

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу

Богдан З. Благојевић
Моделирање и структурна анализа
фелни аутомобила
мастер рад

Крагујевац, 2019.

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Мастер студије

Модул: Машинске конструкције и механизација

Предмет: Композитне конструкције

Број индекса: 332/2017

Богдан З. Благојевић

Моделирање и структурна анализа фелни аутомобила

мастер рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. Др Зорица Ђорђевић, ред. проф - ментор

2. _____

3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____

У оквиру овог мастер рада кандидат треба да изврши моделирање и структурну анализу фелни аутомобила, које су израђене од различитих материјала, као што су челик, алуминијум и карбон.

Препоручена литература:

- [1] Ђорђевић З.: „Композитне конструкције”, Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, 2018.
- [2] Јовановић М., Лазић В., Арсић Д.: „Наука о материјалима”, Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, 2017.
- [3] Јовановић М., Лазић В., Адамовић Д., Ратковић Н.: „Машински материјали”, Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, 2003.

Крагујевац, јун 2019. год.

Ментор:
др Зорица Ђорђевић, ред. проф.

Резиме

Предмет овог рада јесте моделирање и структурна анализа фелни аутомобила од различитих материјала. У уводном делу рада описани су материјали који се данас користе, са главним освртом на композитне материјале. Поред тога, дат је историјат композитних материјала, од чега су изграђени, класификација, као и њихове предности. Након тога, дата је примена композитних материјала у аутомобилској индустрији. На крају овог рада, приказан је детаљан поступак моделирања фелни аутомобила у софтверском пакету *Autodesk Inventor*, као и структурна анализа фелни аутомобила од материјала као што су: челик, алуминијум и карбон.

Кључне речи: фелне, аутомобили, композитни материјали, *Autodesk Inventor*.

Abstract

The subject of this paper is modeling and structural analysis of car rims from various materials. The introductory part of the paper describes the materials that are used today, with a main focus on composite materials. In addition, the history of composite materials is given, what they are built from, the classification, and their advantages. Next, the use of composite materials in the automotive industry is given. At the end of this paper, a detailed procedure for modeling the car rims in the Autodesk Inventor software package is presented, as well as a structural analysis of the car rims from materials such as steel, aluminium and carbon.

Keywords: wheels, automobile, composite materials, Autodesk Inventor.

Садржај

1. Увод.....	1
2. Историјат композитних материјала.....	2
3. Композитни материјали.....	4
3.1 Матрице и влакна	6
3.2 Класификација композитних материјала	11
3.2.1 Композити ојачани честицама	11
3.2.2 Влакнима ојачани композити	12
3.2.3 Структурни композити	13
3.3 Предности композитних материјала.....	15
4. Композитни материјали у аутомобилској индустрији.....	17
4.1 Композитни материјали током историје у аутомобилима	18
4.2 Предности и недостаци материјала који се користе у изради аутомобила.....	19
4.3 Примена композитних материјала у аутомобилима	21
4.4 Фелне аутомобила	22
5. Поступак моделирања фелне аутомобила	24
6. Структурна анализа фелни аутомобила	38
6.1 Графички приказ резултата структурне анализе	53
7. Закључак.....	55
8. Литература	56

1. Увод

Сви предмети који нас окружују, израђени су од неких материјала. Тај велики број материјала и разноврсност њихових особина добија се комбинацијама само 105 елемената периодног система, од којих су 76 метали. Уопштено, под термином материјала, сматра се полупроизвод који служи за даљу прераду како би се добио готов производ [1].

Технички материјали могу бити машински, грађевински, електротехнички, текстилни итд. Предмет изучавања на које се обраћа пажња у овом случају су машински материјали, као што су: метали и металне легуре, полимери (пластика, еластомери), композити и керамике намењене за различите структуре. Поред оваквих машинских материјала, међу њих спадају и течне материје (нафта, керозин, бензин, ацетон итд.), као и гасовите материје односно погонски материјали и заштитни гасови [2].

Развојем материјала добијен је широк асортиман који се може употребити за израду различитих конструкција. На располагању су материјали као што су: метали, керамике и полимери чијом се комбинацијом могу добити и нови тј. сложени материјали који се називају композити. Најстарији композити су бетон и дрво. Као што је написано, композити су добијени комбинацијом више материјала, тако да се бетон састоји од у води замешаних песка и цемента и челичне арматуре. Дрво се састоји из целулозних влакана и природне смоле која има везивну улогу [2].

Композити су се показали као добра замена за класичне материјале као што су алуминијум, челик и остали. Предност примене ових материјала, огледа се у много чему. Пошто су то нови материјали, они имају могућност константог развијања како би се добили нови и побољшани материјали са знатно бољим карактеристикама.

Многобројна истраживања показују да ће се и даље, било то да су машинске или грађевинске конструкције, највише примењивати метални материјали, због тога и даље треба посвећивати пажњу њиховој примени. Где год је то могуће, тежи се да се метали замене композитима који су ипак савременији и имају боље карактеристике [2].

Композитни материјали се примењују у многим гранама индустрије као што су: авионска и ракетна (где имају веома велику примену), изради машинских елемената, спортских реквизита, пловних објеката, у аутомобилској и процесној индустрији, као и у изради одела и шлемова у војне и полицијске сврхе и у другим областима [3].

Пошто композити имају широку примену у аутомобилској индустрији, један од многобројних делова који је израђен од композита су и фелне аутомобила. Фелне су се некада израђивале од дрвета, али даљим развојем материјала, настале су и од челичних, алуминијумских и композитних материјала. Композитне фелне најчешће своју примену имају у ауто мото спортовима.

У овом раду извршено је моделирање фелни аутомобила у софтверском пакету *Autodesk Inventor*, као и структурна анализа фелни које су израђене од различитих материјала.

2. Историјат композитних материјала

Прва коришћења композитних материјала датирају још из 1500. године п.н.е., када су стари Египћани и досељеници из Месопотамије користили мешавину блата и сламе како би направили јаке и издржљиве конструкције. Слама се користила као ојачање и за израду осталих продуката од композита као што су бродови, керамика [4].

Каснијих година, односно 1200. године н.е., Монголи су израдили први лук за стрелу од композита који је приказан на слици 2.1. Он је израђен комбинацијом дрва, костију и животињског лепила. Лукове су пресовали и обмотовали су их корицом брезе. Захваљујући томе, лукови су били јаки и прецизни, због чега је доминација војске Џингис Кана била осигурана [4].



Слика 2.1: Композитни лук [5]

Модерна ера композита почиње када су научници развили пластику. До тада су природне смоле добијене од биљака и животиња биле једини извор лепила и везива. Раних 1900-тих година, развијени су винил, полистирен, фенол и полиестар. Ови нови синтетички материјали по карактеристикама надмашују смоле које потичу из природе [4].

Сама пластика није могла да пружи довољну јачину за примену у конструкцијама и због тога, потребно је било обезбедити додатну снагу и крутост. 1935. године, представљена су стаклена влакна или стаклопластика. Стаклена влакна у комбинацији са пластичним полимерима представљају веома јаку структуру која поред тога има и малу масу. Захваљујући таквим особинама које су добијене, стаклена влакна представљају један нови почетак у индустрији [4].

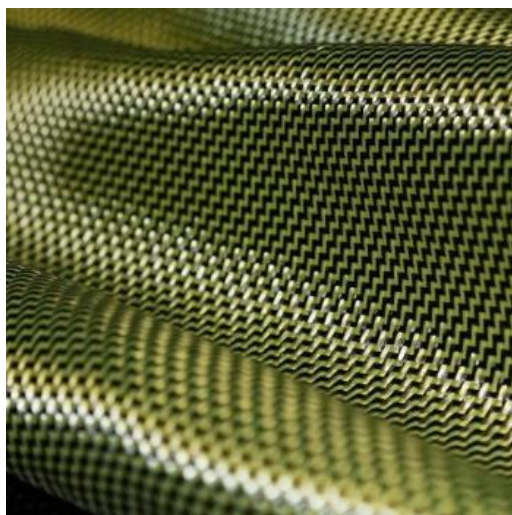
Један од највећих напредака у развоју композитних материјала, резултат су потреба у ратном времену. Као што су Монголи развили композитни лук, Други светски рат донео је влакна ојачана пластиком из лабораторије у стварну производњу [4].

За лакшу примену у војним авионима, потребни су били неки алтернативни материјали. Инжењери су ускоро схватили и остале предности композита осим што су снажни и лагани. Откривено је да су стаклена влакна добар материјал за заштиту радарске опреме, тако да је он убрзо био прилагођен за такву намену [4].

До краја Другог светског рата, мала индустрија композитних материјала била је у пуном замаху. Због мање потражње за војном опремом, неколико иноватора покушавало је да композитне материјале уведе и на друга тржишта. Бродови су били једни од производа који су имали велике користи [4].

Развили су се нови производни процеси и производи од композита, а они су своје место нашли чак и у спорту. Израђена је прва даска за сурфовање од стаклених влакана која је направила револуцију у том спорту [4].

1970-их година индустрија композита почела је да сазрева. Развијене су боље пластичне смоле и побољшана влакна за ојачање. Настала су арамидна влакна, позната још као и Кевлар који је приказан на слици 2.2. Због своје високе чврстоће и густине, као и мале масе, нашао је велику примену у изради заштите за тело тј. панцира. Поред арамидних влакана, развијена су и карбонска влакна, која су кренула све чешће да замењују делове који су раније били израђивани од челика [4].



Слика 2.2: *Кевлар* [6]

Композитна индустрија се и даље развија, а велики део раста, фокусиран је на обновљиву енергију. Лопатице код ветротурбина које су приказане на слици 2.3, због својих величина које стално расту, захтевају и напредне композитне материјале [4].



Слика 2.3: *Лопатице ветротурбине* [7]

3. Композитни материјали

У константном истраживању и развоју материјала, како би се добили материјали са што већом јачином и крутошћу, а такође и са што мањом масом, развијени су материјали који се зову композити. Они су израђени од два или више материјала различитог састава, као што су:

- метали,
- керамике,
- полимери итд.

Поред тога, они могу бити израђени и од различитих облика додатака:

- влакна,
- ламеле,
- зрна.

Све се ово ради са циљем како би се добио нов материјал са великим бројем повољних особина као што су [3]:

- механичке особине,
- отпорност на утицај околине,
- повећање радног века итд.

Код композита, користе се најбоље особине саставних материјала и захваљујући томе, они имају предност у односу на класичне материјале, а сам циљ коришћења композита је да се постигну особине које материјали појединачно не поседују. Висока вредност специфичне чврстоће и специфичног модула је једна од главних предности и захваљујући томе, доприноси се изради делова знатно мање масе, што је веома важно тамо где је маса делова од великог значаја [3].

Композити се састоје од два елемената, а то су влакна и матрице. Улога влакна је да у сваком слоју обезбеђује способност ношења оптерећења, док матрица има улогу да та влакна штити, даје им подршку и преноси оптерећења између влакана. Материјали од којих су матрице израђене, могу бити: металне, керамичке или полимерне. Материјали влакна су: стакло, угљеник, бор, арамид итд. [3].

Даљу поделу композита могуће је извршити према врсти ојачања и они се деле на композите ојачане честицама и композите ојачане влакнима, који настављају поделу на једнослојне и вишеслојне композите. Једнослојни композити се састоје од непрекидних једносмерних или двосмерних влакна или од испрекиданих влакна случајне или усмерене оријентације. Вишеслојни композити се деле на ламинате и сендвич панеле [3].

Крутост, отпорност, термичко ширење итд. су једне од карактеристика композита и оне варирају од врсте примењеног материјала, количине, угла оријентације влакна и др. Како би се изабрао адекватан материјал, потребно је сагледати захтеве који се односе на: радни век, сложеност облика производа, вештине прорачуна оптималних карактеристика композита итд. Најбоље резултате могуће је постигнути комбинацијом традиционалних металних материјала и композита [3].

Композитни материјали се одликују малом масом и добрим односом маса-отпорност, у поређењу са класичним материјалима и захваљујући таквој особини, погодни су да се прилагоде различитим захтевима. Предности композита у односу на класичне материјале су следеће [3]:

- затезна чврстоћа композита је негде око четири до шест пута већа у поређењу са челиком или алуминијумом,
- повећана је отпорност на удар,
- повећана је граница издржљивости на замор,
- отпорнији су на вибрације у поређењу са металима,
- показују велику отпорност према корозији и температурним променама,
- имају дуг животни век,
- смањује се број саставних делова итд.

Конструктори су свесни какве предности се добијају применом композита и захваљујући томе, у машинској индустрији традиционалне челичне елементе замењују композитима. Највећу примену имају у: авионској и ракетној индустрији, изради машинских елемената, спортских реквизита, изради трупова чамаца и бродова, аутомобилској индустрији итд. Захваљујући својим особинама, они продиру и освајају нова тржишта тако да је количина и могућност примене композита у сталном порасту и они данас заузимају значајну позицију на тржишту материјала за примену у инжењерству [3].

Један од главних захтева који се поставља испред машинских инжењера је покушај смањења цене композита која је већа у односу на остале материјале. На цену још утиче и то што је производња на нивоу појединачне. Неки од главних недостатака су висока цена производње материјала, као и потреба за већим бројем контролних прегледа током производње и сама могућност појаве производа који нису за употребу се сматрају главним недостацима. Како би се цена смањила, потребно је повећати обим примене. Да би се до тога дошло, потребно је истаћи комерцијалну страну композита и омогућути јој много већу понуду посла и могућност примене посебно у авио, аутомобилској и транспортној индустрији [3].

Примена композитних материјала у нашој земљи је још увек веома смањеног обима за разлику од тренда у свету. Због својих предности, потребно је стално радити на развоју свести и неопходности њихове примене у инжењерству. Индустрија композитних материјала широм света стално улаже средства у циљу побољшања технологије израде композитних делова. Баш због тога, не чуде истраживачке активности у смислу развоја теоријских и нумеричких метода за анализу различитих типова композитних конструкцијских елемената. Од великог је значаја развити методе анализе још у фази пројектовања, као и у фази експлоатације, све у циљу упозорења на губитак носивости конструкције која може бити проузрокована губитком стабилности.

Пошто данас екологија има веома битну улогу у очувању планете, спроведена су истраживања у циљу развоја и примене обновљивих биоразградивих биљних влакана. Оваква влакна се одликују знатно мањом масом, чак и до 20% у односу на синтетичка, нижом ценом производње и потпуно задовољавају поменуте еколошке стандарде. Са еколошког аспекта, при спаљивању не ослобађају вишак CO₂ у атмосферу [3].

Композитни материјали за разлику од метала не подлежу пластичној, него еластичној деформацији. Метали отказују стварањем прскотина, док композити

отказују на више начина као што су: одвајањем влакна од основе, раслојавањем, кидањем влакна, стварањем прскотина у основи итд. Одлика композита је да после делимичног оштећења, они и даље поседују релативно велику носивост, што је последица преношења оптерећења преко великог броја влакана [3]. На слици 3.1, приказан је лом једноделног композитног карданског вратила.



Слика 3.1: Лом композитног карданског вратила [8]

3.1 Матрице и влакна

Композитни материјали који су влакнима ојачани, добијени су комбинацијом чврстих, крутих и кртих влакана (прекидна и дисперзна фаза) са меком и пластичном матрицом (непрекидна фаза).

Функција матрице је да она међусобно повезује влакна и ћелије, тако што ће се преко ње преносити оптерећења и распоређивати на влакна. Материјал матрице треба имати способност пластичне деформације. Њена улога је да штити влакна од механичких оштећења, како не би дошло до површинских оштећења влакана који су извори формирања прслина које могу проузроковати лом, а поред тога имају улогу заштите и од хемијских утицаја средине у којој функционише. Матрица служи као заштитна баријера ширењу прслина тако што она раздваја влакна и захваљујући њеној пластичности, спречава се евентуално ширење кртог лома од влакна до влакна, што би на крају довело до коначног лома конструкције. Ако поједина влакна попусте услед ширења прслине, ни тада неће доћи до лома композитног материјала. Лом се може десити ако се велики број влакана прекине, а затим одвоји и извуче из матрице [9].

Матрице за израду композитних материјала могу бити [3]:

- полимерне,
- металне,
- керамичке,
- угљеничне,
- полиматричне.

Све набројане матрице, имају своје предности, па тако металне матрице са додацима трајно смањују деформације на повишеним температурама, код композита

које имају керамичку матрицу повећава се жилавост, док код полимерних матрица повећавају се чврстоћа и крутост.

За израду конструкционих композита, најчешће су у примени [3]:

- матрице на основу епоксидних смола,
- матрице на основу фенолних смола,
- матрице на основу полиестерских смола,
- матрице са металном основом.

Епокси смоле су вештачке смоле које се углавном користе у смеши у коју улазе пуниоци, разређивач и друге смоле. Најважнија особина је да су се добро показале у комбинацији са висококвалитетним влакнима. Предности епокси смола су [3]:

- релативно висока тврдоћа,
- температурна стабилност,
- средња механичка отпорност,
- отпорност на замор,
- поседују добру димензиону стабилност,
- хемијски инертне.

Фенолне смоле се доста добро комбинују са армирајућим влакнима. Недостатак је тај што у процесу очвршћавања учествује велика количина испарљивих материја и захваљујући томе, тешко је добити висококвалитетне смоле. Карактеристике фенолних смола су следеће [3]:

- тврде,
- непокретне,
- хемијски инертне према органским растварачима и киселинама.

Полиестерске смоле су јефтине и због тога имају широку примену. Ове смоле се често користе у бродоградњи за изградњу мањих пловила. Поседују добра механичка својства на собним температурама, али недостатак им је мања издржљивост на повишеним температурама. У неким конструкцијама, замењују се са епоксидним смолама зато што се скупљају при полимеризацији [3].

Металне матрице су добијене од прахова разних метала и њихових легура. Главни недостатак металних матрица је у компликованој технологији израде, због чега се њихова примена за израду композита ограничава [3].

У табели 3.1 приказане су најчешће коришћене матрице за израду композитних материјала са својим физичко-механичким својствима.

Таблица 3.1: Физичко-механичка својства материјала матрице [3]

Смола	Густина kg/m ³	Затезна чврстоћа МПа	Модул еластичности GPa
Епоксидна	1150	82.74	4300
Полиестерска	1100-1300	43.31-68.95	3300
Фенолна	1300	41.31-62.05	3100

Основни захтеви који се постављају пред влакнима су [3]:

- висока чврстоћа влакана,
- високи модули еластичности,
- одговарајуће димензије и облик влакана,
- постојаност својстава,
- једноставност израде,
- добра адхезивност са матрицом итд.

Код конструкционих композита, најчешћа влакна која се користе су следећа: стаклена, угљенична, органска (кевлар-арамид и др.) и влакна бора. На слици 3.2 приказана су карбонска, стаклена и арамидна влакна.



Слика 3.2: Карбонска, стаклена и арамидна влакна [11]

Комбинација стаклених влакана и полиестер или епокси смоле се често среће у пракси. Недостатак ових влакана је мали модул еластичности и што они губе отпорност на повишеним температурама. Предности су следеће [3]:

- висока чврстоћа уз малу масу,
- димензијска стабилност,
- добра електрична својства,
- једноставна производња,
- приступачна цена.

Материјали који су захтевали већу јачину, довели су до тога да своју примену имају композити са угљеничним влакнима у комбинацији са епоксидном смолом. Већа цена производње у односу на стаклена влакна је један од главних недостатака ових материјала, али зато су предности огромне, као што су [3]:

- велика чврстоћа,
- велики модул еластичности,
- мала густина,
- одлична обрадивост,
- постојаност на високим температурама,
- низак коефицијент температурног ширења,
- инертност према већини реаганса.

Због својих особина као што су велика чврстоћа и мала маса, нашли су велику примену у болидима Формуле 1, где је 90% болида израђено од угљеничних влакана. Када су угљенична влакна кренула да се користе у Формули 1 давне 1981. године, од тада па све до данас, догодио се само један смртни исход. Угљенична влакна су поред безбедности, допринела и комфору, као и перформансама. Колико су они заправо лаки, показује чињеница да 20% од масе каросерије болида, долази само од налепница и боја. На слици 3.3 приказан је данашњи болид који се користи у Формули 1.



Слика 3.3: Болид у Формули 1 [12]

Поред тога, заштитне kacиге које возачи користе, имају масу до 1.4 kg, све захваљујући примени угљеничних влакана. На слици 3.4 приказана је заштитна kacига.



Слика 3.4: Заштитна kacига [13]

Још једна занимљивост што се тиче угљеничних влакана је та да су спороведена испитивања колико оптерећење може да издржи епрувета од угљеничних влакана. Карактеристике епрувете су те да је дебљина била само 1,5 mm, а њена маса је износила само 10 g. Оптерећење на ком је епрувета отказала, износило је 4,5 t, што може да се мери са укупном масом отприлике четири породична аутомобила. До лома епрувета је дошло тако што су прва влакна која су се налазила на ивицама епрувете почела да пуцају, а затим су сва влакна попуцала под оптерећењем.

Кевлар или арамидно влакно је најпознатије органско влакно. Његове предности су следеће [3]:

- врло висока затезна чврстоћа,
- мала густина,
- изванредна отпорност на ударе,
- одлична изолациона и топлотна својства,
- постојаност у широком температурном опсегу,
- не топе се,
- не скупљају се,
- лако се обликују,
- израђују се у облику ткања.

Због својих недостатака као што су ниска притисна чврстоћа, нешто мањи модул еластичности, висока производна цена, често се прибегава решењу да се она користе у комбинацији са влакнима угљеника или бора.

Арамидна влакна се користе за израду [9]:

- ватроотпорних одела,
- панцира,
- пнеуматика,
- конопаца,
- каблова,
- спортских реквизита,
- кућишта за млазни мотор код авиона.

Велику притисну чврстоћу и отпорност на торзију поседују влакна бора, а још се одликују и позитивним коефицијентом линеарног ширења. Недостаци ових влакана су отежана обрадивост и обликовање због високе тврдоће, као и код већине влакана, имају високу цену израде [3].

Физичко-механичка својства најчешће коришћених влакана дата су у табели 3.2.

Табела 3.2: Физичко-механичка својства влакана [3]

Влакна	Густина kg/m ³	Затезна чврстоћа МПа	Модул еластичности GPa
Стаклена	2400-2500	2100-4600	72-86
Угљенична	1700-2000	2800-4500	260-385
Борна	2600	2800	385-430
Арамидна	1440	2800	135

3.2 Класификација композитних материјала

Према облику димензија, композити се деле на [3]:

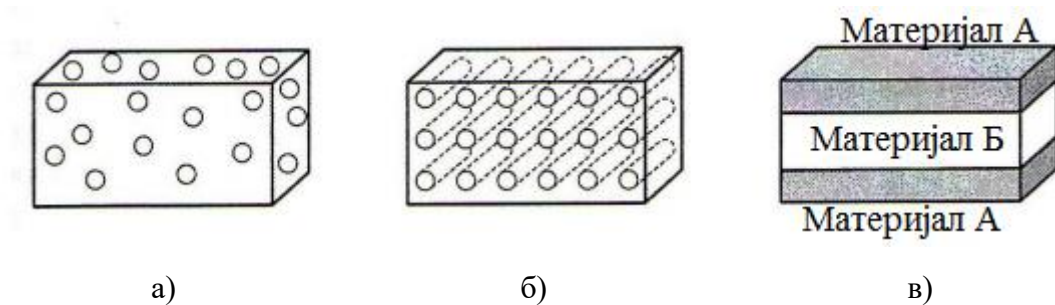
- макроскопски композитне материјале,
- микроскопски композитне материјале,
- нано композитне материјале.

Поред облика димензија, они још могу бити [3]:

- изотропни,
- анизотропни.

Разлика између изотропних и анизотропних композита је у својству материјала. Изотропни имају иста својства материјала у свим правцима, док анизотропни имају различита својства материјала у свим правцима. Поред тога, међу изотропне композите спадају и они који су ојачани честицама, док су анизотропни ојачани влакнима.

Према облику додатака, композити су приказани на слици 3.5:



Слика 3.5: Подела композита према облику додатака: а) ојачани честицама, б) ојачани влакнима, в) структурни композити [10]

3.2.1 Композити ојачани честицама

Композити са честицама које су уграђене у матрице имају најдужу примену и најједноставније се добијају и њихов распоред је обично случајан јер честице неког материјала се налазе у основном материјалу само ради побољшања карактеристика [3].

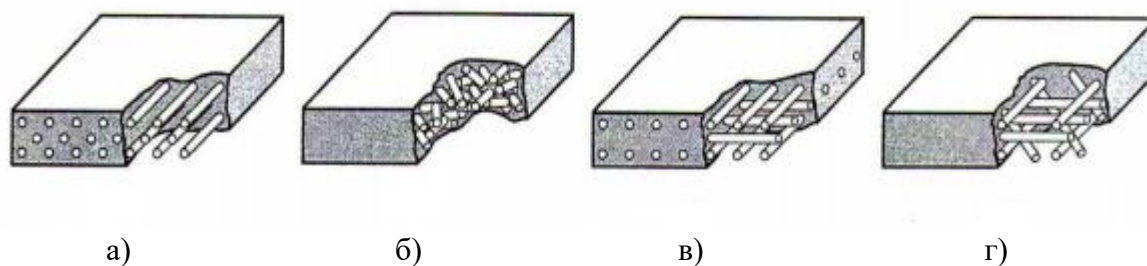
Композити са честицама могу се поделити на [9]:

- композите са дисперзијом,
- композите са великим честицама.

