

ŽILinskÁ UNIVERZITA V ŽILINE
Strojnícka
fakulta

AUTOREFERÁT DIZERTAČNEJ PRÁCE

Žilina, 2025

Ing. Lukáš Pompáš



ŽILINSKÁ UNIVERZITA V ŽILINE
Strojnícka
fakulta

Ing. Lukáš Pompáš

AUTOREFERÁT DIZERTAČNEJ PRÁCE

Optimalizácia tvaru a štruktúr komponentov tvorených na báze kompozitných materiálov

Na získanie akademického titulu **doktor**
(„**philosophiae doctor**“, v skratke „**PhD.**“)
v študijnom odbore Strojárstvo
v študijnom programe časti a mechanizmy strojov

Žilina 2025

Dizertačná práca bola vypracovaná v dennej forme doktorandského štúdia na Žilinskej univerzite v Žiline, Strojníckej fakulte, Katedra konštruovania a častí strojov.

Predkladateľ: **Ing. Lukáš Pompáš**
Žilinská univerzita v Žiline
Strojnícka fakulta
Katedra konštruovania a častí strojov

Školiteľ: **prof. Ing. Ľuboš Kučera, PhD.**
Žilinská univerzita v Žiline
Strojnícka fakulta
Katedra konštruovania a častí strojov

Oponenti: **1. doc. Ing. Michal Petrů, PhD.**
Technická univerzita v Liberci
Fakulta strojní
Katedra částí a mechanismů strojů
2. prof. Ing. Alžbeta Sapietová, PhD.
Žilinská univerzita v Žiline
Strojnícka fakulta
Katedra konštruovania a častí strojov
3. Ing. Milan Šoška, PhD.
Transmisie Engineering a.s.
Pavla Mudroňa 10, 036 10 Martin

Autoreferát bol rozoslaný dňa:

Obhajoba dizertačnej práce sa koná dňa20.08.2025..... o8:30..... hod. v miestnostiBD004..... na SJF, Univerzitná 8215/1, 010 26, Žilina, pred komisiou pre obhajobu dizertačnej práce schválenou odborovou komisiou v študijnom odbore Strojárstvo, v študijnom programe Časti a mechanizmy strojov, vymenovanou dekanom Strojníckej fakulty, Žilinskej univerzity v Žiline.

S dizertačnou prácou je možné sa oboznámiť na referáte pre vedu a výskum dekanátu SJF, UNIZA, Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina.

prof. Ing. Slavomír Hrček, PhD.
predseda komisie pre obhajobu dizertačnej práce

Obsah

1	ÚVOD	5
1.1	Ciele dizertačnej práce	5
2	Podrobný výrobný proces rámu elektrického bicykla z uhlíkových vlákien.....	6
2.1	Výber a príprava uhlíkových vlákien	6
2.2	Ukladanie vrstiev do formy.....	7
2.3	Zatváranie formy a predlisovanie	7
2.4	Vytvrdzovanie v autokláve alebo peci.....	8
2.5	Demontáž a opracovanie.....	9
2.6	Lakovanie a dizajn	9
2.7	Záverečné testovanie a montáž bicykla	9
3	Technický návrh rámu elektrického bicykla	10
3.1	Geometrické parametre rámu elektrického bicykla	10
3.2	Finalizácia výroby rámu elektrického bicykla	11
3.3	Dostatočné spevnenie rámu výstužným prvkom.....	12
4	Databáza materiálových vlastností kompozitov	12
4.1	Materiál GG204T – predimpregovaný materiál.....	12
4.2	Materiál GG285T2	13
4.3	Materiál GG300T	13
4.4	Materiál GG630T – predimpregovaný materiál	14
4.5	Epoxidová živica Bisfenol F	14
5	Testovanie vzoriek kompozitov.....	15
5.1	Numerická simulácia skúšky trojbodového ohybu	17
6	Simulačná analýza kompozitného rámu elektrického bicykla v Programe ANSYS Workbench	19
6.1	Skúška pevnosti rámu sedlovej trúbky v programe Ansys Workbench	19
6.2	Skúška pevnosti rámu únavy pedálovými silami v programe Ansys Workbench	20
7	Simulačná analýza kompozitného rámu elektrického bicykla v Programe MARC MENTAT	22
7.1	Skúška pevnosti rámu sedlovej trúbky v programe Marc Mentat	22
7.2	Skúška pevnosti rámu únavy pedálovými silami v programe Marc Mentat.....	23
8	Vyhodnotenie a porovnanie výsledkov analýz rámu bicykla programov Ansys Workbench a Marc Mentat	24
9	Optimalizácia usporiadania karbónových vrstiev rámu.....	25
8.1	Vyhodnotenie napätí a deformácií pre navrhované varianty.....	27
10	Záver	28

