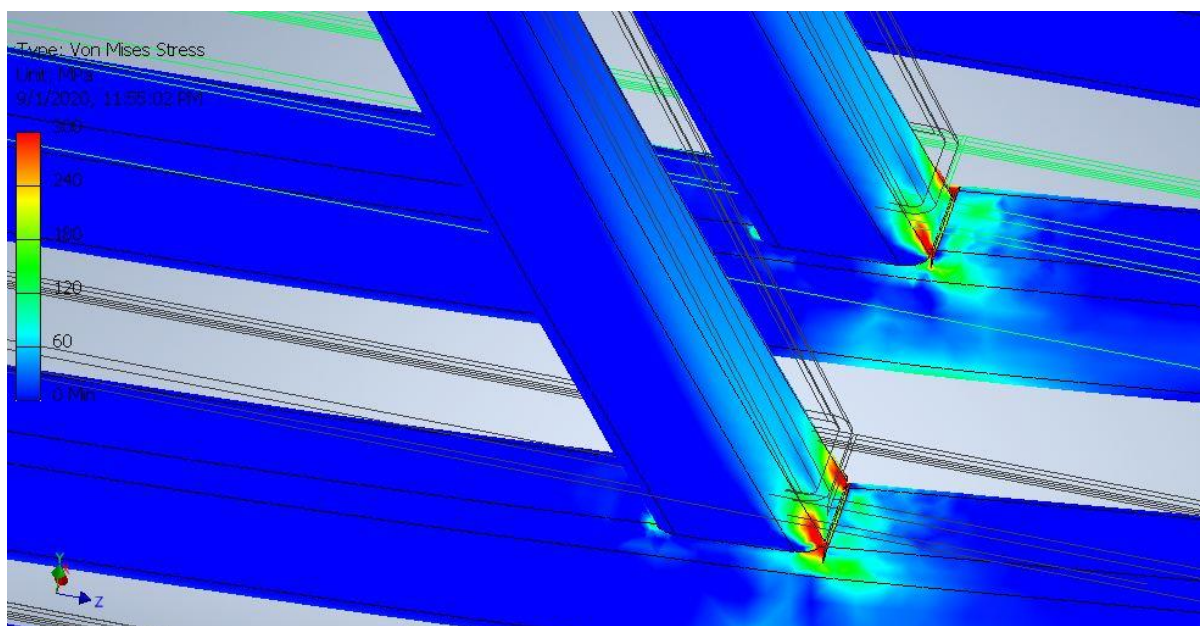
Слика 43. Оптерећење од 30kN на конструкцији са прслином 2.5 mm



Слика 44. Von Mises–ови напони при оптерећењу 30kN са прслином 2.5mm



Слика 45. Деформације при оптерећењу 30kN са прслином 2.5mm



Слика 46. Прслина 2.5mm са оптерећењем од 30kN

Упоредни резултати напона и деформација за оптерећења 15kN и 30kN приказани су у табелама.

Табела 6. Максимални напон

	15kN	30kN
Без прслине	367.5 MPa	735 MPa
Прслина 1mm	491.45 MPa	982.907 MPa
Прслина 2.5mm	776.3 MPa	1552.56 MPa

Табела. Деформација

	15kN	30kN
Без прслине	5.05841 mm	10.1168 mm
Прслина 1mm	6.4721 mm	12.9442 mm
Прслина 2.5mm	6.4738 mm	12.9475 mm

Пре почетка анализе конструкције у програм Inventor су унете карактеристике конструкције као што су:

- материјал (алуминијум 6061)
- фиксирани су делови конструкције
- дефинисана су оптерећења (15kN и 30kN)
- генерисана је мрежа

Након унетих података програм је извршио прелиминарни прорачун и дао резултате анализе без прслине. На основу резултата прелиминарног прорачуна унета је прслина на критичном месту. Вршене су анализе са прслинама од 1mm и 2,5mm.