Код композита са дисперзијом, повећана чврстоћа се постиже екстремно малим честицама чије су величине од 10 до 250 nm. Њихова функција је да успоравајугибање дислокација. Код композита са великим честицама, механичка својства су побољшана деловањем самих честица. Као пример, може се узети бетон који се састоји од честица повезаних цементом [10].

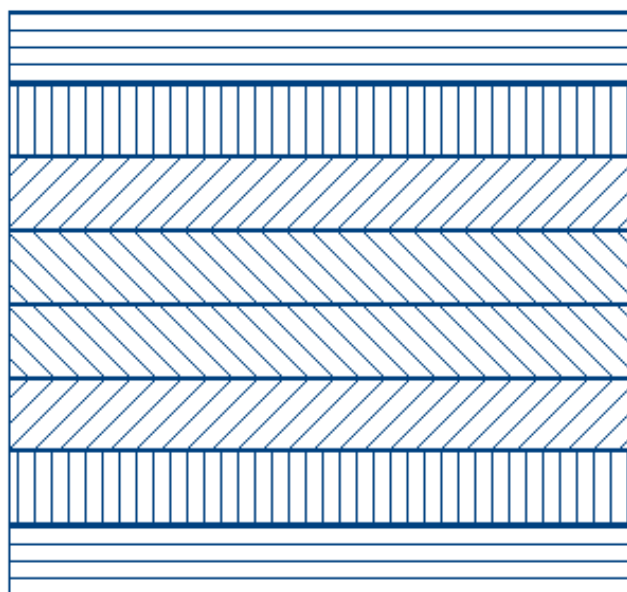
3.2.2 Влакнима ојачани композити

Влакнима ојачани композити представљају комбинацију матрице која је слабијег материјала, у коју су убачене јака влакна. Улога матрице је да обезбеђује монолитност композита, фиксира положај влакана и даје производу одређени облик. Влакна могу бити распоређена на различите начине, а често се користи паралелан распоред влакана из разлога што при ткању може доћи до оштећења влакана, уједно и до снижења карактеристика композита [3]. Врсте влакана приказане су на слици 3.6.



Слика 3.6: Врсте влакана: а) усмерена, б) случајно усмерена, в) ортогонално распоређена, г) вишесмерно усмерена влакна [10]

Влакнима ојачани композити имају јако добре механичке особине дуж влакана, док у попречном правцу имају слабости. Како би се добио адекватан композит, конструктор мора изабрати адекватну оријентацију влакана како би максимално искористио предност влакана, тако и матрице, све у циљу постизања жељене карактеристике. Оријентација влакана може бити од једноставне до сложене. Сложена оријентација влакана омогућава јачање композита у различитим смеровима [3]. На слици 3.7, приказан је распоред влакана под угловима од 0° , 90° , 45° , -45° , -45° , 45° , 90° , 0° , који је урађен преко софтверског пакета *Femap*.



Слика 3.7: Оријентација влакана

3.2.3 Структурни композити

Комбинација хомогеног и композитног материјала као резултат даје структурни композит. У структурне композите спадају [3]:

- слојевити композити (ламинати),
- сендвич конструкције,
- станични композити.

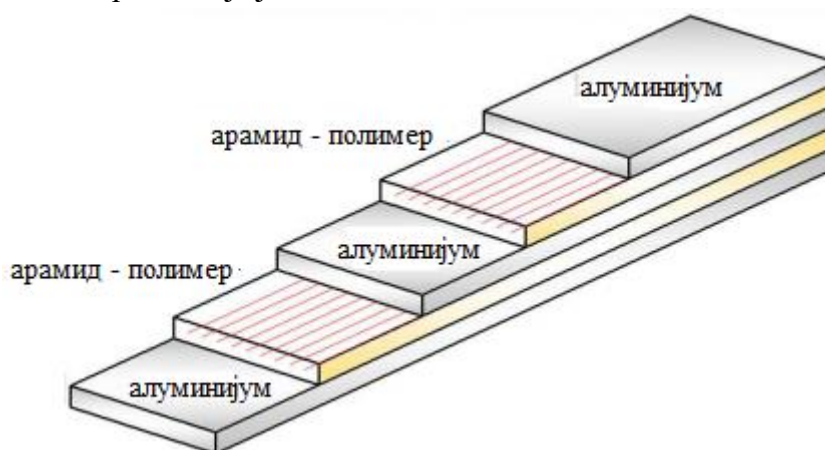
Слојевити композити или ламинати, као што им име каже, састоје се од најмање два или више слојева, односно ламина. Ламинати у зависности од потреба које се траже, могу се конструисати са различитом оријентацијом влакана у слојевима и различитим дебљинама слојева. Слојевити композитни материјали могу бити [3]:

- са танким превлакама,
- са дебљим заштитним слојевима,
- материјали са галванским превлакама,
- биометали итд.

Циљеви који се требају постићи њиховом израдом су да се [3]:

- повећа отпорност на корозију,
- повећа абразивна отпорност,
- повећа чврстоћа влакнасто ојачаних композита у више равни,
- обезбеде различити коефицијенти линеарног ширења.

На слици 3.8 приказан је један од начина слагања композита.



Слика 3.8: Слагање композита [9]

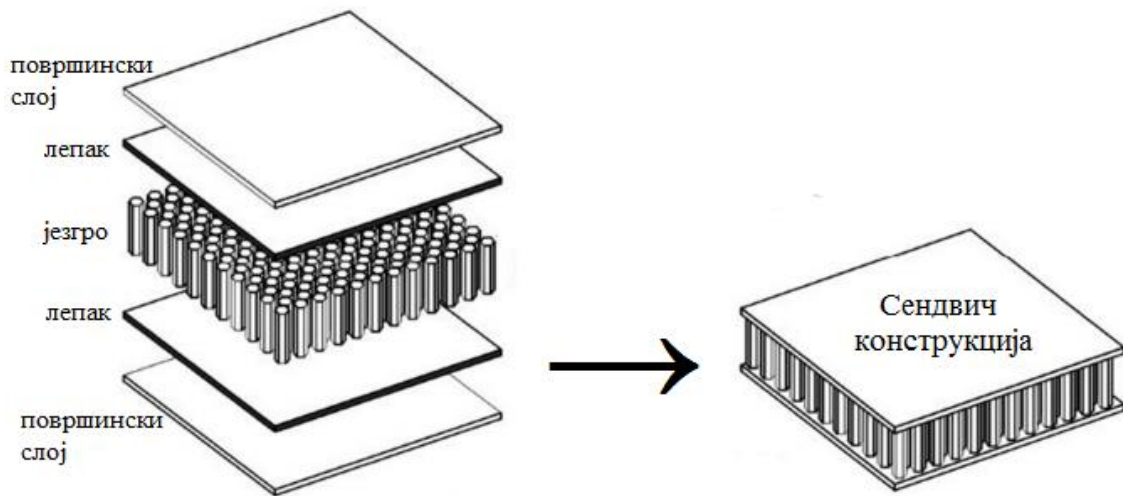
Предности ламинатних конструкција:

- за стварање оштећења потребна је велика енергија удара,
- обезбеђују добру херметичност,
- ниски трошкови производње.

Недостаци ламинатних конструкција [3]:

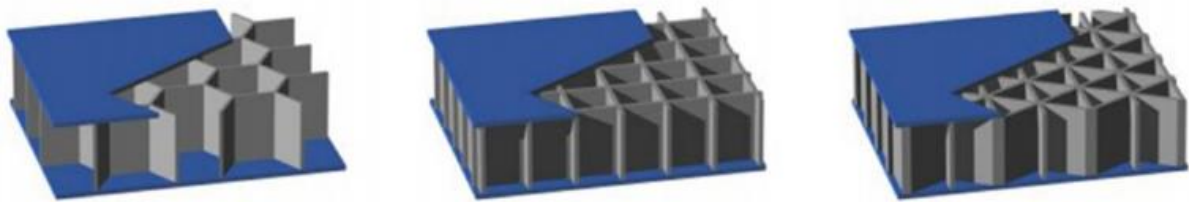
- боља структурна својства су потребна за бољу отпорност на увијање
- тежи су у поређењу са сендвич конструкцијама.

Сендвич конструкције чине танки спољашњи слојеви који су између попуњени лаганим средњим делом. Сендвич конструкција може бити чврста и крута и на то не утичу спољни слојеви и материјал за попуњавање. Језгро има улогу да повећа чврстоћу и крутост при савојним и смичућим попречним оптерећењима, као и на притисак. Спољашњи слојеви преносе највећи део оптерећења и напоне услед напрезања на савијање [3]. Сендвич конструкција приказана је на слици 3.9.



Слика 3.9: Сендвич конструкција [14]

Језгра могу бити различитог облика, као што су нека приказана на слици 3.10.



Слика 3.10: Облици језгра [9]

Предности сендвич конструкција:

- мала оштећења на површинским и подповршинским слојевима се лако уочавају,
- добра отпорност на увијање,
- најповољнији однос чврстоће и масе.

Недостаци сендвич конструкција [3]:

- оштећења настају и при малим ударима,
- могуће истицање течности након оштећења,
- високи трошкови производње.

Станични композити садрже у себи ћелијску структуру која се састоји од ћелија танких, чврстих матрица које су испуњене додатком. Ћелије могу бити отворене и затворене. У групу станичних композита спадају керамичке, металне и полимерне пене [3].

Керамичке пене се одликују великом порозношћу која се креће у опсегу $75 \div 90\%$, малом густином и великом хемијском и топлотном отпорношћу. Због тих особина, примењују се за израду летилица, филтера изложених деловању високих температура или хемикалија [3].

Порозност код металних пена је у опсегу од $40 \div 90\%$. Највећу примену имају алуминијумске пене, које имају малу густину и топлотну проводљивост, али су велике крутости. Поред тога, одликује се тиме што добро пригушују вибрације и буку. Најчешћу примену налазе у изради возила и летилица [3].

Полимерне пене се израђују са отвореним и затвореним ћелијама. Отворене пене карактерише особина да су еластичне, док су затворене круте. Добре особине су им мала густина и топлотна проводљивост [3].

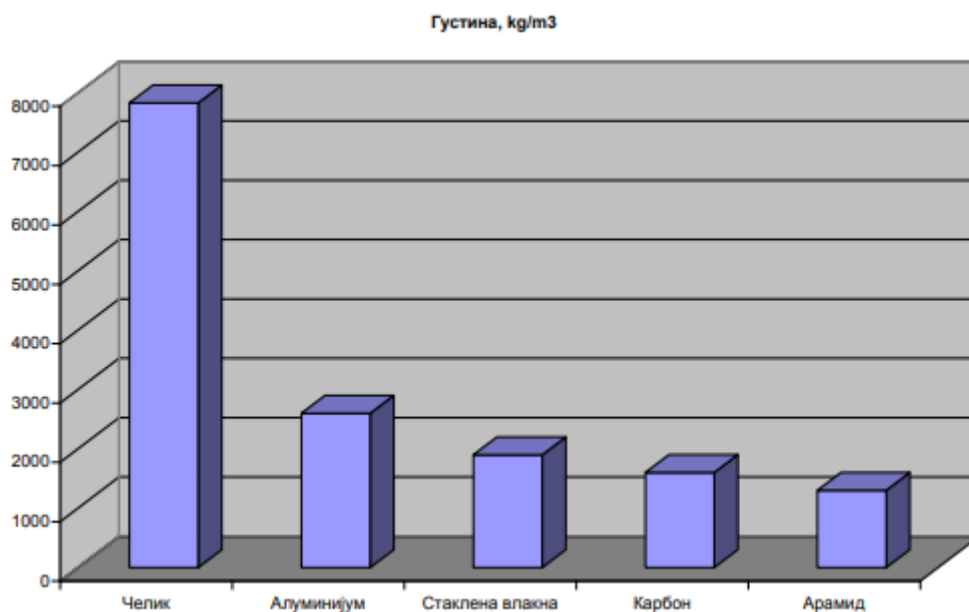
3.3 Предности композитних материјала

Композитни материјали добили су предност због широког спектра могућности и бољих особина. Њихове предности у односу на традиционалне материјале огледају се у следећим ставкама [3]:

- до 50% мања маса конструкције у поређењу са челичном конструкцијом истих димензија,
- добра ударна жилавост,
- повећана отпорност на замор, хабање, вибрациона и акустичка оптерећења,
- мале осетљивости на концентрацију напона,
- мањи број саставних делова конструкције,
- боља поузданост у експлоатацији,
- већа отпорност на корозију,
- велика чврстоћа и тврдоћа,
- могућност израде делова сложенијег облика,
- хармонично ублажавање вибрација,
- развој пукотине се изузетно спорије одвија,
- дужи животни век,
- лако одржавање.

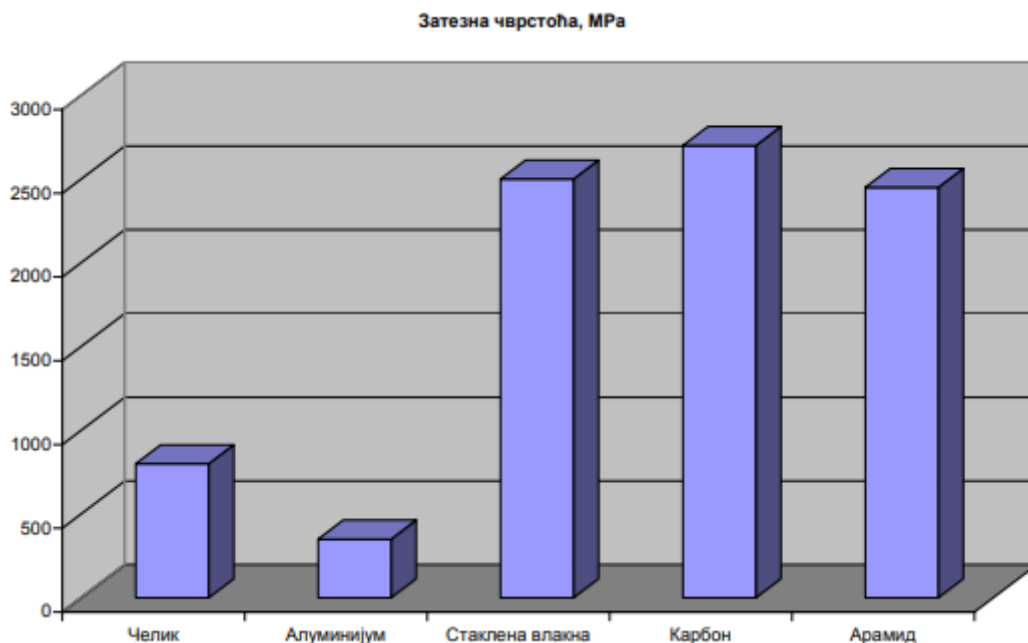
У неким случајевима, заједничком применом композитних и традиционалних металних материјала, могу се постићи најбољи резултати.

Однос густине традиционалних материјала као што су челик и алуминијум, у односу на композитне материјале који се најчешће користе, а то су стаклена влакна, карбон и арамид, приказан је на слици 3.11.



Слика 3.11: Упоредне вредности густине [8]

На слици 3.12, приказан је однос затезне чврстоће композитних материјала као што су стаклена влакна, карбон и арамид у односу на челик и алуминијум. Тај однос је већи и до неколико пута.



Слика 3.12: Упоредне вредности затезне чврстоће [8]

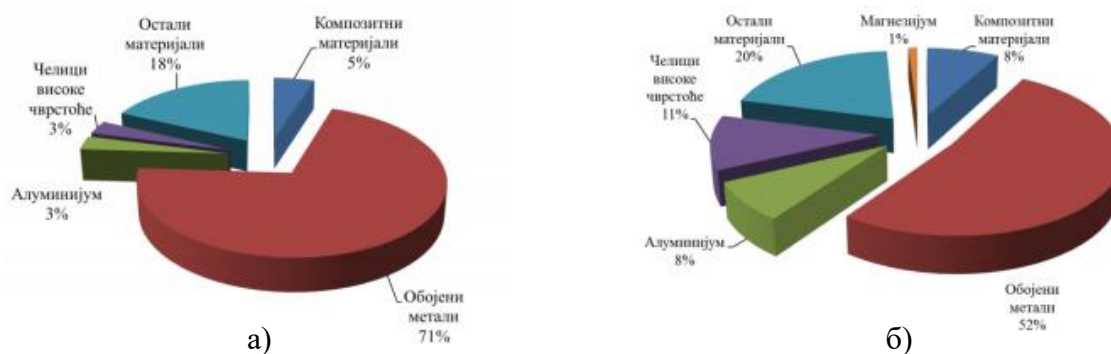
4. Композитни материјали у аутомобилској индустрији

Аутомобилска индустрија је један од највећих потрошача конструкционих материјала у свету. Један од значајних проблема науке о материјалима, је повећање трајности и поузданости рада делова аутомобила. Како се аутомобилска индустрија развија, она уједно захтева и повећање квалитета и сигурности употребљених материјала. У исто време, конкуренција међу произвођачима материјала, подстиче развој и напредак нових врста, побољшање квалитета и сл. Неки од данашњих главних праваца у аутомобилској индустрији су развој интелигентних аутомобила који би се снашли са тешким ситуацијама на путу без учешћа возача, као и развој аутомобила са алтернативним изворима енергије [15].

Перформансе аутомобила се константно унапређују. Мотори аутомобила постају доста ефикаснији, облик аутомобила све више добија аеродинамичнији облик, трансмисија је унапређена, отпор котрљања пнеуматика је смањен. Приликом конструисања аутомобила, потребно је смањити његову масу. То се може постићи коришћењем и мање снажнијих мотора који мање троше горива и мање емитују штетне материје у атмосферу. Захваљујући мањој маси, мање ће бити оптерећен и систем вешања и захваљујући томе, може се постићи дужи животни век [15].

Смањењем масе аутомобила је повод за коришћење нових, лакших и издржљивијих материјала који су због тих својих карактеристика и ценовно скупљи. Нови материјали треба да донесу мању масу, да побољшају пасивну безбедност у аутомобилу, редукују токсичност и побољшају удобност [15].

Током протеклих 30 година, аутомобилска индустрија успела је да смањи масу возила за 30%. Свако смањење масе аутомобила, доводи и до смањења потрошње горива, тако да ако би се маса возила смањила за 10%, дошло би се до смањења потрошње горива за 6%. Огроман део популације данас поседује возило. Толики број возила негативно утиче на планету. Претпоставка је да више од четвртине емисије гасова стаклене баште је повезано са возилима друмског саобраћаја. Због тога, прописи су постали строжији и навели су аутомобилску индустрију на развој лакших и ефикаснијих возила. Избор нових материјала би могао бити главна компонента за смањење потрошње горива [3]. На слици 4.1, приказана је употреба материјала у аутомобилима из 1977. године са једне стране и данас са друге стране.



Слика 4.1: Употреба материјала у аутомобилима 1977.год (а) и данас (б) [8]

4.1 Композитни материјали током историје у аутомобилима

Примена композита у аутомобилима датира још из 20. века [3].

- **1939. година.** Хенри Форд конструисао је неке делове од биљних влакана. За те делове, искоришћена су стаклена, сојина и влакна конопље у комбинацији са дугомерном матрицом. У унутрашњости аутомобила преовладала су кокосева влакна, тако да је уједно ово био и почетак примене биљних влакана.
- **1945. година.** Конструисан је први прототип аутомобила од композита који је имао оплату од стаклених влакана и ваздушно огибљење.
- **1953. година.** Значајан корак направљен је када су на аутомобилу Шевролет Корвета, делови каросерије били изграђени од полиестерске смоле ојачане стакленим влакнима. На слици 4.2 приказан је тај модел аутомобила.



Слика 4.2: Шевролет Корвета [16]

- **1950. година.** Производњом Трабанта, започета је примена полиестерске матрице ојачане памучним влакнима у каросерији аутомобила. За то време, Трабант се сматрао технолошким напреднијим аутомобилом.
- **1970. година.** Кренуло се са широм применом полимерних композита за производњу структурних компонената као што су: носачи хладњака, делови преноса и вешања, опруге итд.
- **1981. година.** Направљена је права револуција у производњи тркачких аутомобила. Болиди у Формули 1 имали су шасију израђену од композита која је допринела мањој маси, великој чврстоћи и великој безбедности возача. На слици 4.3 је приказан Мекларенов болид из 1981. године



Слика 4.3: Мекларенов болид [17]

Због тежње за већим брзинама и мањом потрошњом горива, данас су ретки делови аутомобила који нису израђени од композитних материјала.

4.2 Предности и недостаци материјала који се користе у изради аутомобила

Упркос све већој употреби нових материјала у аутомобилској индустрији, челик ће и даље имати озбиљну улогу у примени. Као пример, може се узети податак из 2007. године, већина масе на просечном аутомобилу је потицала од челика, чак 1090 kg, а просечни теренци имали су масу од 1360 kg. Захваљујући својој снази, челик се дуго користи у производњи каросерија [15].

Предности код употребе челика:

- мала цена,
- висока поправљивост каросерија аутомобила,
- усавершена техника производње и употребе.

Недостаци код употребе челика [15]:

- већа маса,
- потреба за заштитом од корозије,
- ограничен радни век.

Алуминијум је нашао примену у производњи каросерија аутомобила, где је релативно недавно почела његова примена. Ова врста метала стекла је популарност међу произвођачима аутомобила јер је лаган и практично отпоран на корозију. Са употребом алуминијума, направљени су неки делови мотора, вешања итд. [15].

Предности код употребе алуминијума:

- велика специфична крутост и мала маса,
- способност апсорпције енергије удара, судара и експлозије,
- добра термоотпорна и изолациона својства,
- могућност производње делова било каквог облика,
- корозиона отпорност,
- лака рециклажа.

Недостаци код употребе алуминијума [15]:

- висока цена,
- тешка поправљивост,
- тешкоће при обради,
- потреба за скупљом опремом при састављању делова,
- недовољна чврстоћа или крутост за одређене примене.

Од свих инжењерских метала, магнезијум има карактеристику да је најлакши. Његова густина је $1,74 \text{ g/cm}^3$. За 35% је лакши од алуминијума, а више од четири пута лакши од челика. Легуре магнезијума су у сталном развијању и тестирању како би могле да постигну потребну термичку отпорност [3].

Предности код употребе магнезијума:

- најнижа густина од свих конструкционих материјала,
- могућа конструкција делова мале масе,
- висока носивост,
- одлична ливкост,
- повећана отпорност на корозију,
- добра својства пригушења,
- добра заваривост,
- могућа рециклажа.

Недостаци код употребе магнезијума [3]:

- тешкоће при обради,
- велике деформације у раду,
- недовољна носивост,
- висока цена,
- утицај на животну средину.

Највеће предности коришћења композита у аутомобилској индустрији је смањење масе јер су композити 35% лакши од алуминијума, а 60% лакши од челика и на основу тога, маса целог возила смањује се до 10%. Термопластичне смоле ојачане стакленим влакнима и угљенична влакна су веома популарне у примени [3].

Предности код употребе композитних материјала:

- могућност израде врло сложених облика,
- смањење трошкова накнадне обраде делова,
- могућност спајања делова током самог поступка производње,
- димензијска стабилност при екстремним радним условима,
- отпорност на корозију,
- лако одржавање,
- дужи животни век,
- дизајнирање својстава,
- могућност дорађивања,
- рециклирање.

Недостаци код употребе композитних материјала [3]:

- висока цена израде,
- нема серијске производње,
- недовољно стручне снаге,
- крутост,
- осетљивост на влагу и температуру,
- токсичност,
- запаљивост.