1 ÚVOD

Výber materiálov na výrobu konkrétnych dielov v súčasnosti čoraz viac ovplyvňujú kompozitné materiály. Ich primárne použitie vyplýva zo snahy nahradiť oceľ a iné kovy s cieľom zvýšiť pevnosť, znížiť hmotnosť, byť odolnejšie voči chemikáliám, odolávať korózii atď.

Kompozitné komponenty poskytujú výnimočné vlastnosti, ktoré nie sú možné pri použití iných materiálov. Možno ich použiť mnohými spôsobmi. Využívajú sa najmä v automobilovom, lodnom a leteckom priemysle. Ďalšie využitie majú v oblasti elektrotechniky, elektroniky, energetiky a strojárstva [1].

Inžinieri majú záujem nielen o vybudovanie funkčnej konštrukcie, ale aj o čo najlepší dizajn, a to z rôznych dôvodov vrátane konkurenčného trhu. Optimalizácia je proces určovania optimálnej konštrukcie, ktorý sa široko využíva v rôznych odvetviach vrátane projektovania potrubí, mostov a navrhovania jedinečných mechanických konštrukcií, ako sú súčasti automobilov, lodí a lietadiel.

Okrem toho sa kompozitné materiály čoraz viac využívajú v rôznych priemyselných odvetviach vďaka ich vysokému pomeru pevnosti a hmotnosti. V dôsledku toho sa uskutočnilo množstvo optimalizačných štúdií kompozitných štruktúr z dvoch základných hľadísk. Druh optimalizačných problémov sa skúma podľa kalibru a množstva cieľových funkcií a návrhových premenných [2].

Dopyt po ľahkých riešeniach vo výrobkoch rýchlo rastie. Zníženie hmotnosti konštrukcií nám pomáha v mnohých ohľadoch, od umožnenia rýchlejšej jazdy cyklistom až po pomoc vozidlám pri úspore paliva. Hromadná výroba týchto ľahkých konštrukcií však vždy predstavovala výzvu, ktorá spočívala v hľadaní rovnováhy medzi potrebou úspory hmotnosti a potrebou dostatočnej celistvosti konštrukcie, aby odolala všetkým očakávaným zaťaženiám. Nedávny vývoj ďalej umožňuje a demokratizuje tieto ľahké riešenia vo väčšom meradle. Týka sa to najmä kompozitov vystužených vláknami, kde sa výrobné procesy môžu teraz dramaticky skrátiť na účely hromadnej výroby a technické výpočty sa stávajú veľmi presnými.

Výsledky tejto dizertačnej práce by mohli byť prínosom pre štúdium kompozitných materiálov a ich aplikácií. Zistenia tejto dizertačnej práce môžu pomôcť pri navrhovaní a výrobe nových kompozitných komponentov s lepšími vlastnosťami. Okrem toho by mohla ponúknuť zasvätenú analýzu a návrhy pre komerčné podniky zaoberajúce sa tvorbou a aplikáciou kompozitných materiálov.

1.1 Ciele dizertačnej práce

Hlavným cieľom dizertačnej práce je zvýšiť naše znalosti o simulácii kompozitných konštrukcií zložených z anizotropných materiálových konštrukčných prvkov. V práci sa skúma, ako sa tieto materiály správajú pri rôznych zaťaženiach, pričom sa zohľadňujú ich smerovo závislé charakteristiky. Cieľom je rozšíriť poznatky o potenciálnych aplikáciách kompozitov v nosných konštrukciách a vytvoriť systematický spôsob ich numerického vyhodnocovania pomocou sofistikovaných simulačných nástrojov.