Анализом конструкције под оптерећењем од 15kN долазимо до следећих резултата:

-Максимални напон конструкције без прслине је 367.5 МПа, а деформација је 5.05841 mm

-Максимални напон конструкције са прслином од 1mm је 491,45 МПа, а деформација је 6,4721 mm

-Максимални напон конструкције са прслином од 2,5 mm је 776,3 МПа, а деформација је 6,4738 mm

Анализом конструкције под оптерећењем од 30kN долазимо до следећих резултата:

-Максимални напон конструкције без прслине је 735 МПа, а деформација је 10,1168 mm

-Максимални напон конструкције са прслином од 1mm је 982,907 МПа, а деформација је 12,9442 mm

-Максимални напон конструкције са прслином од 2,5 mm је 1552,56 МПа, а деформација је 12,9475 mm

Анализом добијених података долазимо до закључка да са појавом прслине, као и са њеним растом долази до раста напона, као и повећања деформација.

6.ЗАКЉУЧАК

Заваривање је технолошки поступак за спајање истих или сличних метала. Спајање елемената се остварује уз помоћ високе температуре која изазива топљење додатног и основног материјала на месту споја.

У механици се под прслином подразумева одсуство везе између два суседна слоја - атома. Услед грешака у шавовима долази до концентрација напона па, у случају појаве зареза, прслина или већих укључака троске или ваздуха, напони у овим тачкама могу чак да буду већи од напона на граници развлачења. Савременим концептом замор дефинише као оштећење конструкцијског елемента услед постепеног ширења прслина које је узроковано учесталим понављањем напона. Ламеларно цепање је последица пукотина које се јављају непосредно испод зоне утицаја топлоте у основном материјалу.

У овом раду је анализирано напонско-деформацијско стање заварене конструкције са прслином. Анализирана је конструкција са оптерећењем 15kN и прслинама од 1mm и 2.5 mm, као и оптерећењем од 30kN и прслинама од 1mm и 2.5 mm. Анализиран је раст напона у конструкцији услед настанка прслина различитих димензија. Дошло се до закључка да при оптерећењу од 15kN, са појавом прслине расте и напон, а напон се повећава такође и са повећањем прслине на критичном месту на конструкцији. Са повећањем оптерећења на 30kN, а при истим димензијама прслине такође долази до пораста напона. Такође, у оквиру рада је извршена анализа раста деформација. Пораст деформација конструкције за оба оптерећења и са прслинама су приметна у односу на конструкцију без прслине.

Конструкција која је анализирана у овом раду је конструисана тако да може да поднесе и нешто већа оптерећења од предвиђеног као и мале иницијалне прслине док са већим прслинама напони и деформације прелазе граничне вредности и сигурно би дошло до лома конструкције. Места на којима је предпостављано да ће се јавити иницијална прслина су узета у зони вара и на месту где се јављају највећи напони.

7. ЛИТЕРАТУРА

- [1]Anderson, T.L., Fracturemechanics, Boca Raton, 2005.
- [2]Буђевац, Д., Марковић, З., Богавац, Д., Тошић, Д., Металне конструкције, Грађевински факултет, Београд, 1997.
- [3]Живојиновић, Д., Примена механике лома напроцену интегритета заварених конструкција од легура алуминијума, Докторска дисертација, Машински факултет, Београд, 2013.
- [4]Јовановић, М., Лазић, В., Технологија ливења и заваривања, Факултет инжењерских наука, Крагујевац, 2015.
- [5]Марковић, Б., Машински елементи, Скрипта у електронској форми, Машински факултет, Сарајево, 2016.
- [6]Марјановић, В., Увод у механику лома, Скрипта у електронској форми, Факултет инжењерских наука, Крагујевац, 2020.
- [7]Марјановић, В., Металне конструкције, Скрипта у електронској форми, Факултет инжењерских наука, Крагујевац, 2018.
- [8]Петковић, З., Острић, Д., Металне конструкције у машиноградњи, Машински факултет, Београд, 1996.
- [9]Прорачун челичних конструкција, Београд, 2006.
- [10]Welding inspection - steels