4.3 Примена композитних материјала у аутомобилима

Композити имају примену у скоро свим деловима возила [3]. Примењују се за:

- **екстеријер аутомобила.** Ту спадају: браници, блатобрани, делови крова, прагови, хаубе, задње бочне плоче, врата, поклопци мотора итд. У њиховој изради, најчешће се користе угљенична влакна у комбинацији са полиестерском смолом. Као и код свих композита, маса је смањена што доприноси мањој потрошњи горива, као и побољшаној динамици, безбедности и квалитету вожње.
- **ентеријер аутомобила.** Ту спадају: унутрашња површина врата, командне табле, шкољке седишта, подови, зупчаници за погон казальки контролне табле, корито резервног точка, делови тунела за вентилацију, ретровизори, пресвлаке итд. Због свог лепог изгледа нашли су примену у ентеријеру, као и због постојаности на високим температурама.
- **пнеуматици.** Један од најважнијих делова аутомобила су управо пнеуматици. Много је битно остварити што краћи пут кочења, боље приањање на сувим или мокрим подлогама, смањење потрошње горива. Користе се нано композити, као и траке од арамида који имају својство због своје затегнутости, да очувају облик пнеуматика, како се он не би деформисао и после великих брзина.
- **фелне.** Одувек се тежило да се фелне раде од лаких материјала. Применом полимера ојачаног угљеничним влакнама, добијају се резултати као што су 50% мања маса фелне од металних, смањује се ротирајућа маса, момент потребан за покретање, убрзавање, успоравање и заустављање. Отпорније су на ударна оптерећења и естетски су лепше.
- **кочиони дискови.** Челик на високим температурама мења механичка својства, док су керамички материјали готово неосетљиви. Керамички материјали ојачани карбонским влакнима прави су избор за кочионе дискове, као и за остале делове који су изложени високој температури: вентили, свећице, сензори итд.
- **шасија.** Она мора бити пројектована тако да се минимално деформише при статичким и динамичким оптерећењима. Некада се користила комбинација стаклених влакана и епоксидне смоле, а данас се углавном израђују од полимера ојачаног угљеничним влакнима. Постиже се смањење масе и са тим се добијају боља динамичка својства, повољна ергонимија за возача и боља сигурност возила.
- **каросерија.** Углавном се користе материјали као што је епоксидна смола ојачана стакленим или угљеничним влакнима. Карактерише их висока чврстоћа и тврдоћа, уз веома малу масу. Овакви материјали доприносе и мањој буци у кабини, као и ублажавању вибрација током вожње.
- **делови испод поклопца мотора.** Велики број делова који се налазе испод поклопца мотора израђен је од полимерних композита. Примена полиамида ојачаног стакленим влакнима је искоришћена за израду главе мотора. Усисник ваздуха се израђује од полипропилена ојачаног стакленим влакнима. Биљни композит влакна конопље, користи се за израду чепова за: посуде за антифриз, за прање стакла, отвора за доливање уља.

4.4 Фелне аутомобила

Фелне аутомобила су имале огроман развој кроз историју, а њихова главна улога се једино није мењала. Развој је текао од дрвених, до карбонских фелни, различитих величина, облика, функција итд.

Данас се најчешће на аутомобилима виђају челичне фелне зато што нису скупе, али су дуготрајне и чврсте. Њихова мана се огледа у томе што имају већу масу, а уједно то значи и већу потрошњу горива, јер аутомобилу је потребно више снаге да се покрене. Поред тога, мана им је што нису превише стабилне при великим брзинама и у кривинама као неке друге фелне које су израђене од других материјала. Такође, нису превише отпорне на корозију и слабије одводе топлоту што доводи до тога да се пнеуматици и кочнице више загревају и онемогућавају боље кочење. Не могу се похвалити својом естетиком, па се због тога на њих монтирају раткапне како би се прекрио њихов изглед. Челична фелна приказана је на слици 4.4.



Слика 4.4: Челична фелна

Алуминијумске фелне су новије производње и за разлику од челичних фелни, показале су се знатно боље током експлоатације. Предности алуминијумских фелни су:

- мања маса смањује неогибљену тежину возила односно делове возила који нису подржани системом вешања (пнеуматици, кочнице...) и тако утиче на прецизније управљање и боље понашање у кривинама,
- бољи су проводници топлоте и због тога се продужава животни век пнеуматицама,
- смањено и равномерно трошење пнеуматика због прецизне израде и непроменљивог облика,
- тежа могућност појаве корозије,
- због свог облика, нема подрхтавања при већим брзинама,
- мање подложна савијању и деформацији због бољег одржавања равнотеже,
- естетски лепше.

Алуминијумска фелна приказана је на слици 4.5.



Слика 4.5: *Алуминијумска фелна [20]*

Карбонске фелне као што је очекивано, знатно су боље од челичних и од алуминијумских. Показатељ тога је њихова цена која је знатно већа, а и то што огромну примену имају у ауто-мото спортовима где важи неписано правило, што лакше возило, то је брже возило. Карбонске фелне том неписаном правилу знатно доприносе својом малом масом. Поред места у ауто-мото тркама, оне су почеле да се уграђују и у стандардне аутомобиле који се могу видети на путевима. Због своје мале масе, доприносе смањењу потрошње горива јер возилу је потребно мање снаге за покретање, убрзавање, заустављање, а такође се доприноси смањењу штетних гасова. Поред тога, очигледна је разлика и у управљању возилом, јер се прецизност управљања знатно побољшава. Коришћењем карбонских фелни, смањује се бука и вибрације које се добијају приликом котрљања, што доприноси бољој удобности у вожњи. Естетски су лепше и дају луксузни изглед. Недостатак им је што се при оштећењу не могу више користити, али до тог оштећења је веома тешко доћи. На слици 4.6 приказана је карбонска фелна.



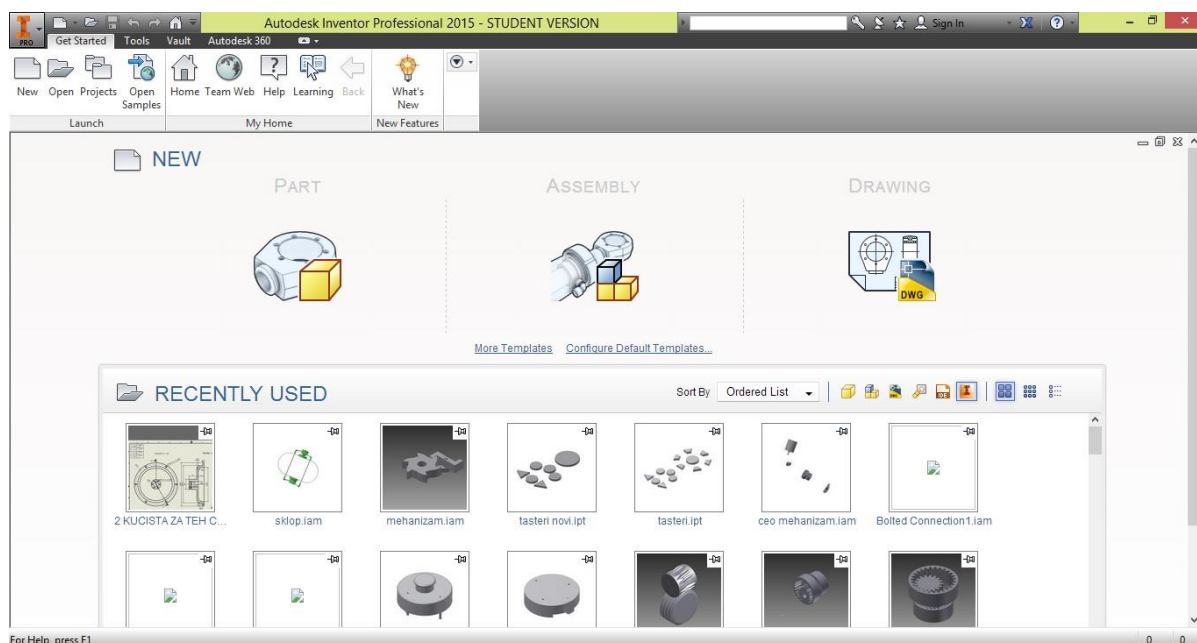
Слика 4.6: *Карбонска фелна [21]*

5. Поступак моделирања фелне аутомобила

Моделирање фелне аутомобила извршиће се у софтверском пакету *Autodesk Inventor*.

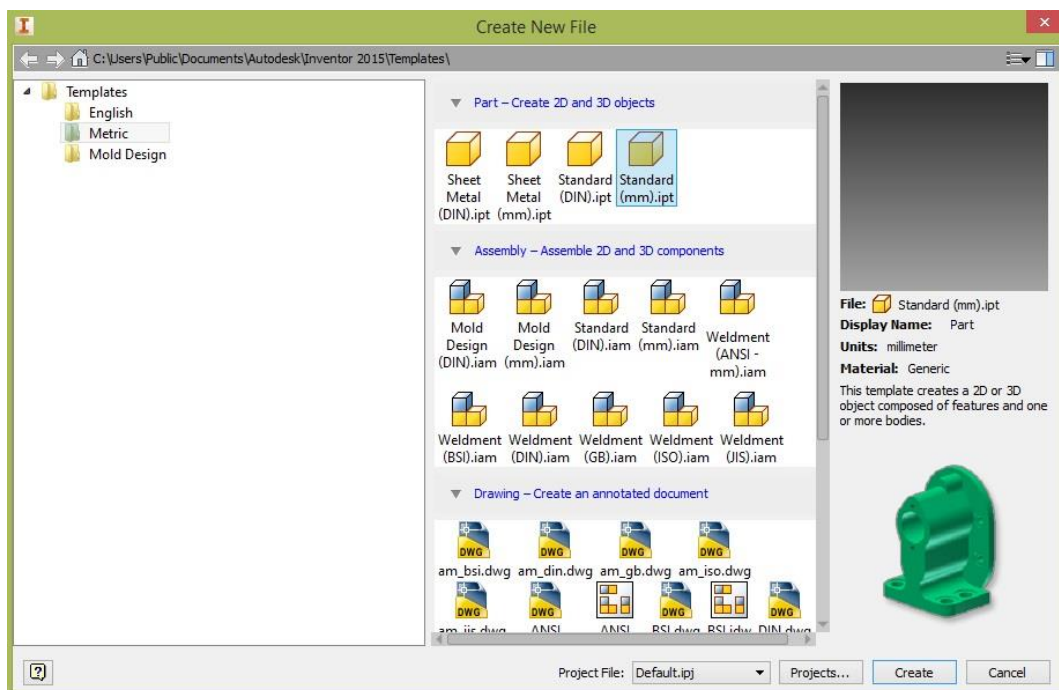
Autodesk Inventor је 3D софтвер за креирање 3D модела који је развио *Autodesk*. Поред тога, користи се за дизајнирање, креирање алата и симулације продуката. Софтвер омогућава корисницима да произведу што прецизнији 3D модел пре него што се он у стварности направи. Овај софтвер има опцију симулације кретања и анализу напрезања при монтажи, при чему корисници добијају опције за унос оптерећења, динамичких компоненти, трења, све у циљу добијања резултата како би се производ понашао у реалним условима. На пример, могуће је конструисати аутомобил или неке делове за њега и преко симулација је могуће симуларити снагу и масу производа, идентификовати подручја са великим напрезањима, вибрацијама и на основу тога извршити корекције како би се добио финални производ. Корисницима је омогућено на пример ако треба креирати пужни преносник, да се моделирање заобиђе, јер софтвер даје опцију уношења свих потребних података и сам израђује пужни преносник и тако скраћује време рада. Софтвер садржи и израду техничке документације.

При стартовању *Autodesk Inventor-a*, добија се окружење као што је приказано на слици 5.1. Могу се видети опције као што су: *new*, *open*, *projects*, итд. Такође се могу видети пречице за почетак моделирање делова (*part*), склапање измоделираних делова (*assembly*) као и опција за израду техничке документације (*drawing*). На почетном екрану приказани су и скорашњи модели који су рађени, у циљу што бржег приступа њима.



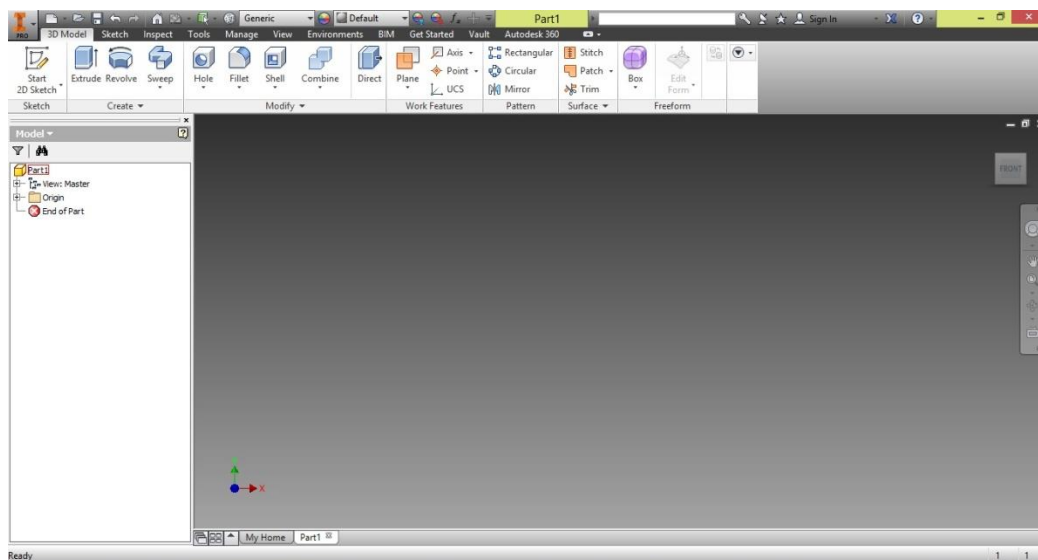
Слика 5.1: Почетни екран

На слици 5.2 приказане су опције које је могуће изабрати за почетак рада.



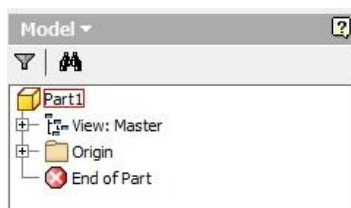
Слика 5.2: Креирање новог модела

Након изабране опције *Standard (mm).ipt*, добија се ново окружење које је приказано на слици 5.3.



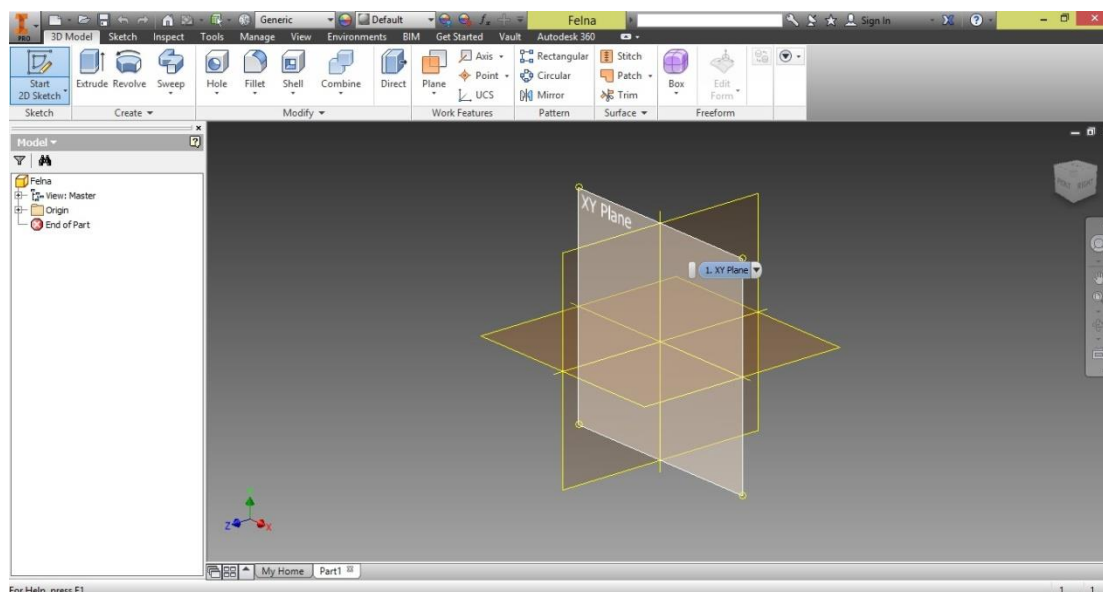
Слика 5.3: Ново окружење

Име фајла је могуће променити дуплим кликом на *Part1* које се налази у стаблу које је приказано на слици 5.4



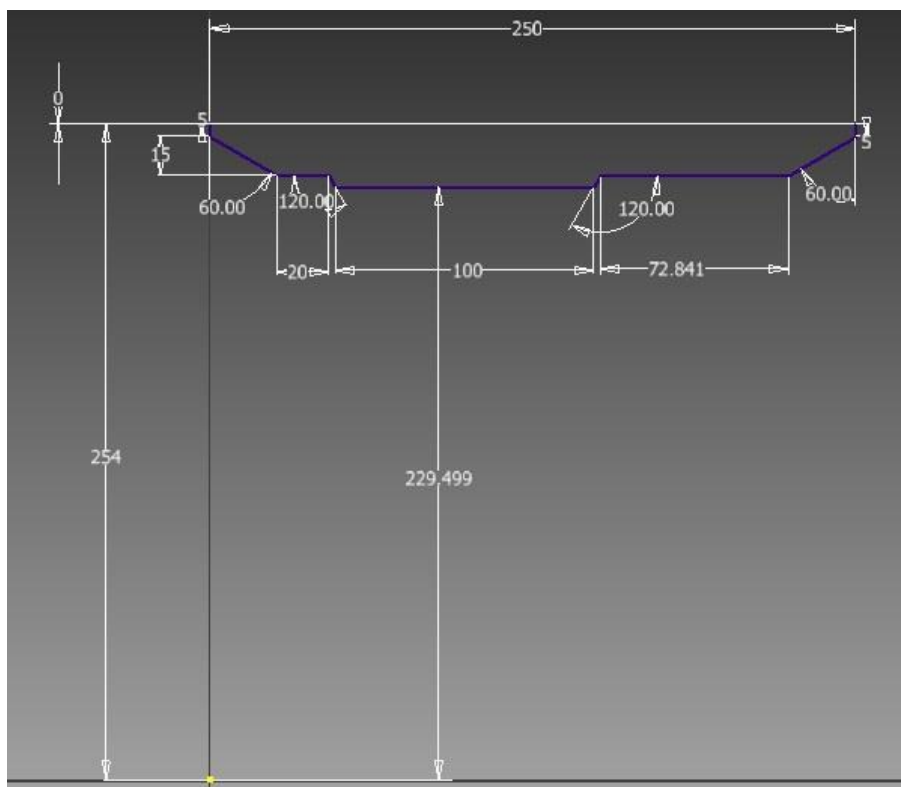
Слика 5.4: Стабло

Након тога, потребно је изабрати опцију *start 2D sketch*, како би се започело са моделирањем. Софтвер нуди три равни у којима је могуће моделирати. То су XY, XZ и YZ које су приказане на слици 5.5. За моделирање фелне аутомобила изабрана је XY раван.



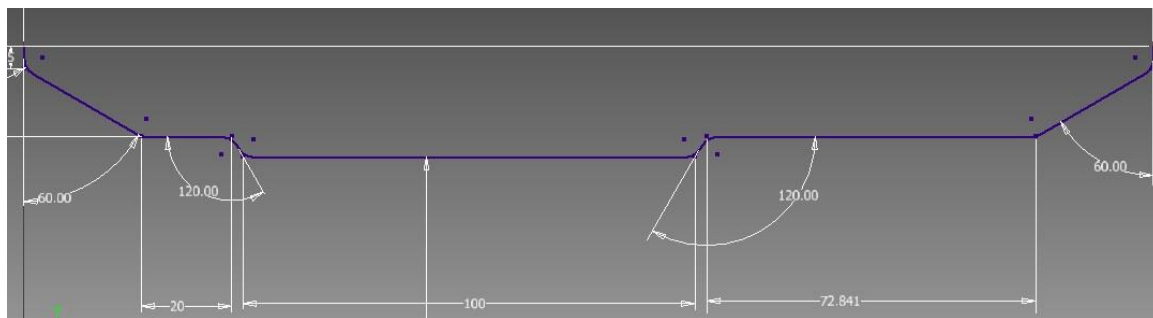
Слика 5.5: Равни

Како би се фелна аутомобила измоделирала на најлакши начин, потребно је преко опције *line* из палете алата *create*, нацртати скицу и ту исту скицу котирати преко опције *dimension* из палета алата *constrain*. Скица добија изглед који је приказан на слици 5.6.



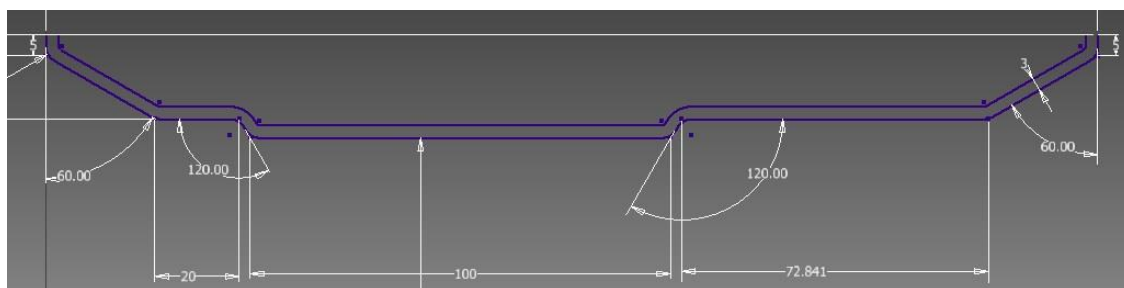
Слика 5.6: Скица

Потребно је ивице заоблити коришћењем опције *fillet* из палете алата *create*. Потребно заобљење износи 4 mm и скица има изглед који је приказан на слици 5.7



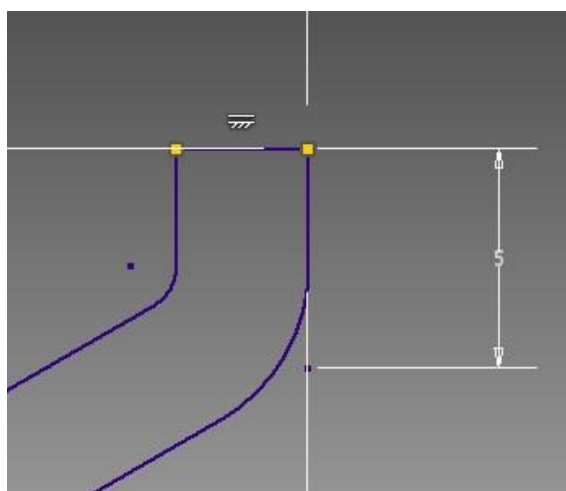
Слика 5.7: Скица након коришћења опције *fillet*

Сада је потребно преко опције *offset* из палета алата *modify* задати дебљину фелне. Фелне имају дебљину од 1.8 до 4 mm. У овом случају, дебљина фелна ће износити 3 mm, као што је приказано на слици 5.8.



Слика 5.8: Скица након коришћења опције *offset*

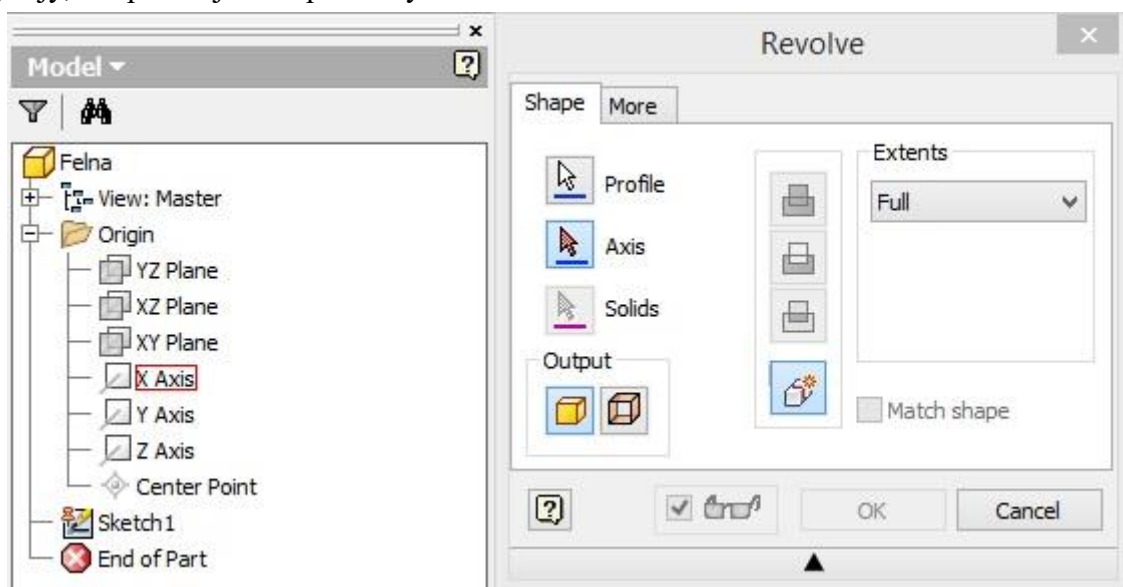
Након тога, потребно је затворити скицу коришћењем опције *line* из палета алата *create*, са обе стране, како би могло да се настави са моделирањем. Затворени део скице приказан је на слици 5.9.