Za týmto účelom bude realizovaných niekoľko praktických a analytických krokov:

- Vypracovanie 3D modelu rámu elektrického bicykla, ktorý bude slúžiť ako základný objekt pre numerické simulácie v softvérových prostrediach ANSYS Workbench a MARC Mentat.
- Zostavenie databázy materiálových vlastností v prostredí Digimat, konkrétne pre vybrané typy karbónových tkanín, ktoré budú použité ako vstupné dáta pre FEM analýzy.
- Realizácia výpočtových simulácií zameraných na jednotlivé konštrukčné uzly rámu bicykla, a to s využitím rôznych konfigurácií karbónových výstuží, aby sa vyhodnotil ich vplyv na napäťovo-deformačné správanie celej konštrukcie.
- Návrh vhodného usporiadania a kombinácie karbónových tkanín pre jednotlivé časti rámu s cieľom zabezpečiť požadované mechanické vlastnosti, ako sú pevnosť, tuhosť a dlhodobá spoľahlivosť konštrukcie.

Dizertačná práca bola vypracovaná v rámci projektu č. NFP313010BXF3.

Autor ďakuje za podporu programu Erasmus+ Traineeship UNIZA.

2 PODROBNÝ VÝROBNÝ PROCES RÁMU ELEKTRICKÉHO BICYKLA Z UHLÍKOVÝCH VLÁKIEN

Výroba elektrického rámu bicykla z uhlíkových vlákien je pomerne zložitý a precízny proces, ktorý zahŕňa viacero krokov od prípravy materiálu až po finálnu montáž. Tu je podrobný prehľad jednotlivých fáz tohto procesu:

2.1 Výber a príprava uhlíkových vlákien

Predimpregnované pásy alebo „prepreg“ sú uhlíkové vlákna, ktoré boli predtým impregnované epoxidovou živinou. Tento tvar zaručuje konzistentné nanášanie živice a vyššiu kvalitu konečného výrobku.

Rezanie predimpregnovaných pásov: pásy z uhlíkových vlákien sa presne narežú na požadované tvary a rozmery pomocou špecializovaných strojov alebo laserových rezačiek v súlade s výkresom rámu.

Aby sa zabezpečilo, že vrstvy sú uložené v správnom poradí a v správnom smere vlákien - orientácia je rozhodujúca pre pevnosť - každý komponent sa očísľuje a uloží [17-19].

Typy uhlíkových vlákien

Jednosmerné (Unidirectional – UD) vlákna

- Vlákna sú zarovnané v jednom smere.
- Používajú sa na vystuženie v presne určenom smere.

Výhody:

- Maximálna pevnosť v smere vlákien.
- Ideálne pre kontrolované zaťaženie (napr. dolná rámová trubka).

Nevýhody:

- Krehké mimo svojho smeru → musí sa vrstviť s inými smermi.

Tkané uhlíkové vlákna (Woven Fabric)

- Vlákna sú **pretkané** do vzoru – najčastejšie:
 - **Plain weave** (plátno)
 - **Twill weave** (keprová väzba – typický „karbónový vzhľad“)

Výhody:

- Lepšia rovnováha pevnosti vo viacerých smeroch.
- Estetický vzhľad (často sa necháva viditeľný pod lakom).
- Lepšia manipulácia a pokrytie kriviek.

Nevýhody:

- O niečo nižšia pevnosť ako UD v hlavnom smere.
- Zložitejšie vrstvenie.

Prepreg (predimpregované uhlíkové vlákna)

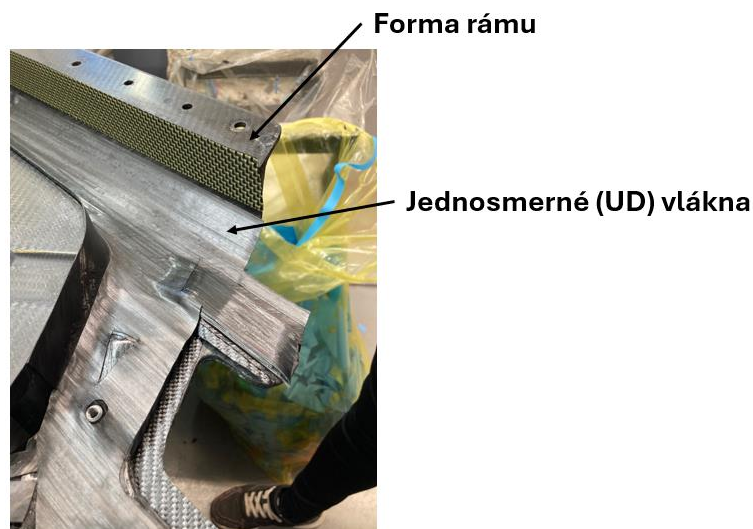
- Vlákna (UD alebo tkané) sú už napustené živinou v ideálnom pomere (napr. epoxidom)

Výhody:

- Konzistentná kvalita → ideálne pre high-end bicykle.
- Lepšia kontrola nad vytvrdzovaním a výsledkom.
- Čistý pracovný proces (žiadne ručné miešanie živíc).

Nevýhody:

- Nutnosť skladovania v chlade (-18 °C).
- Vyššia cena.
- Obmedzená doba použitia (expirácia).



Obr. 1. Forma rámu bicykla s nanášaním prvej vrstvy jednosmerných UD vlákien

2.2 Ukladanie vrstiev do formy

- **Formovanie do tvaru rámu:** Uhlíkové pásy sa ručne alebo poloaufomaticky ukladajú do kovovej formy (zvyčajne hliníková alebo oceľová), ktorá má tvar jednotlivých častí rámu (napr. hlavová trubka, dolná rámová trubka atď.).
- **Orientácia vlákien:** Vlákna sa ukladajú v rôznych smeroch (0° , 45° , 90°), aby sa zabezpečila pevnosť rámu vo všetkých smeroch.
- **Kritické miesta:** Do oblastí s vyšším namáhaním (napr. spoje) sa pridáva viac vrstiev alebo výstuží.

Druhy foriem

Existuje viacero typov foriem vo výrobe rámu z uhlíkových vlákien — určuje tvar, presnosť, pevnosť a náklady celého procesu.

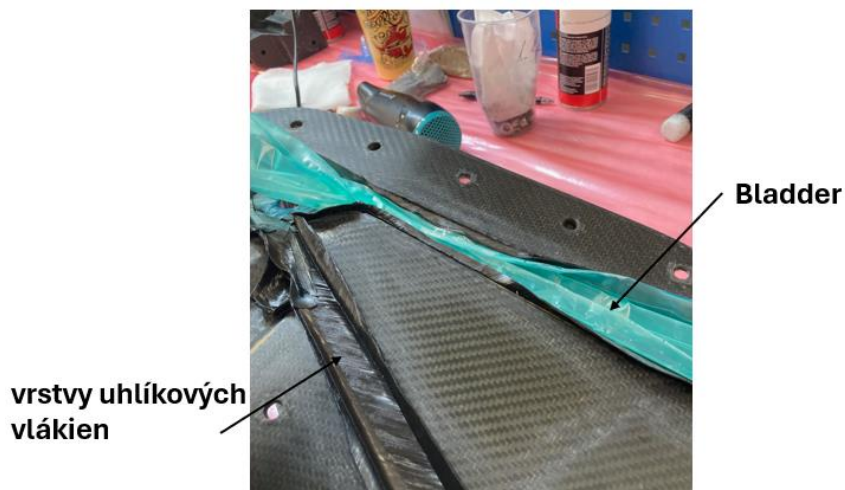
Zhrnutie:

Tabuľka 1 Porovnanie typov foriem na výrobu rámu elektrického bicykla

Typ formy	Presnosť	Trvácnosť	Cena	Zložitosť tvaru	Vhodné pre
Kovová	★★★★★	★★★★★	€€€€	★★★★	Profi výroba
Silikónová	★★	★	€	★★★★★	Prototypy
3D tlačaná	★★	★	€€	★★★★	Rýchle testovanie

2.3 Zatváranie formy a predlisovanie

- **Vnútrotný vak (bladder):** gumový vak sa umiestni do formy a potom sa nafúkne, aby sa vytvoril vnútorný tlak a odstránil prebytok živice a vzduchu.
- **Uzavretie formy:** forma sa utesní a zaistí [32].

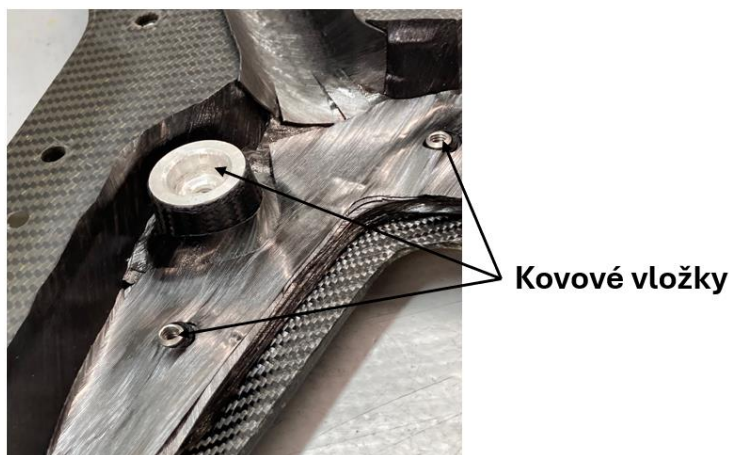


Obr. 2. Uloženie vrstiev uhlíkových vláken vo forme spolu s vakom (bladder)