Слика 5.9: Затворена скица

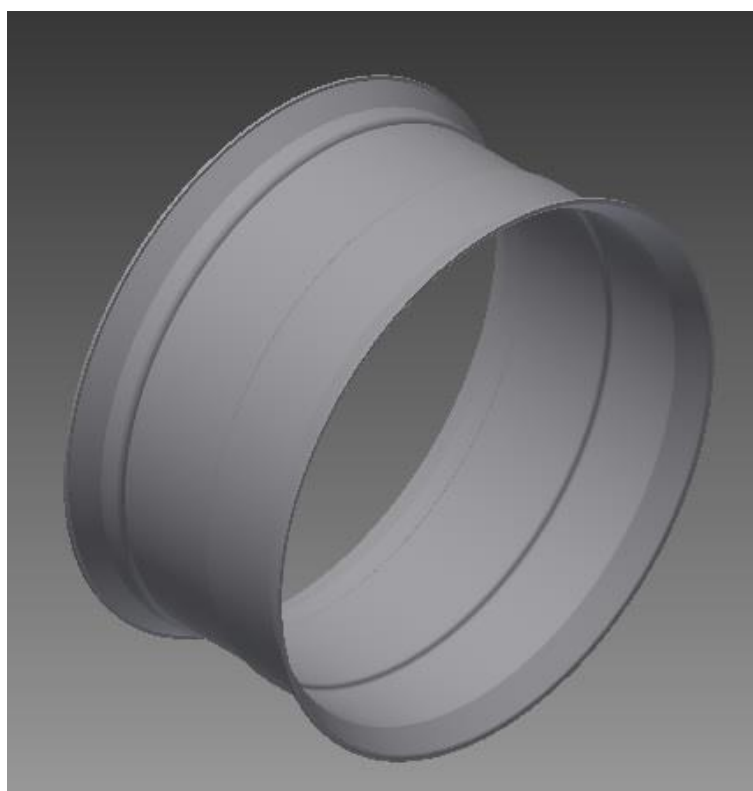
Када је скица завршена у потпуности, потребно је изабрати опцију *finish sketch*.

У палети алата *create*, потребно је изабрати опцију *revolve* као што је приказано на слици 5.10. Софтвер ће аутоматски изабрати нацртани профил односно скицу и корисник треба само да изабере осу око које ће се скица заротирати како би се добио жељени облик. Осе се налазе у опцији *axis* и могу се изабрати X, Y и Z оса. У овом случају, потребно је изабрати осу X.



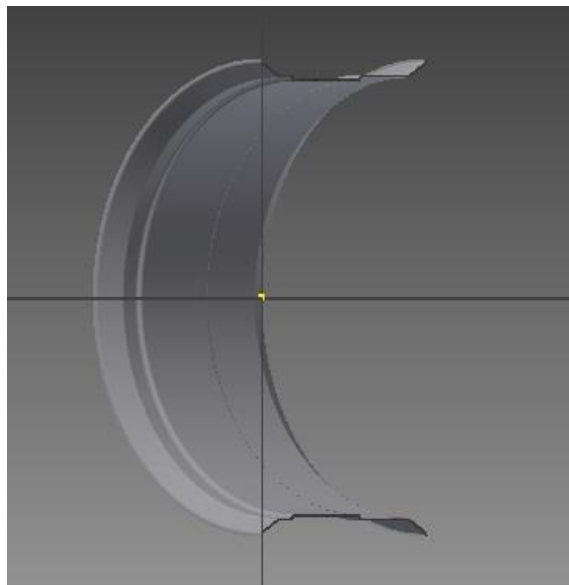
Слика 5.10: Опција *revolve*

Након ротирања скице око X осе преко опције *revolve*, добијен је обод фелне који је приказан на слици 5.11.



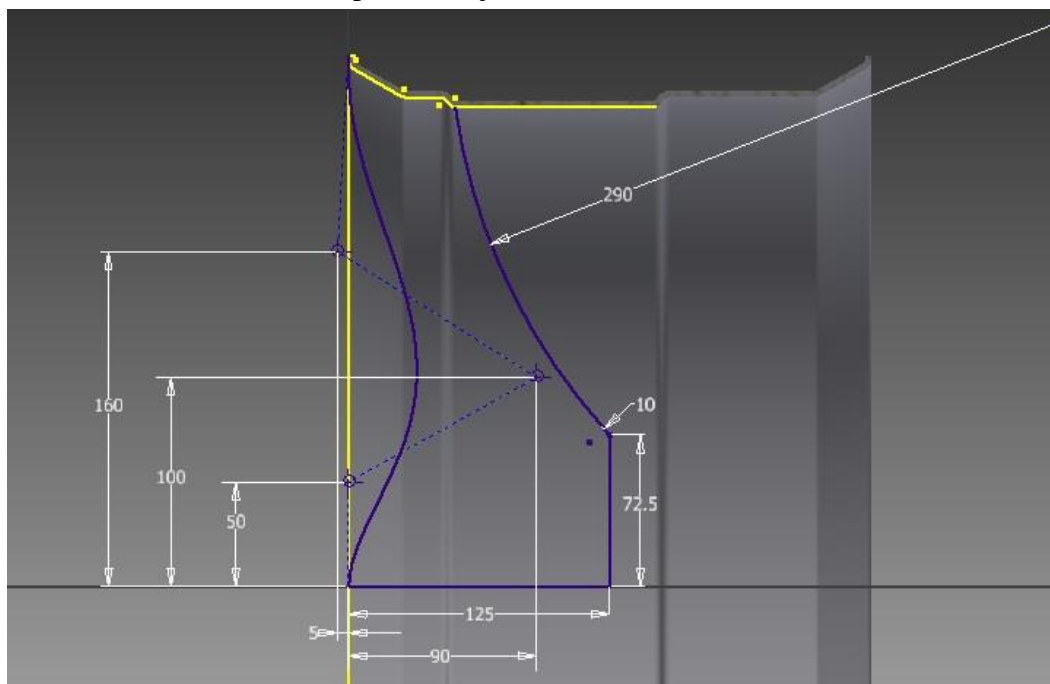
Слика 5.11: Обод фелне

Како би се наставио даљи рад, потребно је изабрати опцију *start 2D sketch*. Након тога, поново је потребно изабрати неку од равни у стаблу модела која ће се користити за даљи поступак. У овом случају, у стаблу модела бира се раван *XZ*. Када је раван изабрана, десним кликом на радну површину, добија се нови прозор где је потребно изабрати опцију *slice graphics* како би се добио пресек фелне која је приказана на слици 5.12.



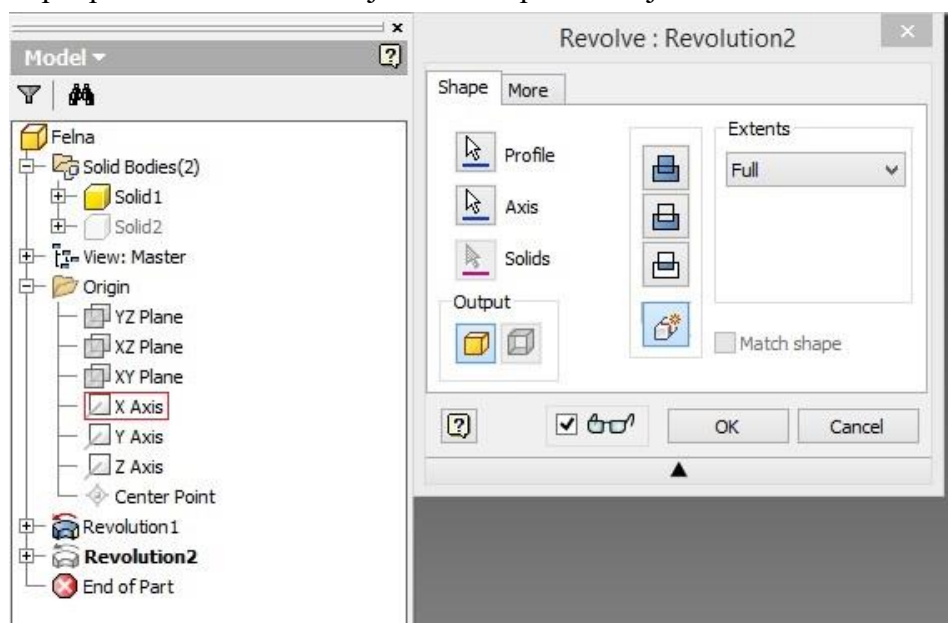
Слика 5.12: Пресек фелне аутомобила

Из палете алата *create*, потребно је изабрати опцију *project geometry*, како би могли да се пројектују остали делови на ободу фелне. На пресеку фелне, потребно је означити ивице и оне ће појутети као знак да су изабране. Након тога, из исте палете алата, користе се опције *line*, *spline*, *arc* и *point* које је на крају потребно котирати преко опције *dimension*. Нова скица приказана је на слици 5.13



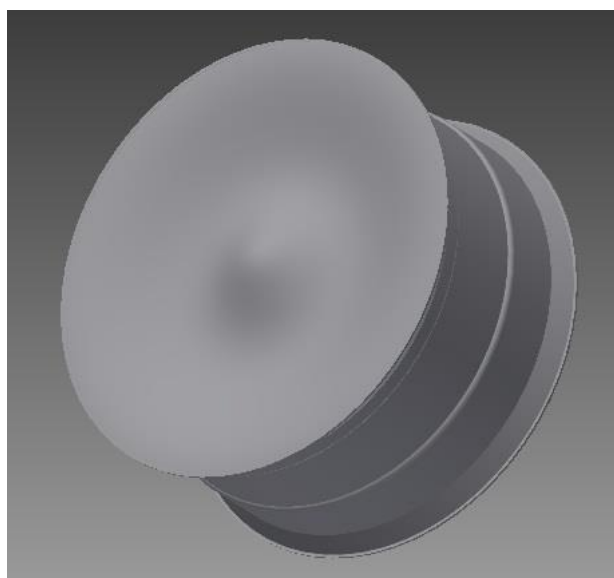
Слика 5.13: Скица

Након завршене скице, потребно је изабрати опцију *finish sketch*. У палети алата *create*, потребно је изабрати опцију *revolve*, где ће софтвер аутоматски препознати нову скицу и означити је. Потребно је изабрати осу око које ће се скица заротирати. У овом случају, као и у претходном, та оса ће бити X. На крају остаје изабрати опцију *new solid* како би се креирао нови *solid*. Опција *revolve* приказана је на слици 5.14.



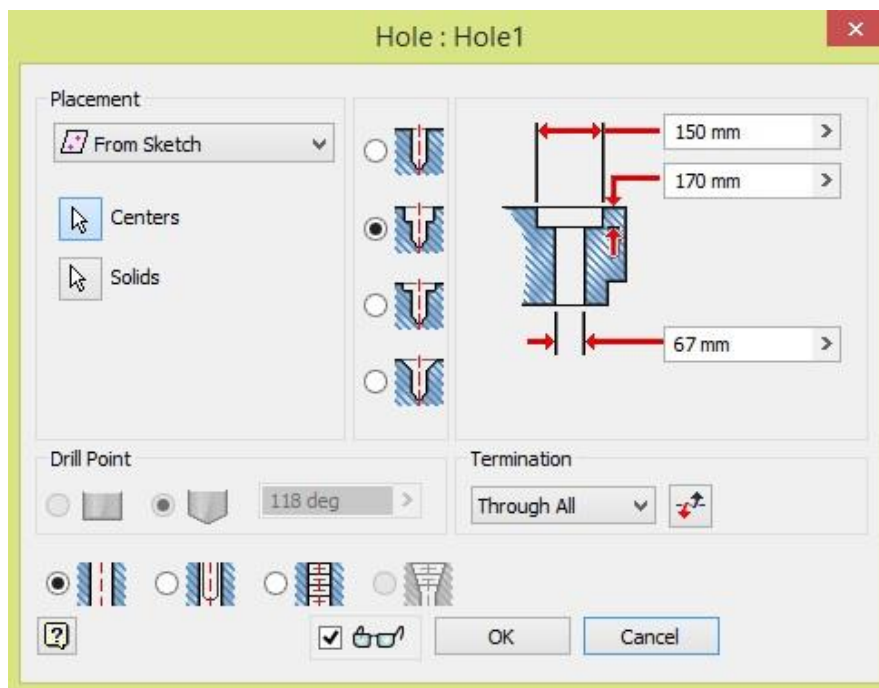
Слика 5.14: Опција *revolve*

Фелна аутомобила полако почиње да добија свој изглед као што је приказано на слици 5.15.



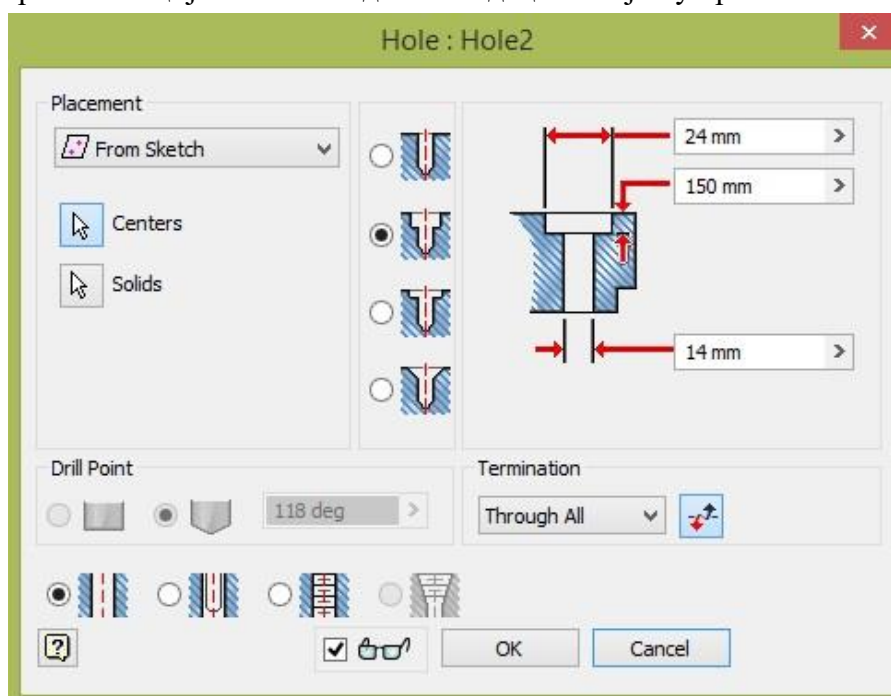
Слика 5.15: Фелна аутомобила након опције *revolve*

Кликом на ивицу фелне на супротном крају, добија се нови део за цртање скице, односно у овом случају се преко опције *point* из палета алата *create* креира тачка на средини скице како би се искористила опција *hole* из палета алата *modify* са унетим подацима који су приказани на слици 5.16.



Слика 5.16: Опција hole

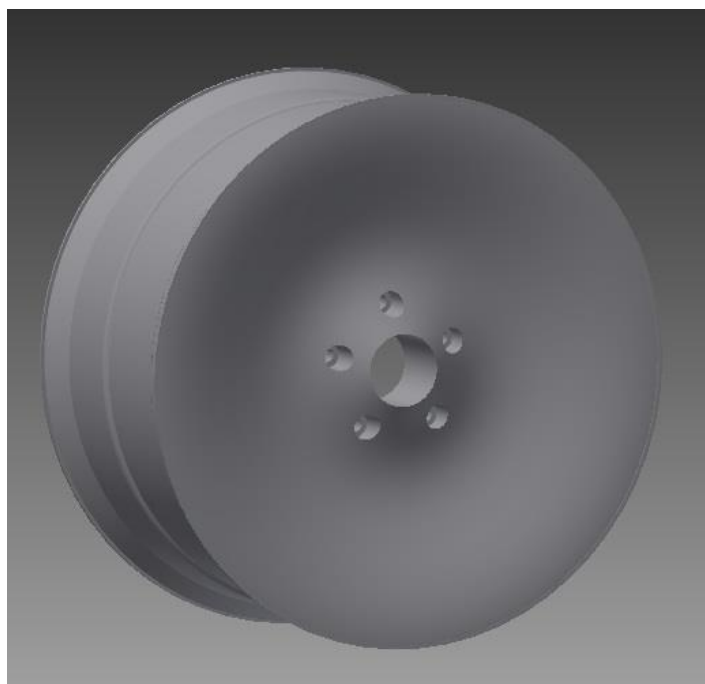
Креирањем нове равни преко опције *plane/offset from plane* из палете алата *work features*, добија се нова раван где је потребно урадити круг пречника 120 mm како би се поново употребила опција *hole* са следећим подацима који су приказани на слици 5.17.



Слика 5.17: Опција hole2

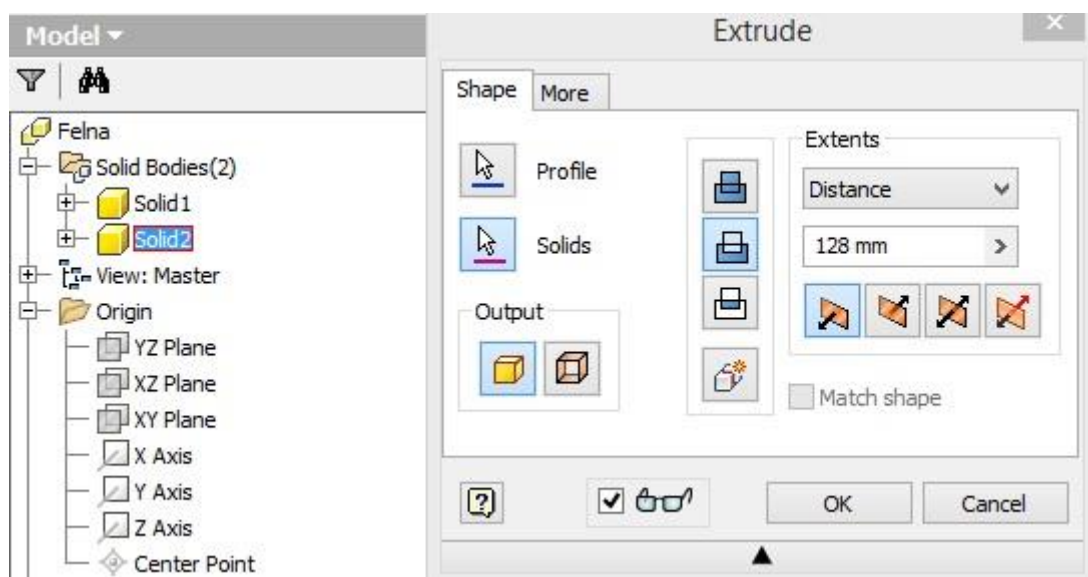
Ради лакшег рада, нову раван која је креирана, потребно је сакрити тако што ће се на њу у стаблу модела кликнути десним кликом и изабрати опција *visibility*, све у циљу како не би сметала при даљем моделирању.

Како би се скратио поступак моделирања, да се исти отвор не моделира пет пута, преко опције *circular* у палети алата *pattern*, потребно је ново добијени отвор означити и копирати кружно по новом *solid*-у преко осе *X*. Претохдни и овај поступак, дају фелни нови изглед који је приказан на слици 5.18.



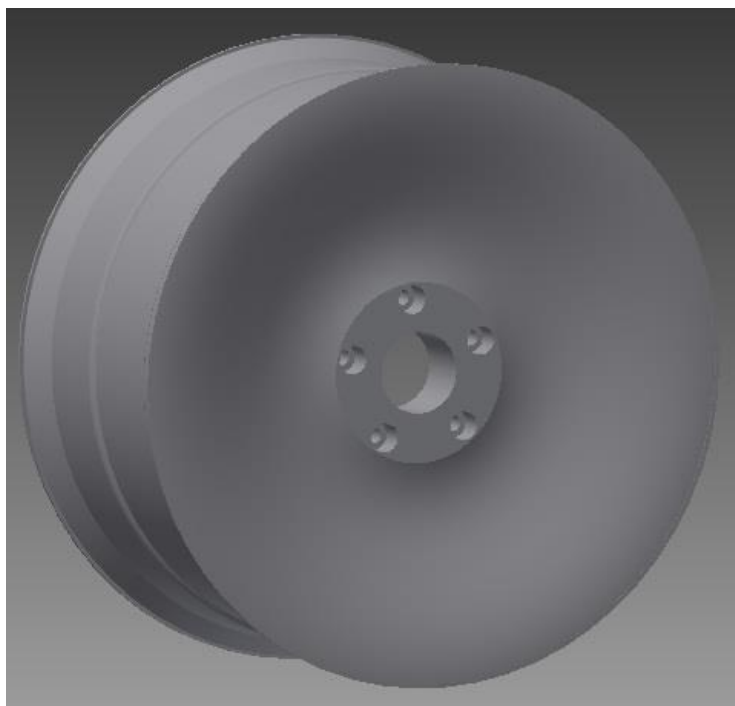
Слика 5.18: Фелна након коришћења опција *hole*

Пошто је добијено све што је потребно, сада преостаје само дизајнирати естетски изглед фелне. Поново је потребно изабрати креирану раван и у њој нацртати круг пречника 150 mm, где је након тога потребно изабрати опцију *extrude* из палета алата *create* као што је приказано на слици 5.19. У овом случају, потребно је изабрати опцију *cut* како би се добио задати део и ту операцију је потребно извршити на другом *solid*-у.



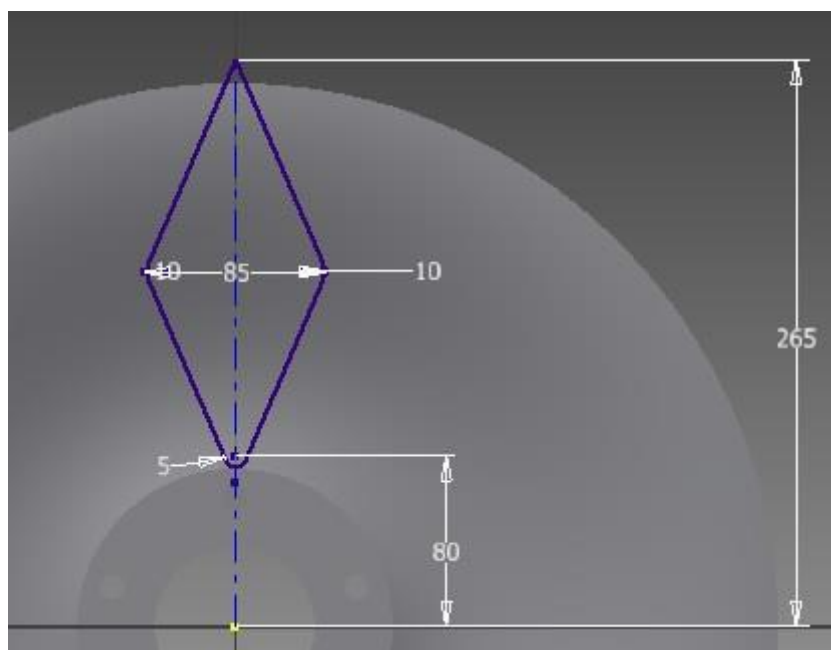
Слика 5.19: Опција *extrude*

Фелна аутомобила добија следећи изглед који је приказан на слици 5.20.



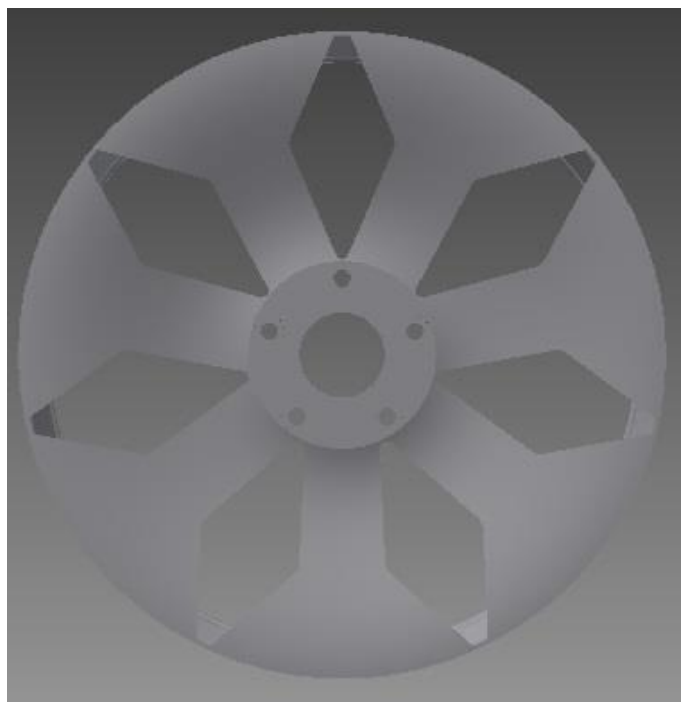
Слика 5.20: Фелна након коришћења опције *extrude*

Цртањем нове скице добија се естетски изглед фелне. Прво је потребно урадити скицу као на слици 5.21.