Na obrázku č.2 je zobrazené uloženie viacerých vrstiev uhlíkových vláken vo forme rámu bicykla. Vlákná sú uložené v jednotlivých vrstvách, pričom každá vrstva je orientovaná v rôznych smeroch s výnimkou prvej vrstvy, ktorá je jednosmerná s nulovým uhlom. Súčasťou štruktúry je aj uložený vak (bladder), ktorý zabezpečuje správne formovanie rámu počas výroby.

2.4 Vytvrdzovanie v autokláve alebo peci

- Vytvrdzovanie: na umiestnenie formy sa používa buď klasická pec, alebo autokláv (tlaková pec). Na vytvrdnutie živice a dosiahnutie požadovaných vlastností materiálu sa teplota zvýši na približne 120 - 180 °C a tlak sa zvýši na 6 - 8 barov.
- V závislosti od použitej živice môže vytvrdzovanie trvať od jednej do štyroch hodín [33].



Obr. 3. Forma rámu bicykla s kovovými vložkami

Na obrázku č.3 je zobrazený pohľad zblízka na formu rámu bicykla z uhlíkových vláken. Vidíme početné vrstvy starostlivo umiestnených uhlíkových kompozitných vláken.

V strede formy sa nachádza kovová vložka, pravdepodobne vyrobená z ocele alebo hliníka. Slúži ako výstuha alebo vodidlo na vytvorenie presného otvoru v ráme (napríklad na uchytenie komponentov, ako je stredové zloženie, podložka alebo skrutky). Aby oblasť s otvorom zostala pevná, sú okolo tejto vložky umiestnené uhlíkové vlákna.

Tieto kovové komponenty sa často používajú pri výrobe karbónových rámov bicyklov, keď sa vyžaduje presnosť, pevnosť a príprava priestoru pre montážny hardvér. Celý systém je skonštruovaný tak, aby umožnil použitie týchto otvorov bez ďalšieho spracovania po zaschnutí kompozitu.

Forma rámu pozostáva z dvoch samostatných častí, ktoré sa po navrstvení uhlíkového materiálu spoja dokopy skrutkami. Následne sa celá forma vloží do autoklávu – tlakovej pece, kde sa za vysokého tlaku a teploty uskutoční finálne vytvrdnutie uhlíkového kompozitu. Po tomto procese sa forma rozmontuje a vyberie sa hotový rám.

2.5 Demontáž a opracovanie

- Otvorenie formy: rám sa vyberie z formy po vytvrdnutí.
- Prebytok sa odstráni odrezaním zvyškov uhlíkových vlákien, ktoré trčia z formy.
- Brúsenie a oprava povrchu: na hľadanie bublín, prasklín alebo iných nedostatkov sa povrch obrúsi. Prípadné nedostatky sa opravujú ručne [34].



Obr. 4. Finálny rám bicykla pred záverečným spracovaním

2.6 Lakovanie a dizajn

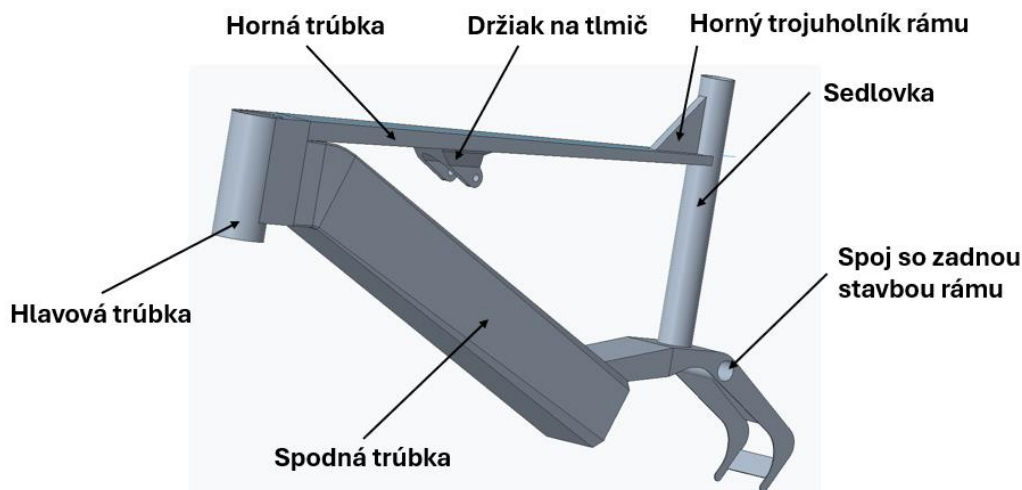
- Lakovanie: Lakovanie: na rám je možné naniesť číry alebo farebný lak. Kvôli ochrane aj estetike sa často nanáša niekoľko vrstiev.
- Dizajnové prvky: dekorácie, emblém značky a iné vizuálne prvky sa aplikujú buď pred lakovaním, alebo po ňom [35].