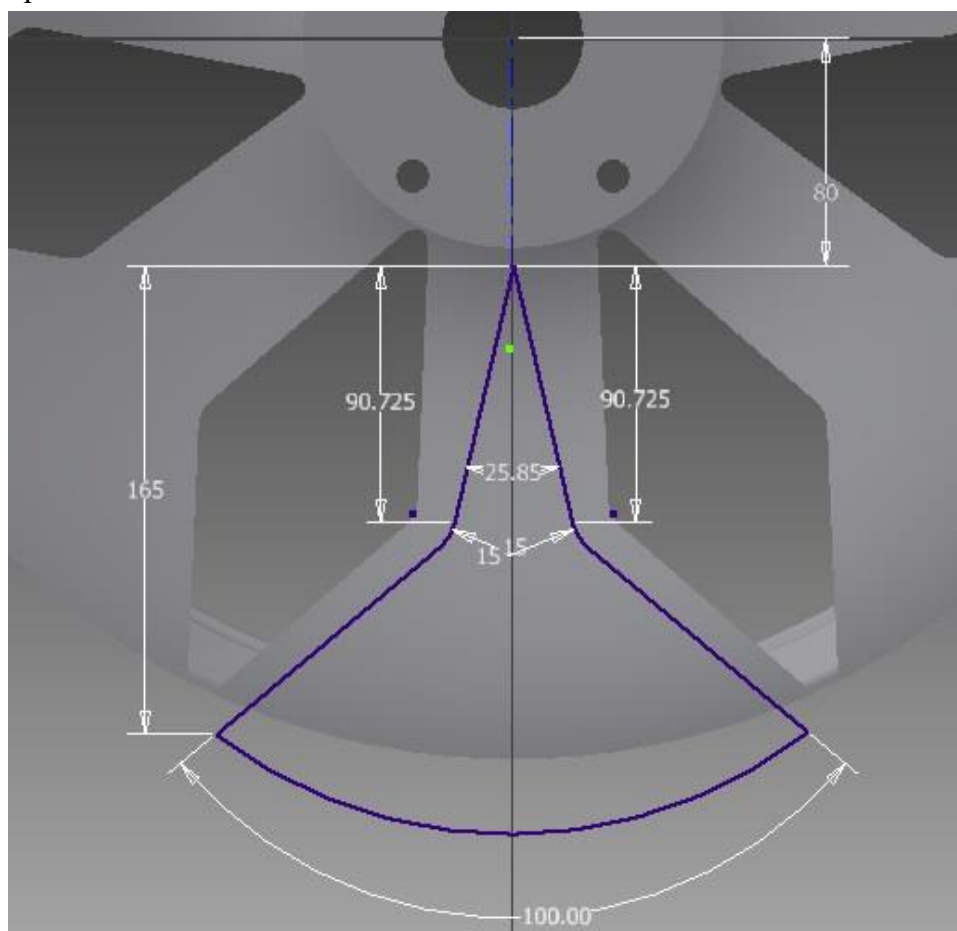
Слика 5.21: Нова скица

Коришћењем прво опције *extrude* из палета алата *create*, а након тога коришћењем опције *circular* из палете алата *pattern*, добија се фелна као на слици 5.22.



Слика 5.22: Нови изглед након коришћења опција *extrude* и *circular*

Поново је потребно нацртати нову скицу како би се добио крајњи изглед фелне. Скица је приказана на слици 5.23:



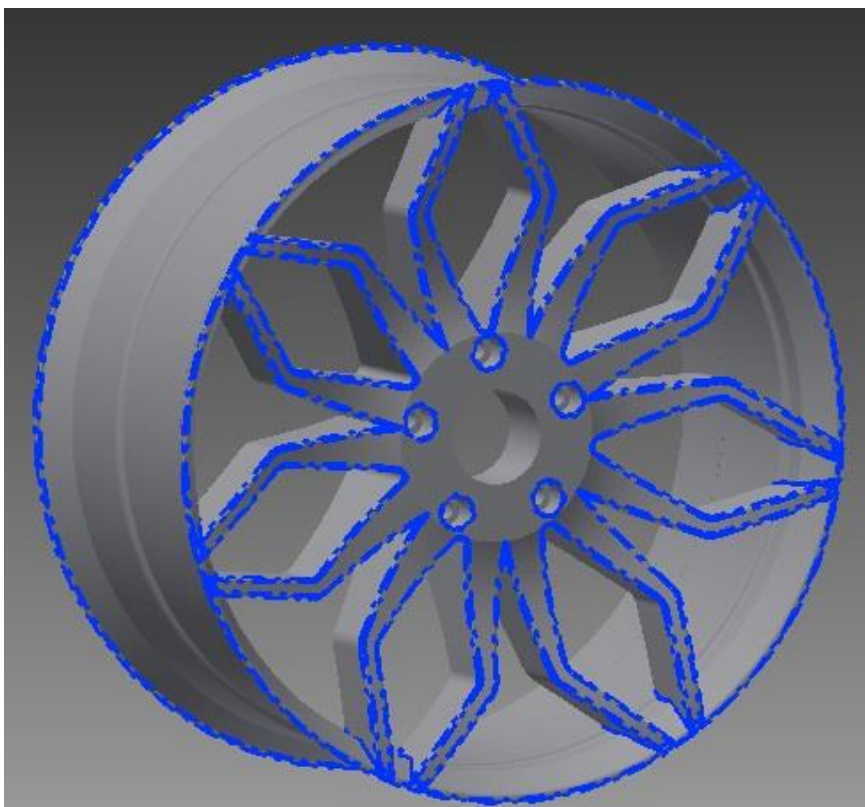
Слика 5.23: Нова скица

Као и претходног пута, поново се користе опције *extrude* из палете алата *create* и опција *circular* из палета алата *pattern*. Фелна поприма нов изглед као што је приказано на слици 5.24.



Слика 5.24: Нови изглед након коришћења опција *extrude* и *circular*

Како би фелна добила свој крајњи изглед, потребно је користити опцију *fillet* из палета алата *modify* и заоблити све ивице као што је приказано на слици 5.25.



Слика 5.25: Заобљавање ивица коришћењем опције *fillet*

Крајњи изглед алуминијумске фелне аутомобила приказан је на слици 5.26.



Слика 5.26: *Алуминијумска фелна аутомобила*

Карбонска фелна аутомобила приказана је на слици 5.27.



Слика 5.27: *Карбонска фелна аутомобила*

Други модел алуминијумске фелне приказан је на слици 5.28. Поступак моделирања је извршен на потпуно исти начин као и у претходном случају.



Слика 5.28: Други модел алуминијумске фелне

Карбонска фелна приказана је на слици 5.29.



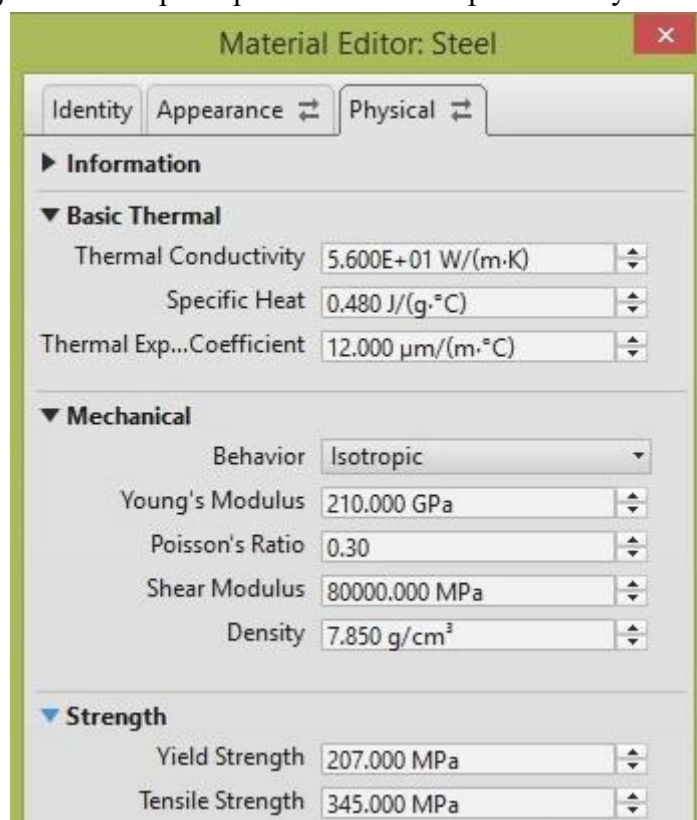
Слика 5.29: Други модел карбонске фелне

6. Структурна анализа фелни аутомобила

Након добијеног коначног изгледа фелни аутомобила, у пакету алата *simulation*, потребно је изабрати опцију *stress analysis*. Пошто је анализа покренута, у ново добијеном окружењу, из палете алата *manage*, потребно је изабрати опцију *create simulation* како би се започело са поступком анализирања. У ново добијеном прозору, могуће је променити назив симулације и након тога потребно је то све потврдити притиском на опцију *ok*. У стаблу програма приказано је шта је све потребно израбрати како би се анализа остварила. Први корак ка томе је дефинисање материјала. У анализи фелне аутомобила, материјали који ће се користити су:

- челик,
- алуминијум 356.2,
- карбон.

Како би се фелни задао потребан материјал, потребно је изабрати опцију *assign* у палети алата *material*. *Inventor* од набројаних материјала садржи само челик, док карактеристике алуминијума и карбона морају ручно да се задају. Нови материјали се задају преко опције *create*. Карактеристике челика приказане су на слици 6.1.



Слика 6.1: Карактеристике челика

Карактеристике алуминијума 356.2 приказане су на слици 6.2.

Material Editor: Default New Material(1)

Identity Appearance ⇄ Physical ⇄

► Information

▼ Basic Thermal

Thermal Conductivity 6.050E-01 W/(m·K)

Specific Heat 0.100 J/(g·°C)

Thermal Exp...Coefficient 0.100 $\mu\text{m}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$

▼ Mechanical

Behavior Isotropic

Young's Modulus 69.000 GPa

Poisson's Ratio 0.33

Shear Modulus 28000.000 MPa

Density 2.685 g/cm³

▼ Strength

Yield Strength 250.000 MPa

Tensile Strength 279.000 MPa

Слика 6.2: Карактеристике алуминијума 356.2 [22]

Карактеристике карбона приказане су на слици 6.3.

Material Editor: Default New Material(1)

Identity Appearance ⇄ Physical ⇄

► Information

▼ Basic Thermal

Thermal Conductivity 1.800E+02 W/(m·K)

Specific Heat 0.100 J/(g·°C)

Thermal Exp...Coefficient 0.100 $\mu\text{m}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$

▼ Mechanical

Behavior Isotropic

Young's Modulus 110.000 GPa

Poisson's Ratio 0.10

Shear Modulus 5000.000 MPa

Density 1.600 g/cm³

▼ Strength

Yield Strength 570.000 MPa

Tensile Strength 600.000 MPa

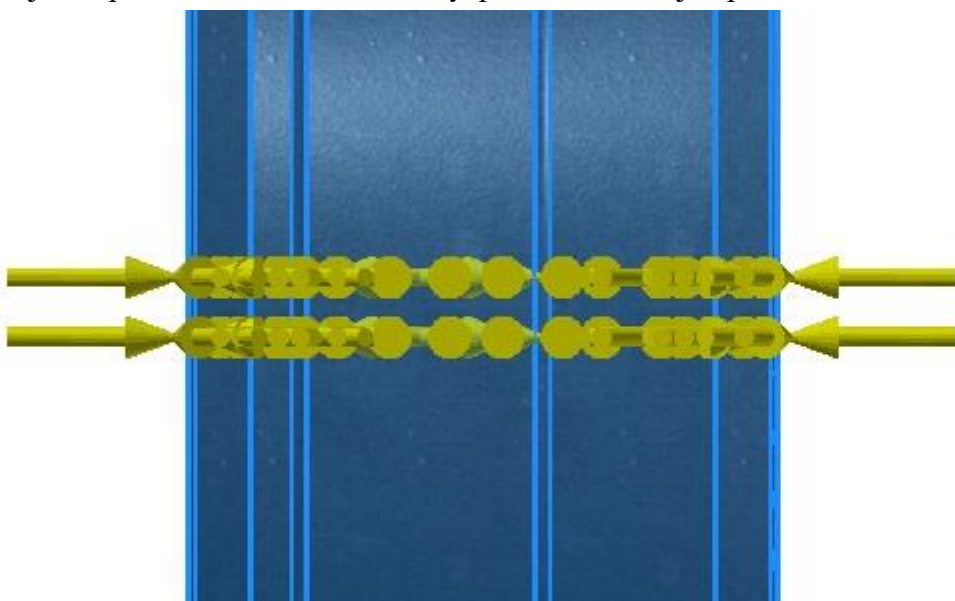
Слика 6.3: Карактеристике карбона [23]

У првом случају, ради се анализа фелне од челика. Након што је материјал додељен фелни, потребно је поставити ограничења. Коришћењем опције *fixed* из палете алата *constraints*, потребно је ограничити пет отвора који су намењени за завртњеве, као што је приказано на слици 6.4. Поред тога, потребно је укључити опцију *mesh view* из палете алата *mesh* и она даје податак да је мрежа сачињена од 114080 елемената.



Слика 6.4: Генерисана мрежа коначних елемената са постављеним ограничењима

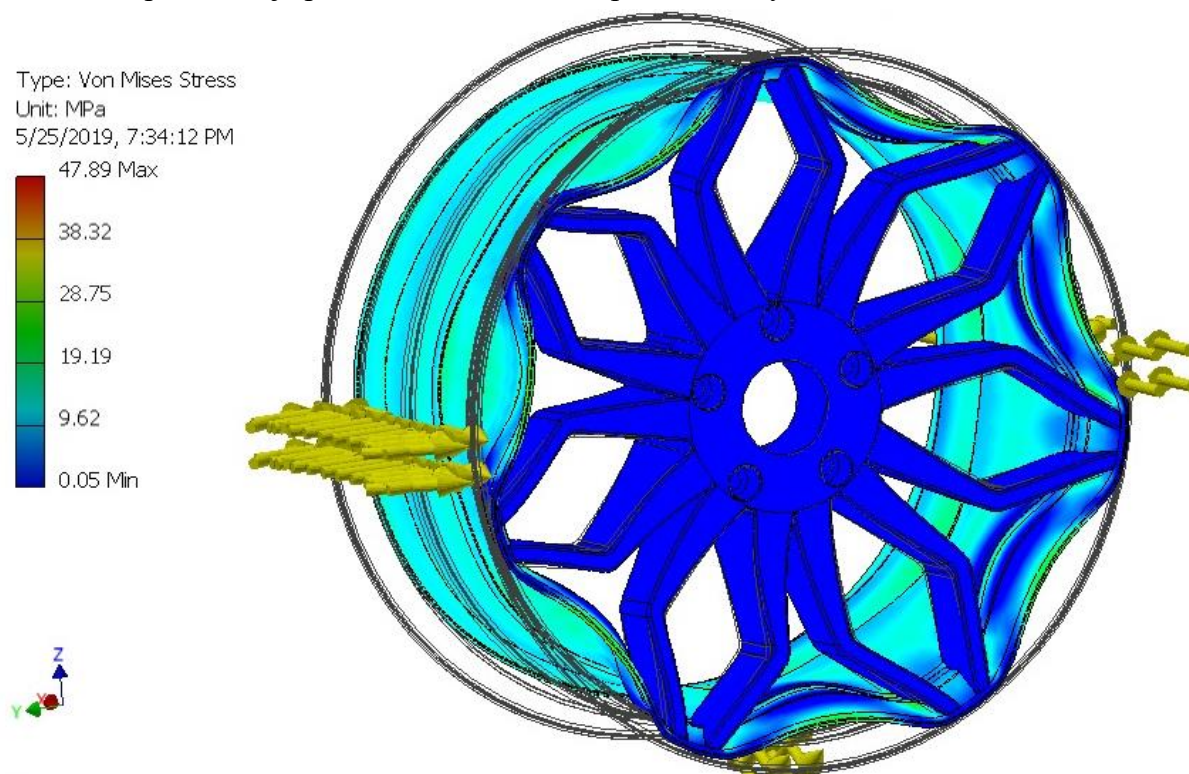
Након тога, потребно је извршити оптерећење на притисак. У палети алата *loads*, потребно је изабрати опцију *pressure*. Величина притиска износи 0.245 МПа [24]. Притисак је потребно поставити по ободу фелне као што је приказано на слици 6.5.



Слика 6.5: Задавање оптерећења

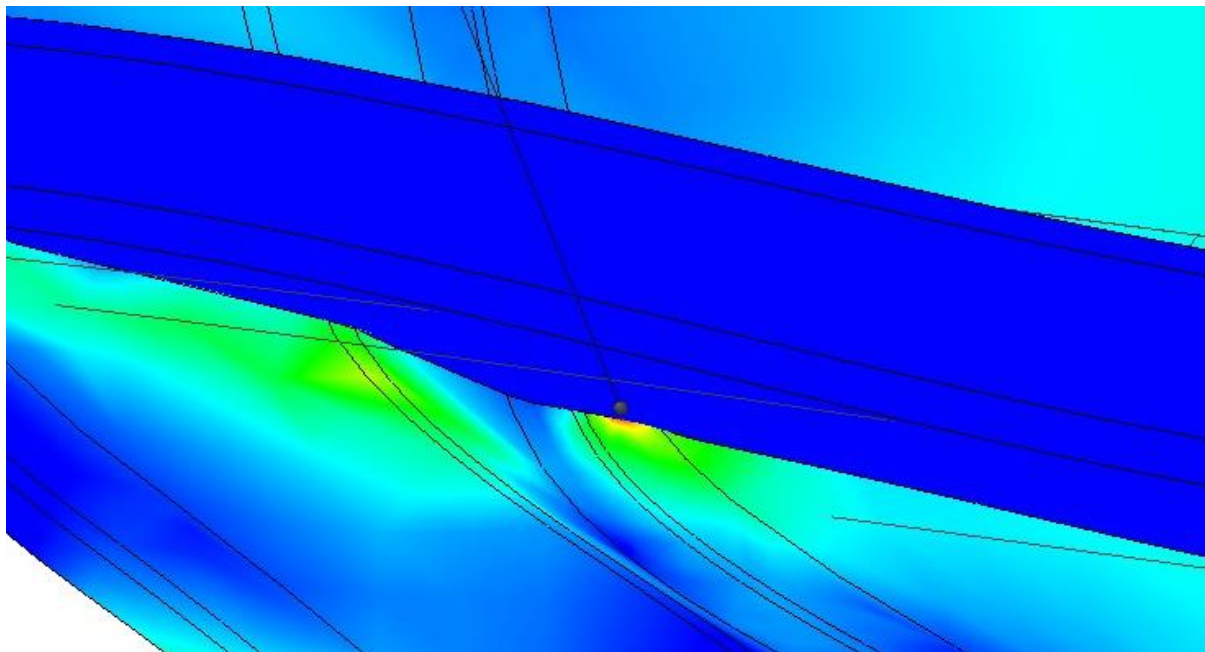
Када је оптерећење задато, у палети алата *solve*, изабрати опцију *simulation* како би се симулација покренула.

На првом моделу фелне од челика, највећи напон који се јавља је 47.89 МПа. На слици 6.6 приказана је расподела напона на првом моделу од челика.



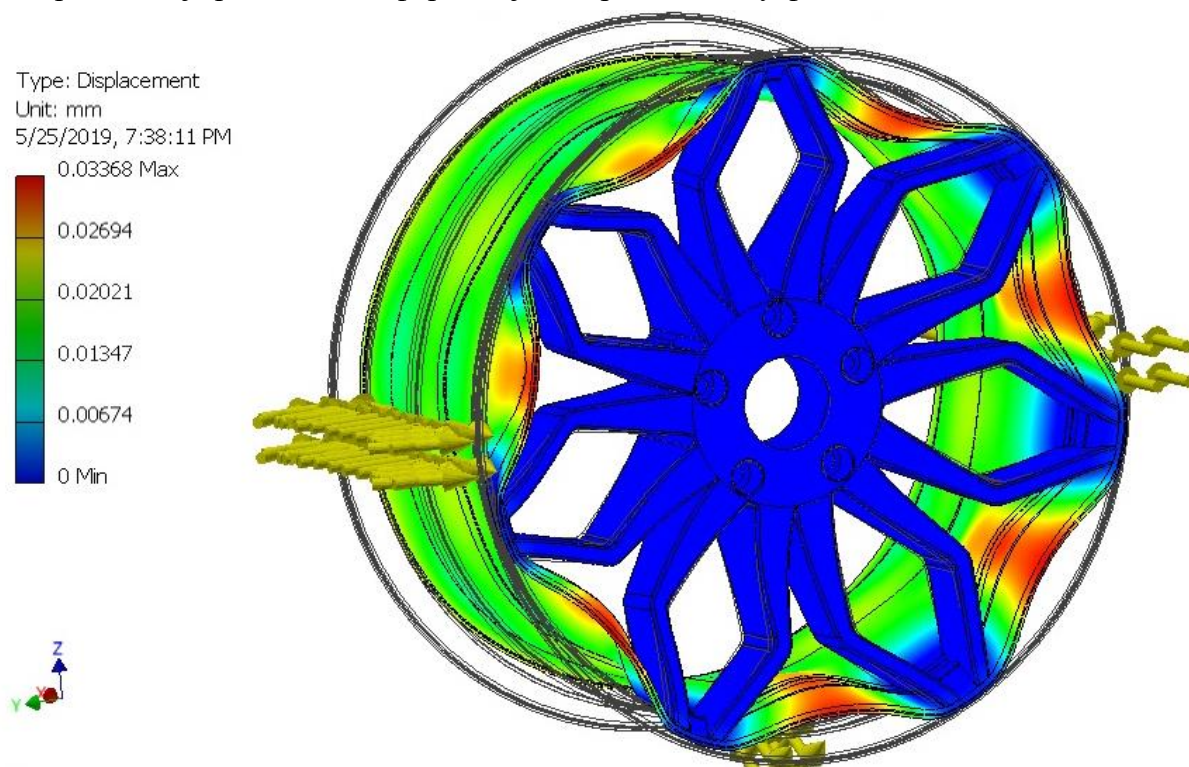
Слика 6.6: Расподела напона на фелни од челика

Највећи напон се јавља на делу где се кракови фелне спајају са њеним ободом и то је приказано на слици 6.7.



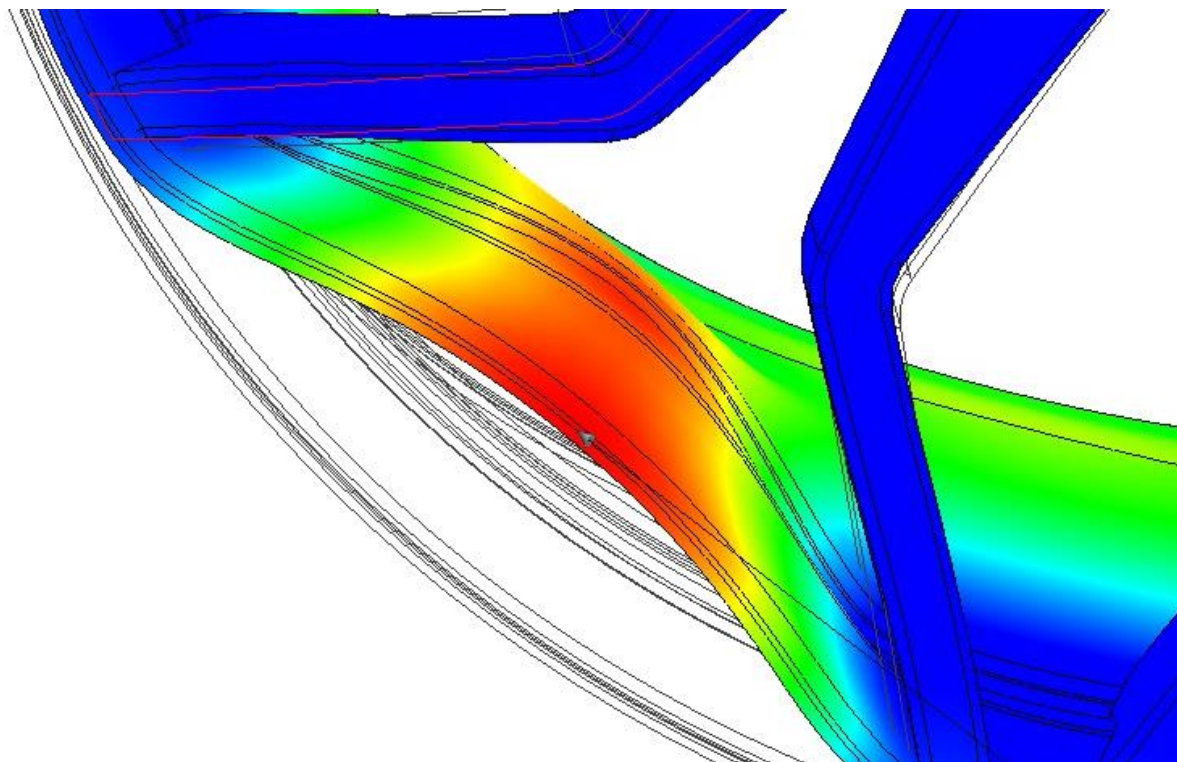
Слика 6.7: Место највећег напона

Највећа деформација на првом моделу фелне од челика је 0.03368 mm. На слици 6.8 приказана је расподела деформација на првом моделу фелне од челика.



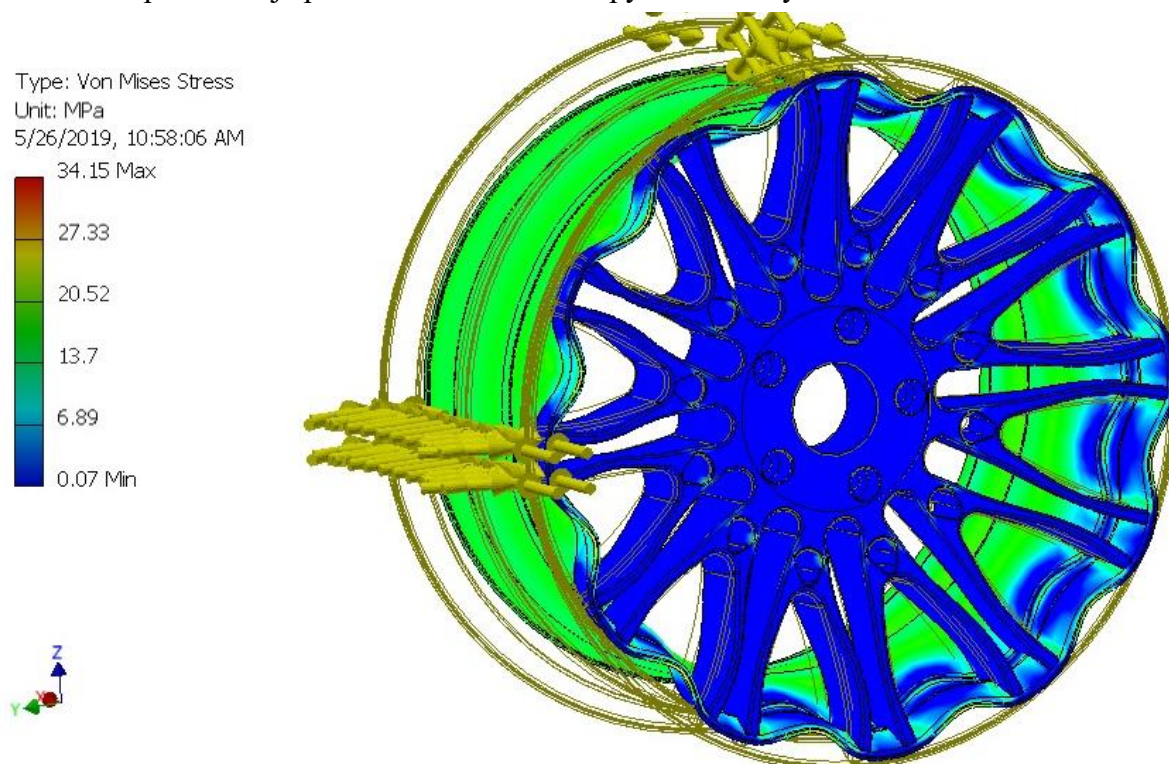
Слика 6.8: *Расподела деформација на фелни од челика*

Највећа деформација се јавља на ивици обода фелне и она је приказана на слици 6.9.



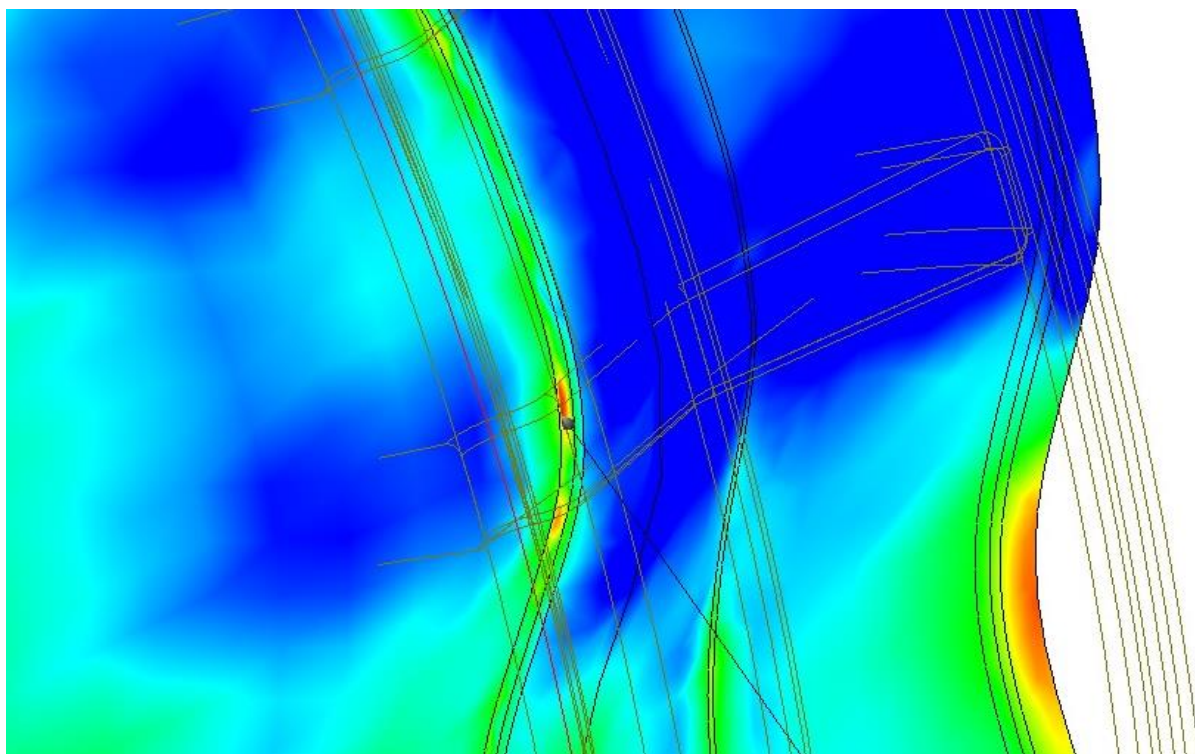
Слика 6.9: *Место највеће деформације*

На другом моделу фелне од челика, највећи напон који се јавља је 34.15 МПа. На слици 6.9 приказана је расподела напона на другом моделу од челика.



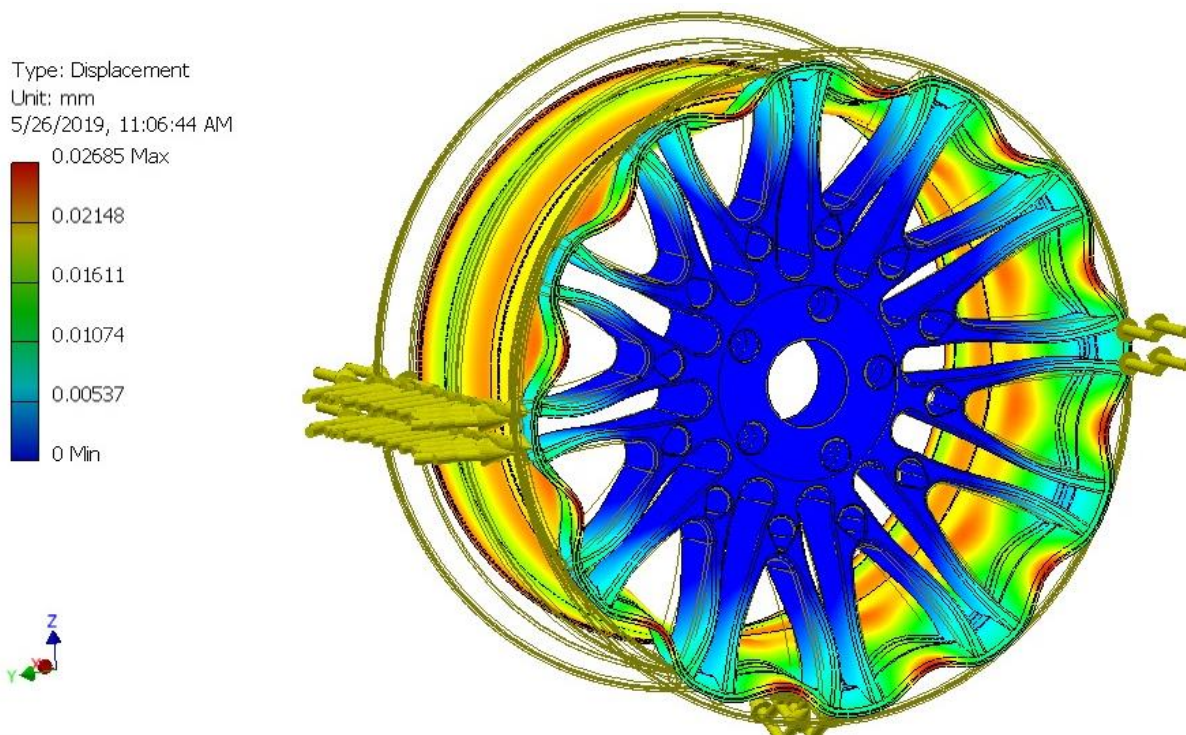
Слика 6.9: *Расподела напона на фелни од челика*

Највећи напон се јавља на самом ободу фелне као што је приказано на слици 6.10.



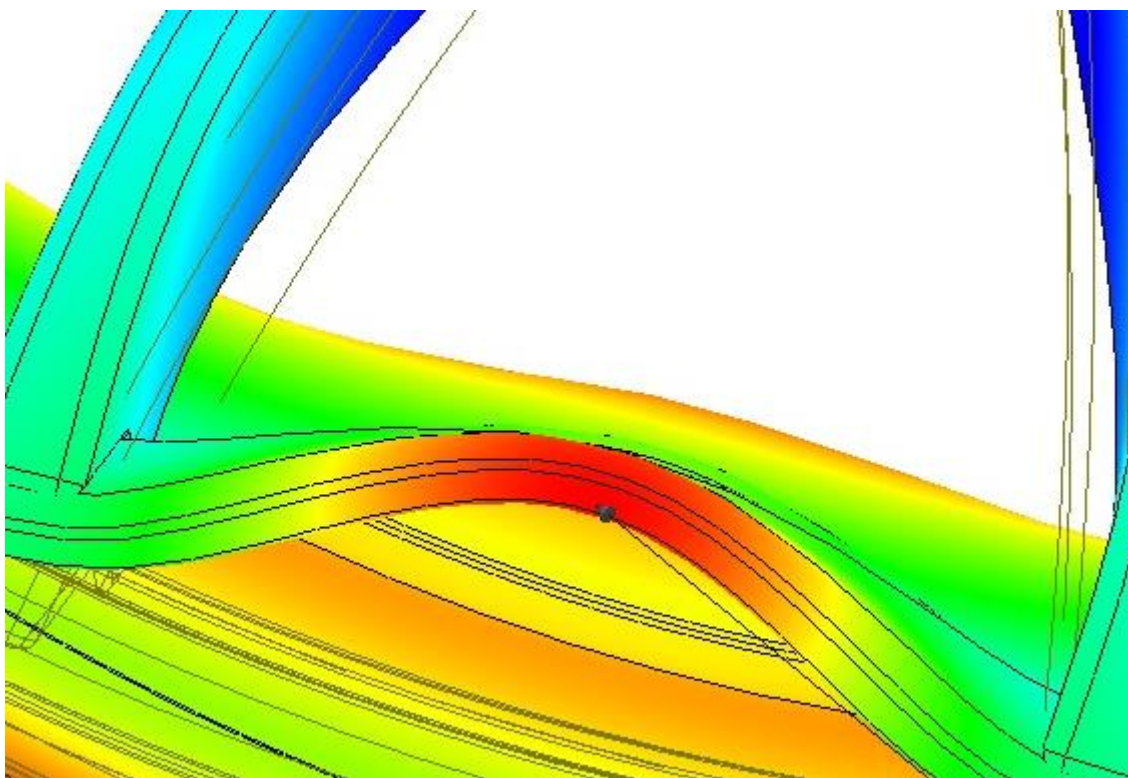
Слика 6.10: *Место највећег напона*

Највећа деформација на другом моделу фелне од челика је 0.02685 mm. На слици 6.11 приказана је расподела деформација на другом моделу фелне од челика.



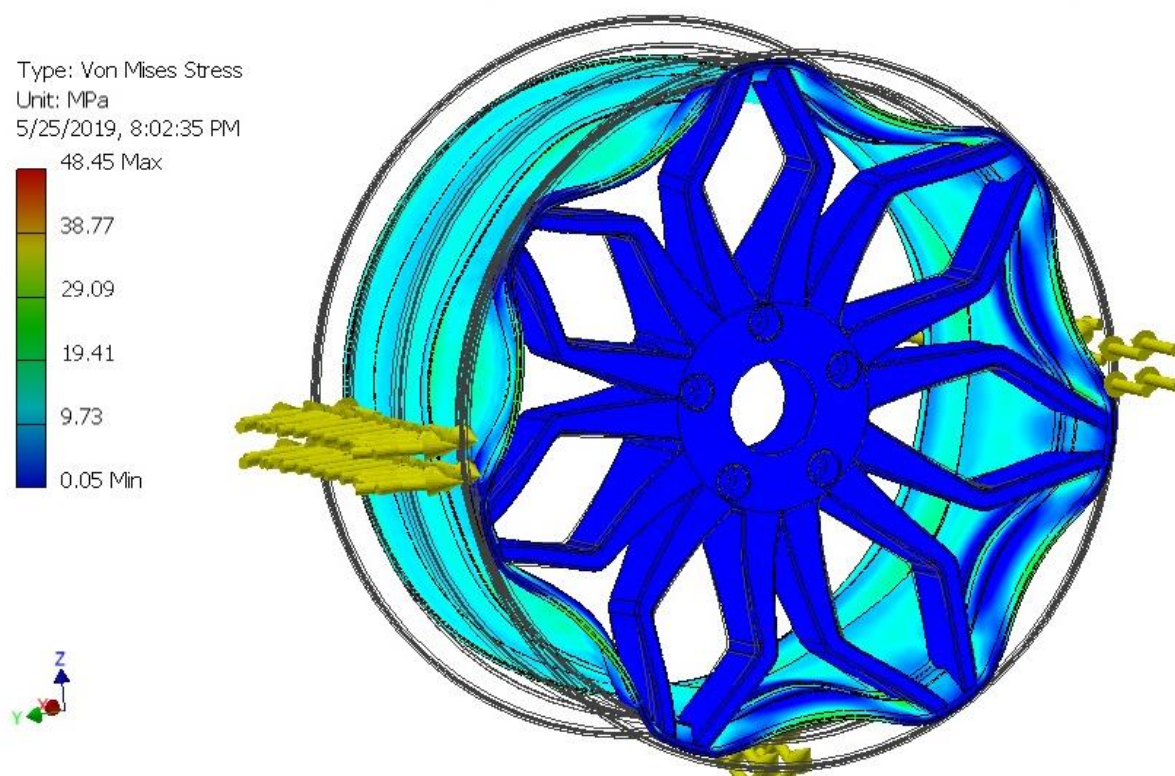
Слика 6.11: *Расподела деформација на фелни од челика*

Највећа деформација се јавља на ивици обода фелне и она је приказана на слици 6.12.



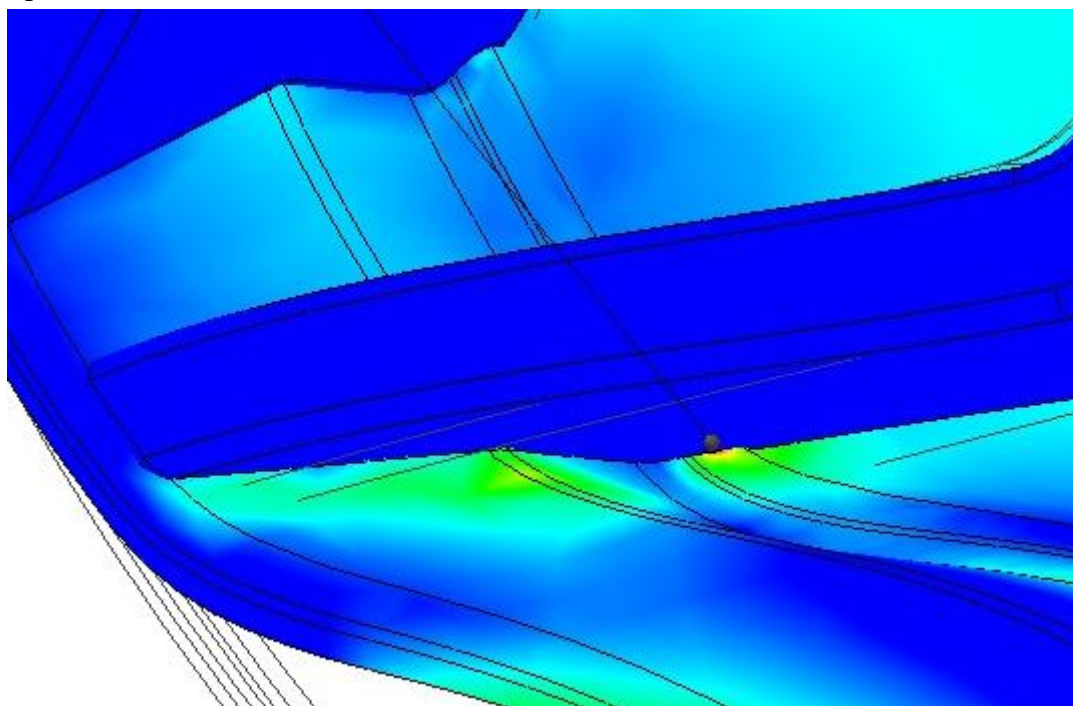
Слика 6.12: *Место највеће деформације*

На првом моделу фелне од алуминијума, највећи напон који се јавља је 48.45 МПа. На слици 6.13 приказана је расподела напона на првом моделу од алуминијума.



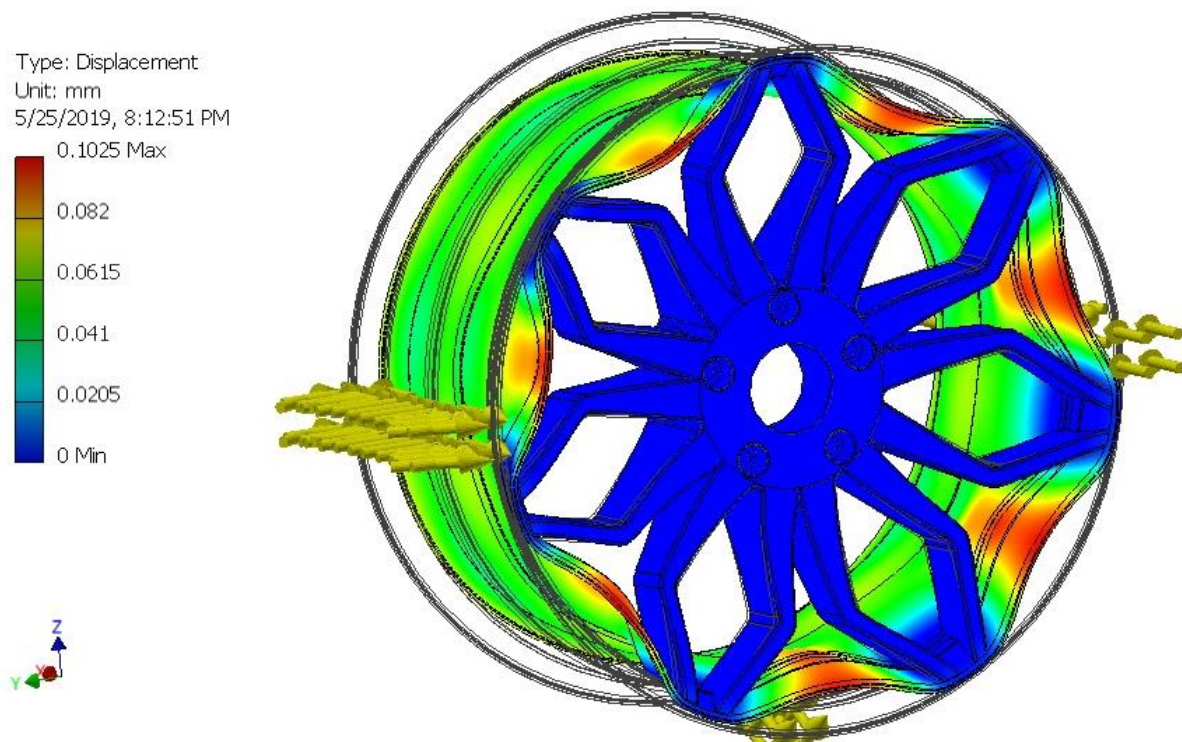
Слика 6.13: *Расподела напона на фелни од алуминијума*

Највећи напон се јавља на делу где се кракови фелне спајају са њеним ободом и то је приказано на слици 6.14.



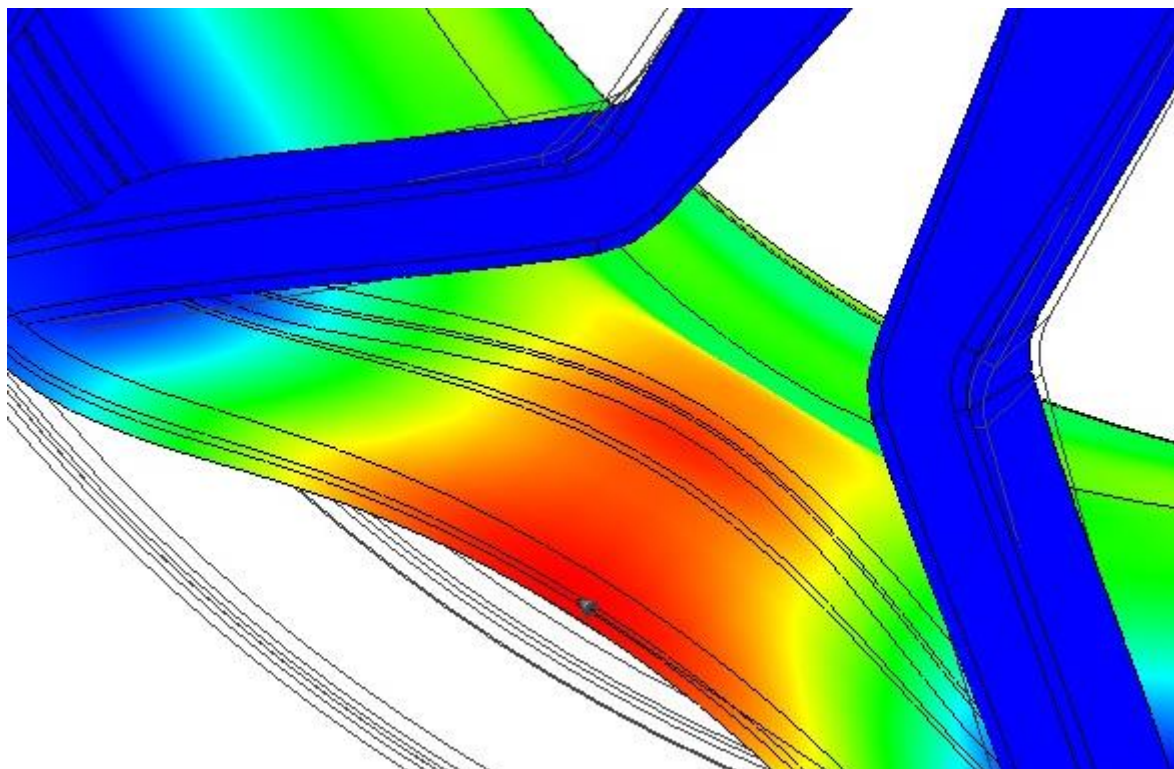
Слика 6.14: *Место највећег напона*

Највећа деформација на првом моделу фелне од алуминијума је 0.1025 mm. На слици 6.15 приказана је расподела деформација на првом моделу фелне од алуминијума.



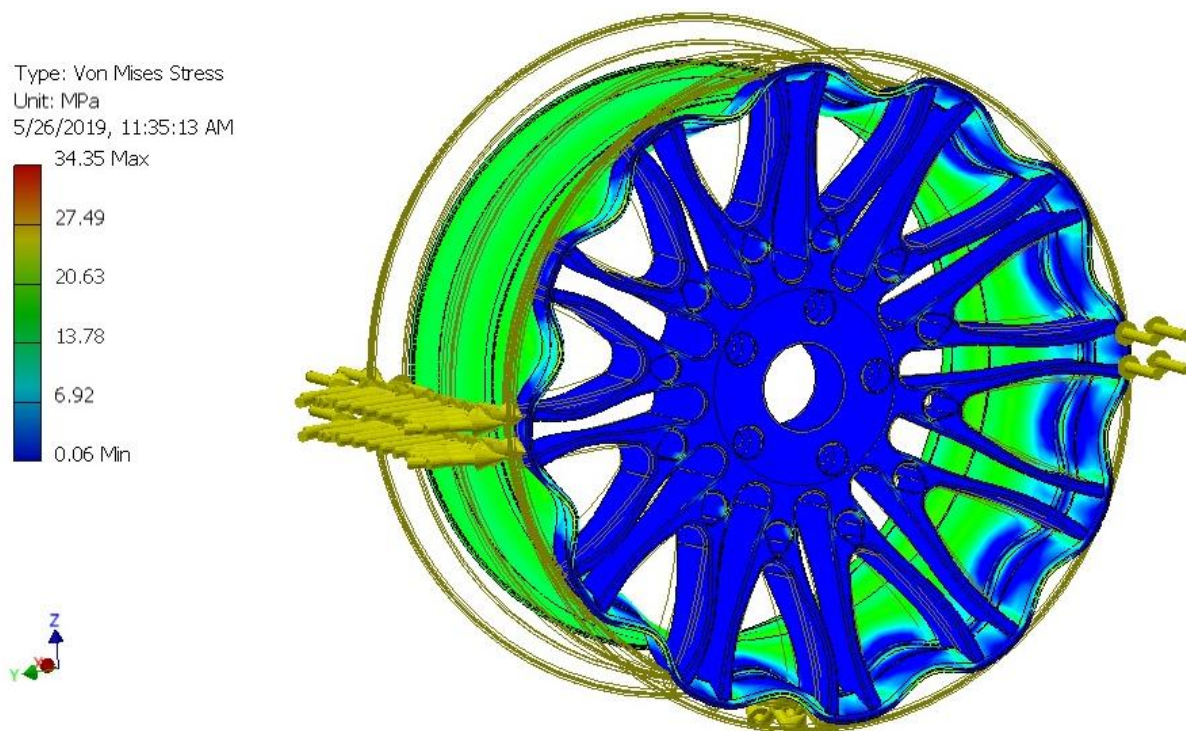
Слика 6.15: *Расподела деформација на фелни од алуминијума*

Највећа деформација се јавља на ивици обода фелне и она је приказана на слици 6.16.



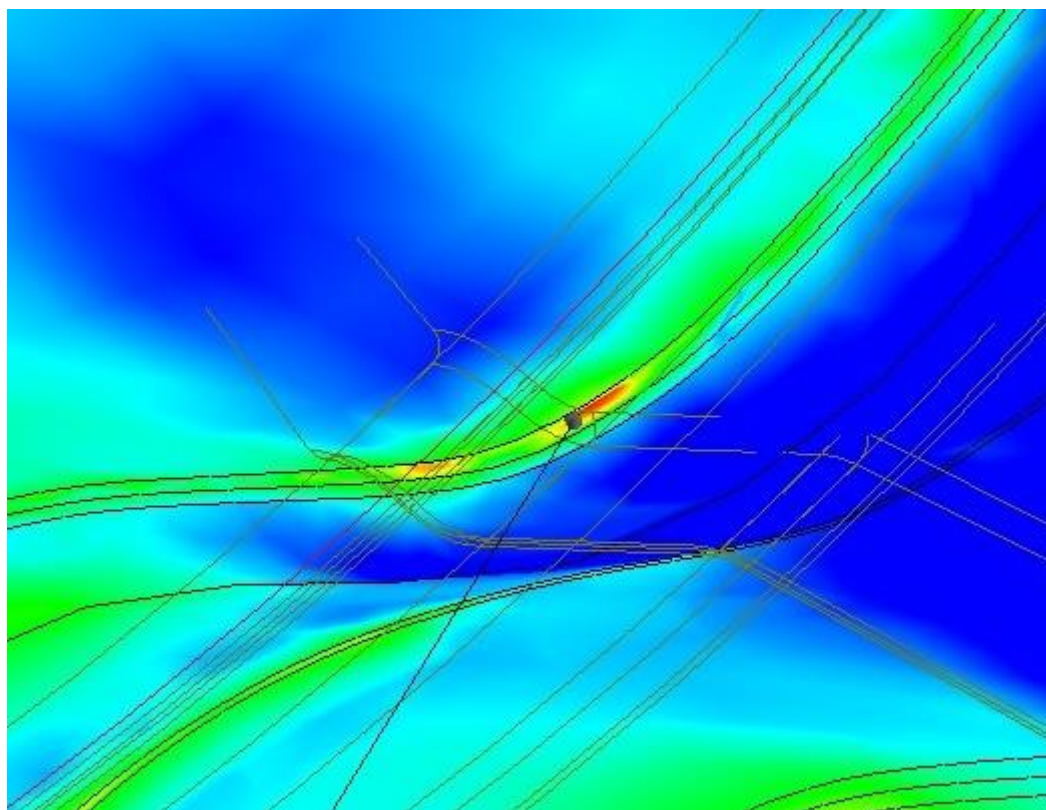
Слика 6.16: *Место највеће деформације*

На другом моделу фелне од алуминијума, највећи напон који се јавља је 34.35 МПа. На слици 6.16 приказана је расподела напона на другом моделу од алумунијума.



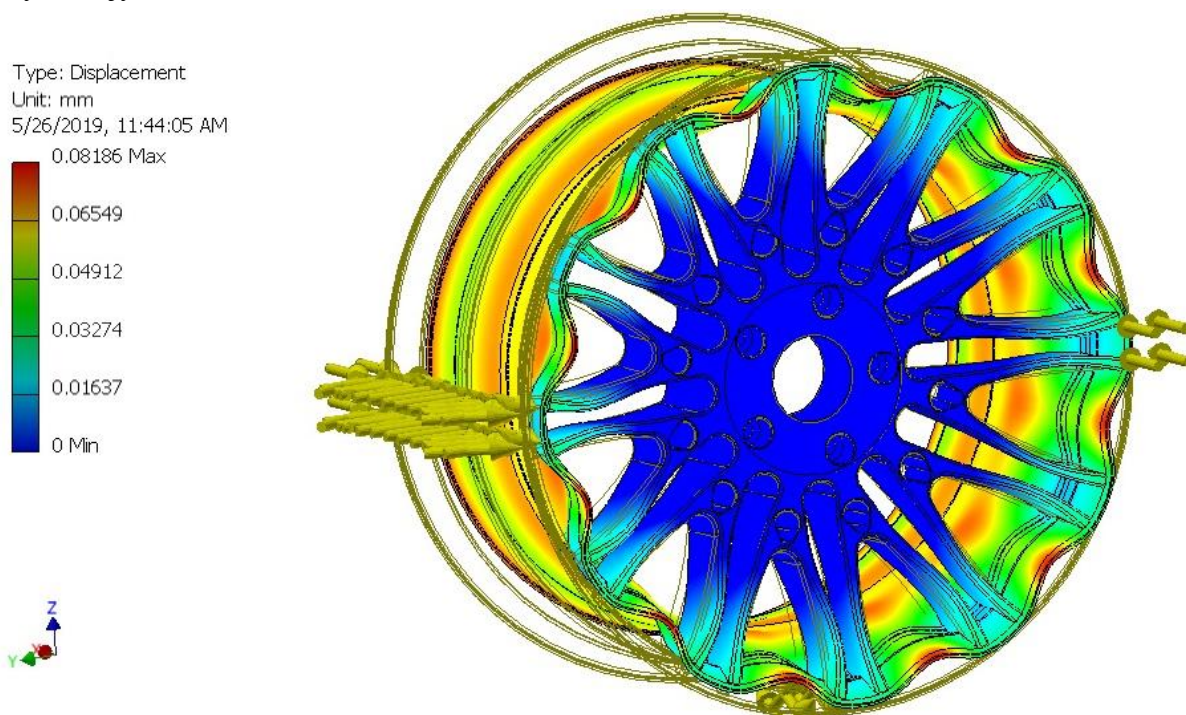
Слика 6.16: *Расподела напона на фелни од алуминијума*

Највећи напон се јавља на самом ободу фелне као што је приказано на слици 6.17.



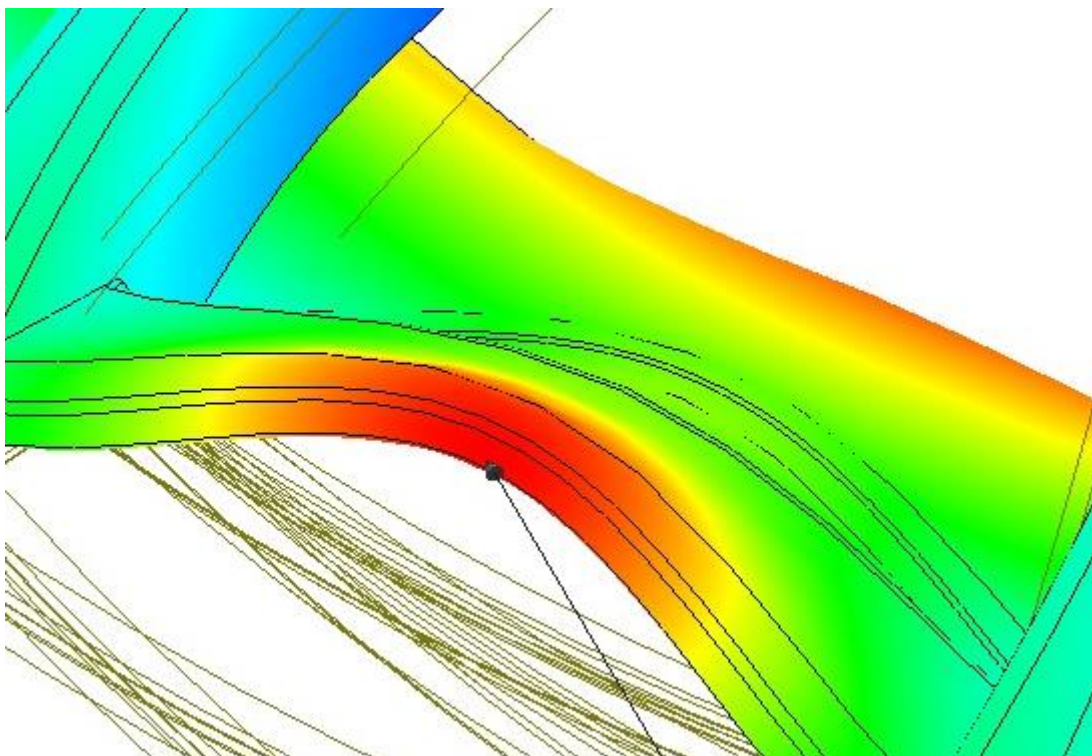
Слика 6.17: *Место највећег напона*

Највећа деформација на другом моделу фелне од алуминијума је 0.08186 mm. На слици 6.18 приказана је расподела деформација на другом моделу фелне од алуминијума.



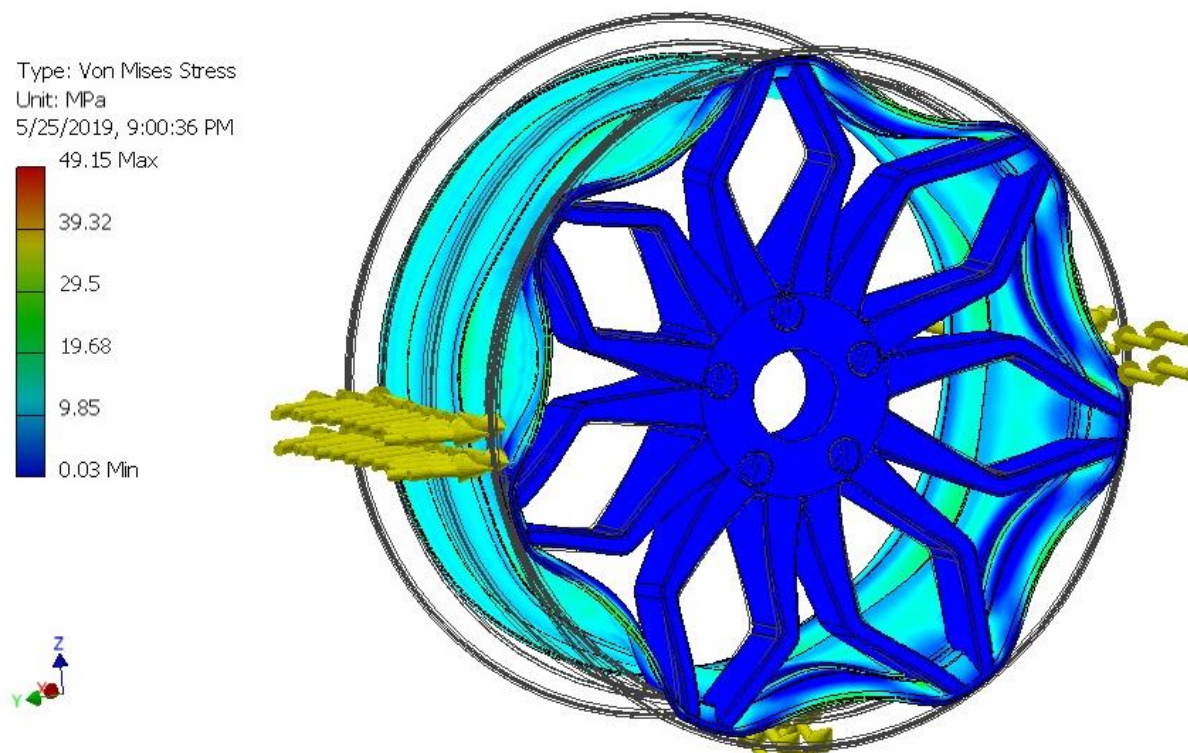
Слика 6.18: *Расподела деформација на фелни од алуминијума*

Највећа деформација се јавља на ивици обода фелне и она је приказана на слици 6.19.



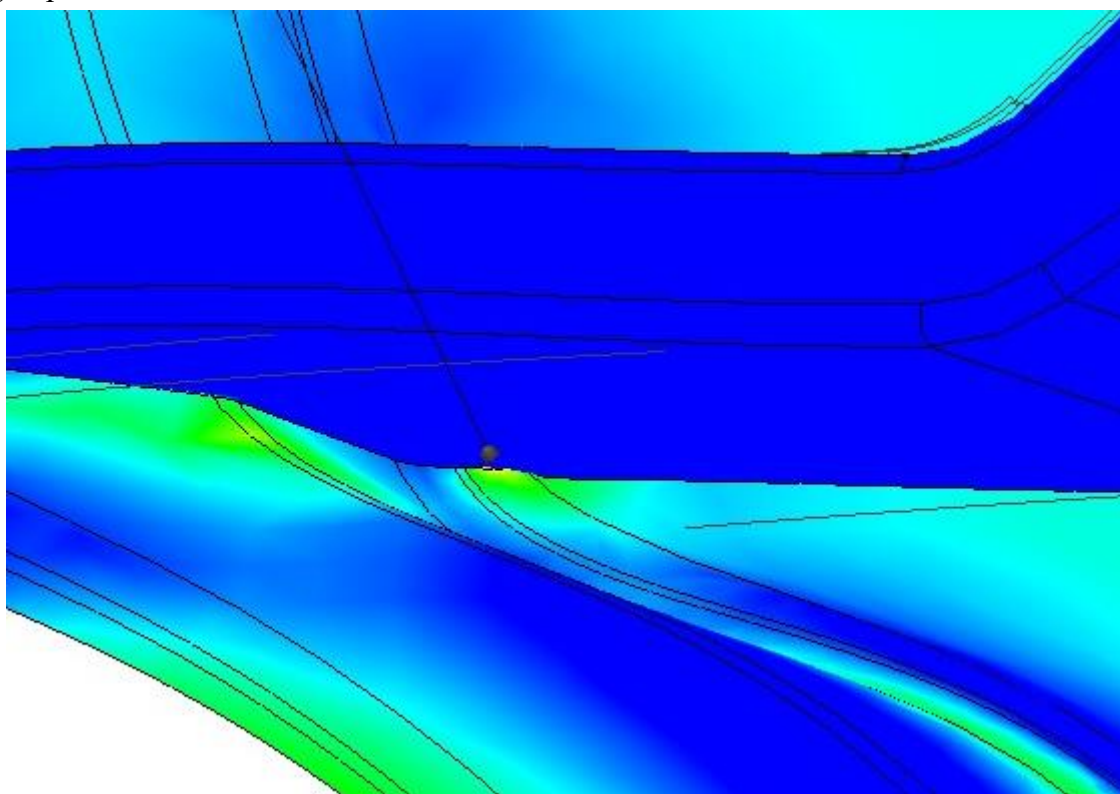
Слика 6.19: *Место највеће деформације*

На првом моделу фелне од карбона, највећи напон који се јавља је 49.15 МПа. На слици 6.20 приказана је расподела напона на првом моделу од карбона.



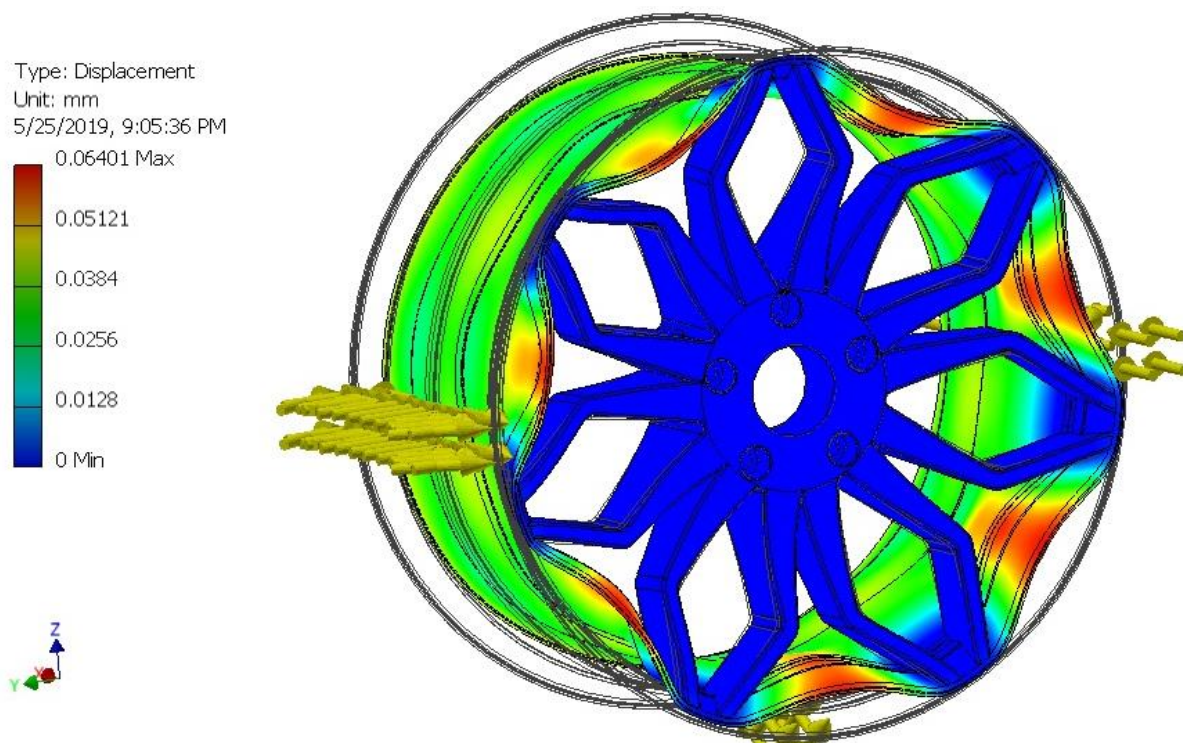
Слика 6.20: *Расподела напона на фелни од карбона*

Највећи напон се јавља на делу где се кракови фелне спајају са њеним ободом и то је приказано на слици 6.21.



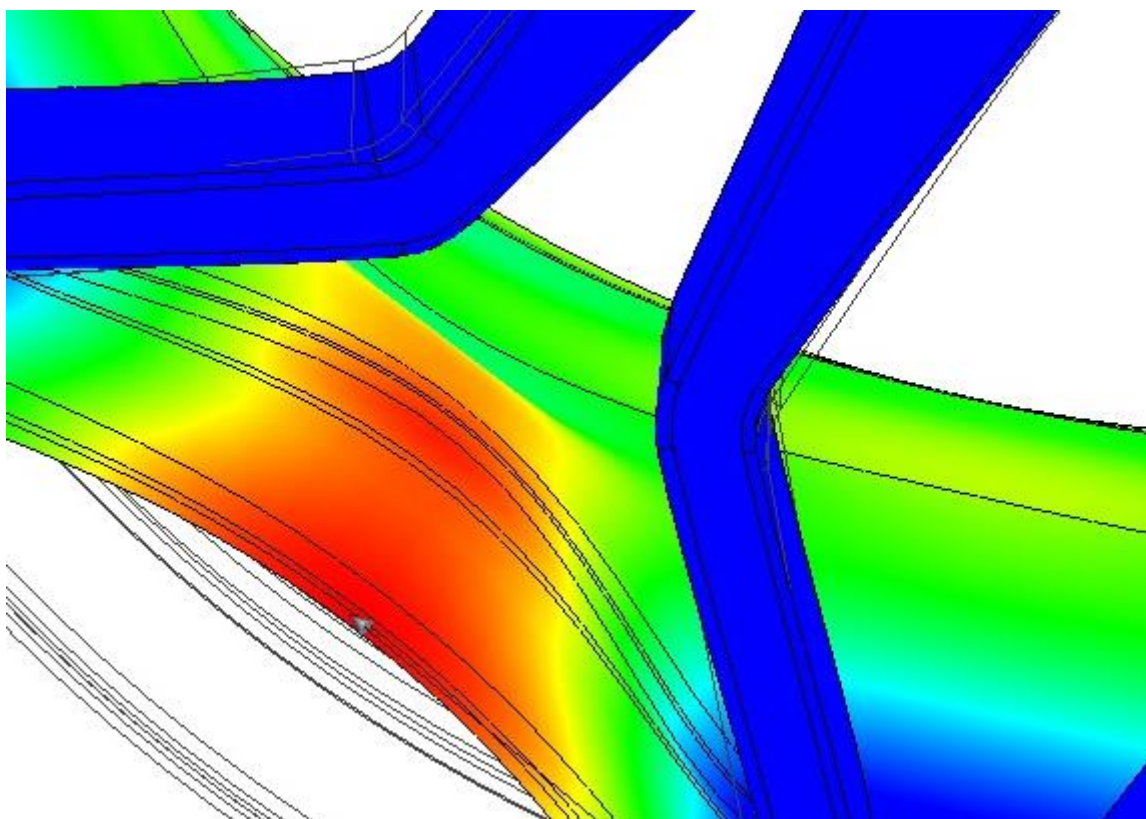
Слика 6.21: *Место највећег напона*

Највећа деформација на првом моделу фелне од карбона је 0.06401 mm. На слици 6.22 приказана је расподела деформација на првом моделу фелне од карбона.



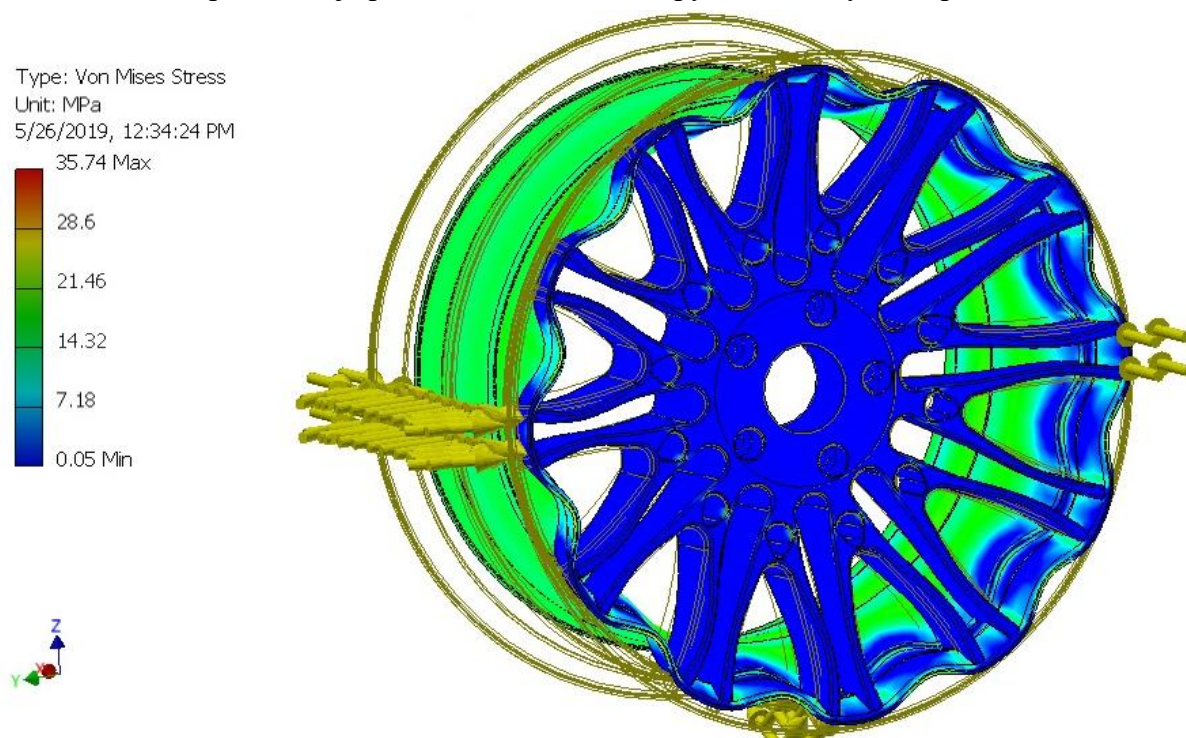
Слика 6.22: *Расподела деформација на фелни од карбона*

Највећа деформација се јавља на ивици обода фелне и она је приказана на слици 6.23.



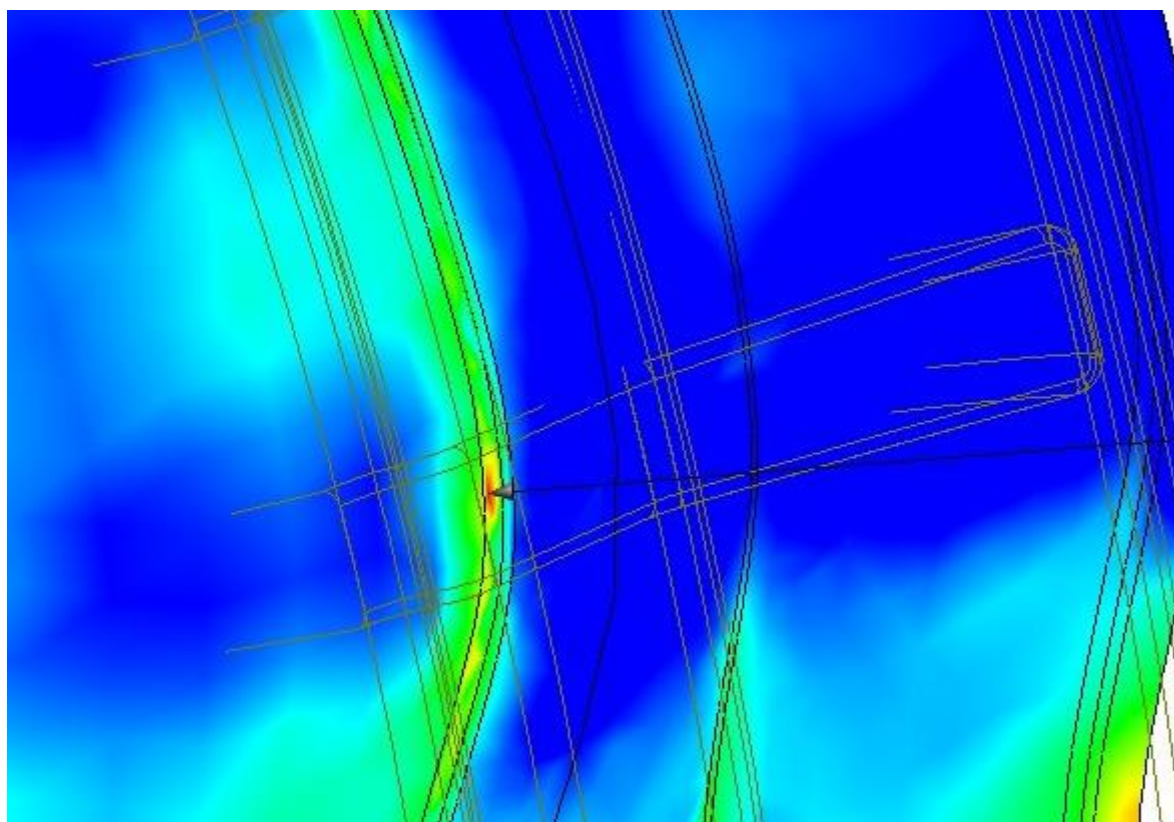
Слика 6.23: *Место највеће деформације*

На другом моделу фелне од карбона, највећи напон који се јавља је 35.74 МПа. На слици 6.24 приказана је расподела напона на другом моделу од карбона.



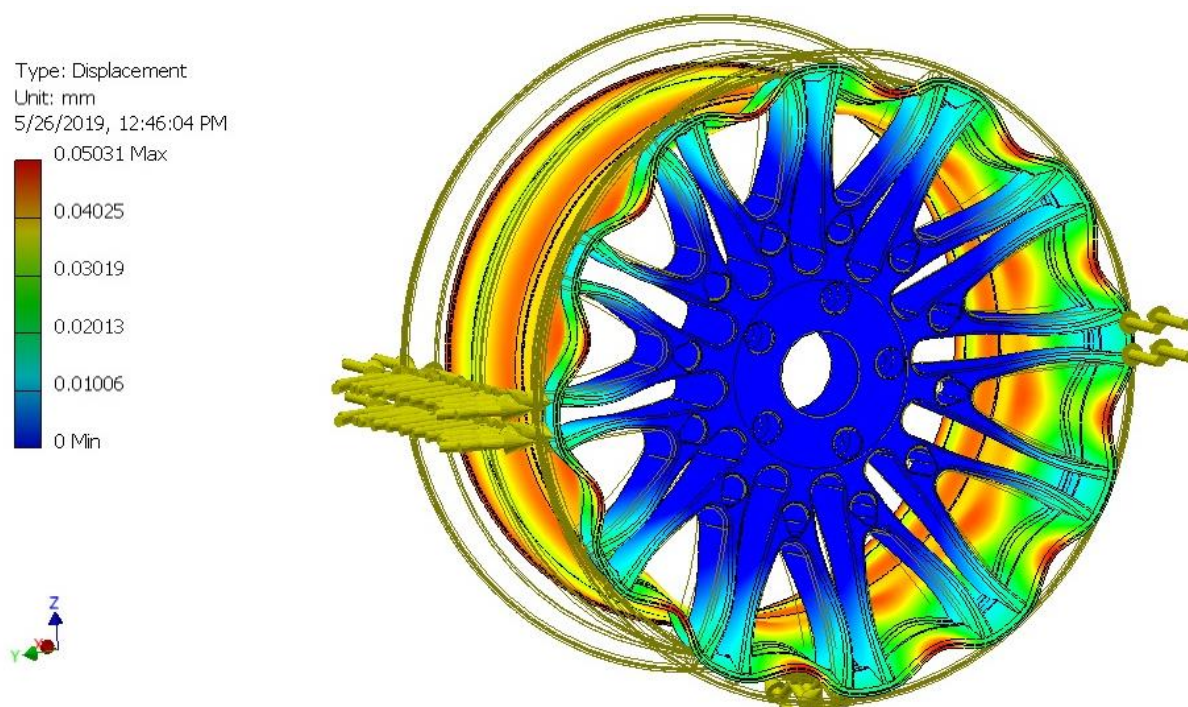
Слика 6.24: *Расподела напона на фелни од карбона*

Највећи напон се јавља на самом ободу фелне као што је приказано на слици 6.25.



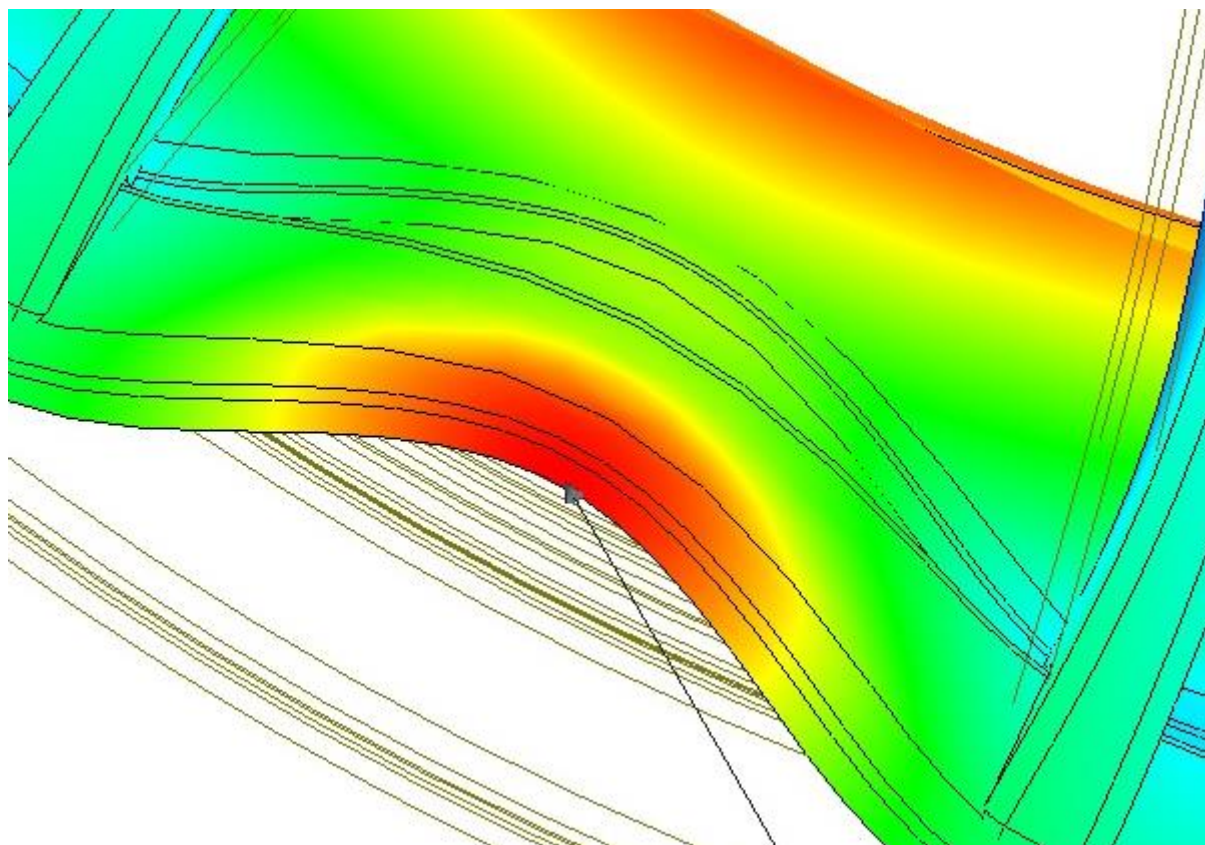
Слика 6.25: *Место највећег напона*

Највећа деформација на другом моделу фелне од карбона је 0.05031 mm. На слици 6.26 приказана је расподела деформација на другом моделу фелне од карбона.



Слика 6.26: Расподела деформација на фелни од карбона

Највећа деформација се јавља на ивици обода фелне и она је приказана на слици 6.27.



Слика 6.27: Место највеће деформације

6.1 Графички приказ резултата структурне анализе

На графику 6.1 су приказане добијене вредности напона при структурној анализи првог модела фелне аутомобила.

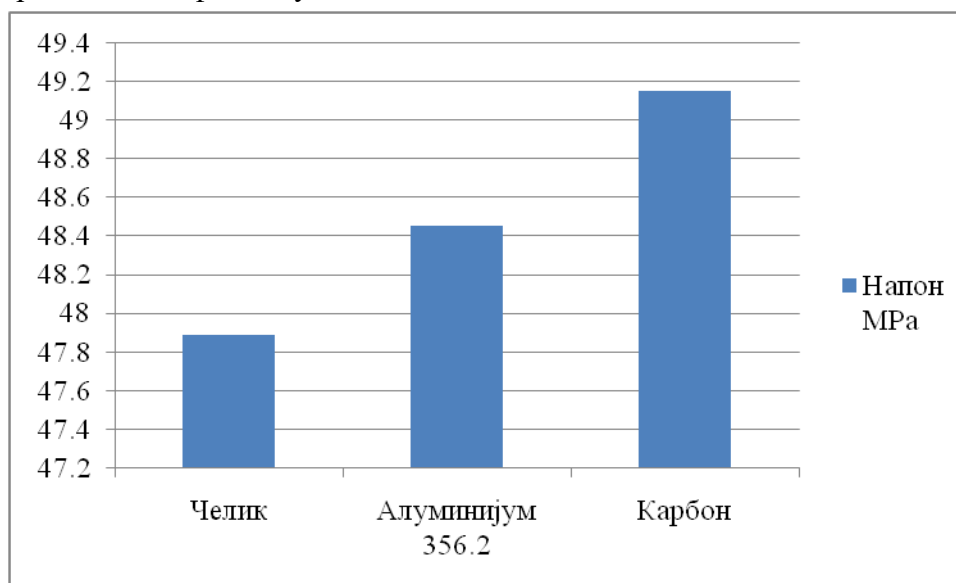


График 6.1: Добијене вредности напона првог модела

На графику 6.2 су приказане добијене вредности напона при структурној анализи другог модела фелне аутомобила.

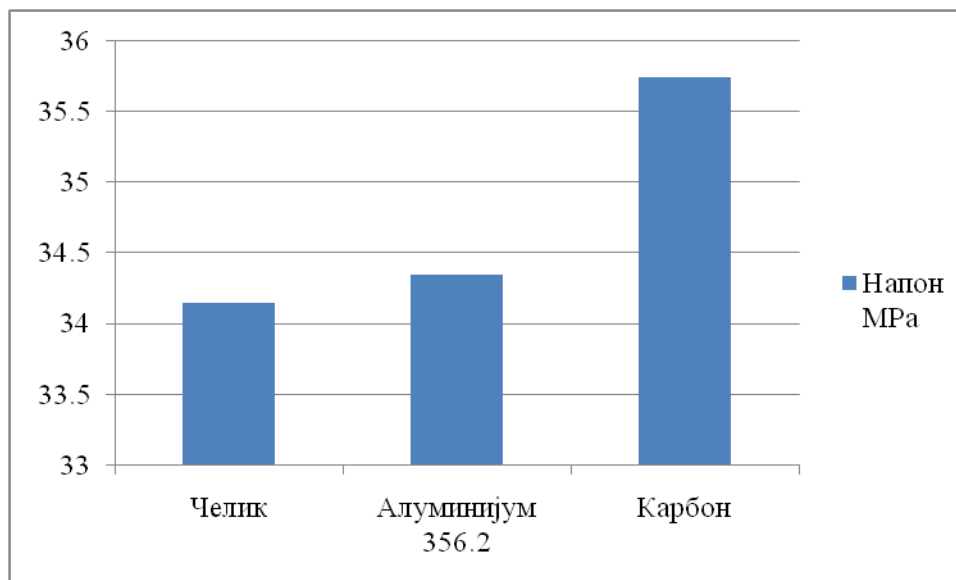


График 6.2: Добијене вредности напона другог модела

Са оба графика се може уочити да се мањи напони јављају на другом моделу фелне аутомобила, за све примењене материјале. Поред тога, фелна која је израђена од челика има најмањи напон у оба случаја, а иза ње се налазе алуминијум и карбон. Међутим, треба имати у виду да је разлика у напонима врло мала. При томе маса алуминијумске фелне је негде око три пута мања у поређењу са челичном, док је маса

фелне од карбона чак око пет пута мања у поређењу са челичном, а при том је и естетски изглед фелне много бољи. Такође, треба нагласити да су у случају свих материјала добијене вредности напона испод дозвољених вредности за дати материјал.

На графику 6.3 су приказане добијене вредности деформација при структурној анализи првог модела фелне аутомобила.

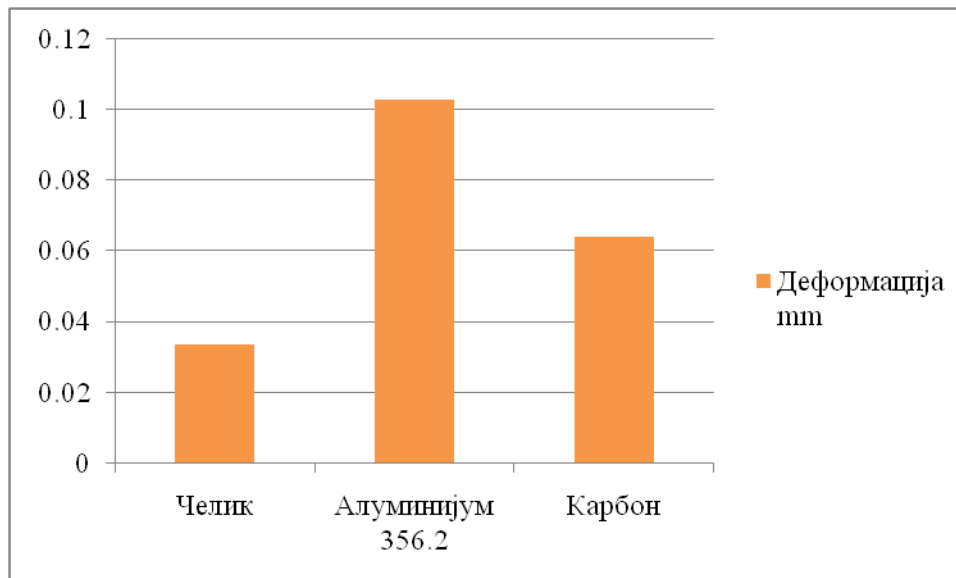


График 6.3: *Добијене вредности деформација првог модела*

На графику 6.4 су приказане добијене вредности деформација при структурној анализи другог модела фелне аутомобила.

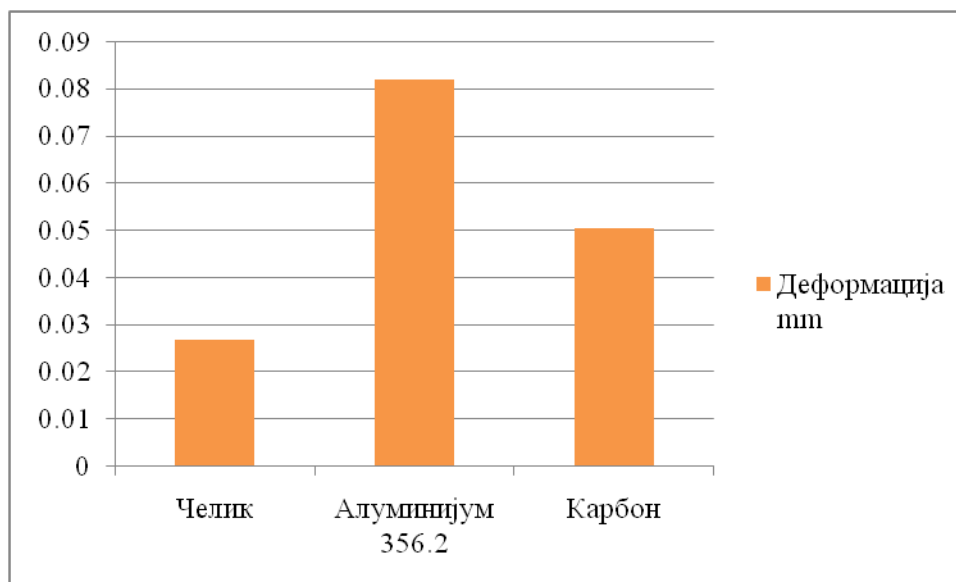


График 6.4: *Добијене вредности деформација другог модела*

Као и код анализе напона, најмање деформације у оба случаја се јављају код фелни од челика. Фелне од карбона имају нешто веће деформације, док се највеће вредности јављају у случају алуминијумских фелни.

7. Закључак

Развојем материјала добијен је широк асортиман који се може употребити за израду различитих конструкција. Поред метала, керамике и осталих, настали су нови тј. сложенији материјали који се називају композити.

Композити су се показали као добра замена за класичне материјале. Њихове предности се огледају у много чему. Најбитнија предност је та што им је маса знатно мања него код других материјала, а у поређењу са челиком, чак и до 50% мања. Пошто су то нови материјали, имају могућности константног развијања како би се добили материјали са још бољим карактеристикама. Истраживања показују да ће се и даље највише примењивати метални материјали, али где год је могуће, тежи се да се метали замене композитима који су ипак савременији и имају боље карактеристике.

У овом раду, моделирање и структурна анализа фелни аутомобила извршена је у софтверу *Autodesk Inventor*. Измоделиране су две фелне, различитих облика и оне су на крају подвргнуте оптерећењу и извршена је анализа напонско-деформационог стања.

На основу добијених резултата, примећује се да најбоље резултате при анализи напона даје челик, а затим следе алуминијум и карбон. Та разлика је, у поређењу карбона са челиком прилично мала (испод 3%), док је у случају алуминијума још мања. Код деформација, ситуација је мало другачија и ту се најбоље показао челик, а затим следе карбон и алуминијум са нешто већим вредностима. Поред тога, сам облик фелне утиче на вредност напона и деформација што се може видети на примеру друге фелне која има за нијансу боље резултате него први модел фелне.

При анализи резултата, треба узети у обзир све предности и мане споменутих материјала. Када се све то упореди, може се закључити да је могућа замена алуминијумских, а поготову челичних фелни, карбонским.

Један од показатеља зашто су карбонске фелне боље за употребу је и велика примена у ауто мото спортовима где је свака стотинка битна, а томе се може допринети применом карбона јер својом малом масом он доприноси знатно бољим карактеристикама возила. Због своје споменуте мале масе, долази се до тога да је потрошња горива знатно мања јер је возилу потребно мање снаге за покретање, убрзавање и заустављање, а такође се доприноси и смањењу штетних гасова.

Разлика при управљању возилом је приметна, јер се прецизност управљања знатно побољшава. Бука и вибрације су смањени применом карбонских фелни, што ће саму вожњу учинити удобнијом и пријатнијом. Естетски су лепше дајући луксузнији изглед. Једна од мана им је та што се при оштећењу не могу више користити, али до тог оштећења је врло тешко доћи. Такође се не може занемарити ни чењиница да су карбонске фелне знатно скупље, али је њихова све већа примена потврда исплативости инвестиције.

На основу свих споменутих предности карбонских фелни у односу на челичне и алуминијумске, може се закључити да и поред нешто лошијих вредности напона и деформација, њихова примена би била много кориснија и донела би много предности при експлоатацији.

8. Литература

- [1] Јовановић М., Лазић В., Адамовић Д., Ратковић Н.: „Машински материјали“, Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, 2003.
- [2] Јовановић М., Лазић В., Арсић Д.: „Наука о материјалима“, Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, 2017.
- [3] Ђорђевић З.: „Композитне конструкције“, Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, 2018.
- [4] International Journal of Mechanical and production Engineering: „Composite materials – history, types, fabrication techniques, advantages and application“, Kakatiya Institute of Technology & Science, India, 2017.
- [5] https://deadliestwarrior.fandom.com/wiki/Mongol_Composite_Bow, приступљено марта 2019.
- [6] <https://www.castrocompositesshop.com/gb/fibre-reinforcements/1227-tejido-de-kevlarcarbono-sarga-22-de-215-gm2.html>, приступљено марта 2019.
- [7] <https://www.cee.elektro.dtu.dk/news/nyhed?id=1BAFD1FA-4578-4AB9-B212-D01A5E204260>, приступљено марта 2019.
- [8] Ђорђевић З.: „Композитне конструкције“, Скрипта у електронској форми, Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, 2018.
- [9] Бајић Д.: „Композитни материјали“, Скрипта у електронској форми, Машински факултет Подгорица, 2018.
- [10] Приморац И.: „Јаросит као пунило за композите на бази полиестерске смоле“, Факултет машинства и бродоградње у Загребу, 2015.
- [11] <https://www.sgcarbon.com/en/for-a-smarter-world/>, приступљено марта 2019.
- [12] <https://redbullracing.redbull.com/car/rb15>, приступљено марта 2019.
- [13] <http://championhelmets.blogspot.com/2016/03/agv-pista-gp-soleluna-2016-valentino.html>, приступљено марта 2019.
- [14] Reddy V. B., Jensen A., Laird G.: „Composite laminate modeling“, Handbook for Femap NX Nastran and LS-DYNA Users, Predictive Engineering, Portland, 2015.
- [15] Novoorun T. P., Berladir K. V., Pererva V. I., Rudenko S. G., Martynov A. I.: „Modern materials for automotive industry“, Journal of Engineering Sciences, Ukraine, 2017.

- [16] <https://www.corvsport.com/1953-c1-corvette-image-gallery/>, приступљено марта 2019.
- [17] <https://www.f1technical.net/f1db/cars/476/mclaren-mp4-1>, приступљено марта 2019.
- [18] Aluminium Automotive Manual: „Applications – Chassis & Suspension – Wheels“, Handbook, Belgium, 2011.
- [19] https://euroguma.rs/Felne-za-sve-vrste-automobila?product_id=12000, приступљено марта 2019.
- [20] <https://www.topstopauto.rs/index.php/proizvodi/felne-ponuda/svi-brendovi/felna-alu-16x70-5108-et40-723-momo-hyperstar-hypersilver-95whsh70640508-detail>, приступљено марта 2019.
- [21] <https://www.popularmechanics.com/cars/a9296/even-your-wheels-will-be-made-of-carbon-fiber-15778959/>, приступљено марта 2019.
- [22] Satyanarayana N., Sambaiah Ch.: „Fatigue Analysis of Aluminium Alloy Wheel Under Radial Load“, International Journal of Mechanical and Industrial Engineering, India, 2012.
- [23] Valetava K., Jethava P.: „Fatigue and Static Structural Analysis of Car Wheel using Finite Element Method“, International Journal of Technical Innovation in Modern Engineering & Science, India, 2016.
- [24] Dede G., Yildizhan S., Ökten K., Çalik A., Uludamar E., Özcanli M.: „Investigation of Stress and Displacement Distribution in Advanced Steel Rims“, International Journal of Automotive Engineering and Technologies, Turkey, 2017.