2.7 Záverečné testovanie a montáž bicykla

- Testovanie rámu: touto metódou sa zvyčajne kontroluje pevnosť, krútenie a únava materiálu.
- Konečná montáž: pridávajú sa diely vrátane riadidiel, bŕzd, kolies a vidlice [36].

3 TECHNICKÝ NÁVRH RÁMU ELEKTRICKÉHO BICYKLA

Táto kapitola predstavuje návrh rámu elektrického bicykla na mieru, ktorý bol vytvorený pomocou softvéru Creo Parametric. Tento model vychádza z návrhu rámu spoločnosti Kellys ako predloha, aby sa zachovali praktické proporcie a osvedčené konštrukčné prvky.

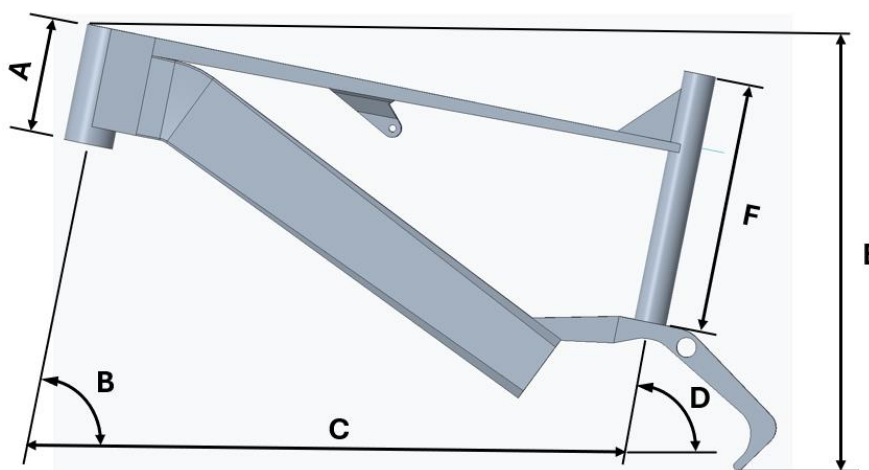


Obr. 5. 3D návrh rámu elektrického bicykla

Pod sedlovou trúbkou rámu sa nachádza konštrukčná časť obsahujúca dutý valcový prvok, ktorý je určený na pripojenie zadnej stavby rámu. Tento prvok tvorí neoddeliteľnú súčasť hlavnej rámovej štruktúry a zabezpečuje presné uloženie spojovacích komponentov.

3.1 Geometrické parametre rámu elektrického bicykla

Geometrické parametre rámu elektrického bicykla boli stanovené na základe referenčných rozmerov rámov určených pre štandardnú veľkosť postavy. Rozmery zohľadňujú požiadavky na montáž stredového elektromotora a sú navrhnuté tak, aby zabezpečili kompatibilitu s ďalšími konštrukčnými celkami elektrického bicykla.



Obr. 6. Technická dokumentácia rámu

Pre lepšiu prehľadnosť a ďalšie spracovanie sú hlavné rozmery rámu elektrického bicykla uvedené v nasledujúcej tabuľke č.2. Tabuľka sumarizuje jednotlivé parametre rámu získané z konštrukčného návrhu.

Tabuľka 2 Prehľad hlavných rozmerov rámu elektrického bicykla

Časti rámu	Rozmery [mm]
A – hlavová trúbka	130
B – uhol hlavovej trúbky	64.5°
C – horná rámová trúbka	650
D – uhol sedlovky	70°
E – celková výška rámu	438,5
F- sedlovka	280

3.2 Finalizácia výroby rámu elektrického bicykla

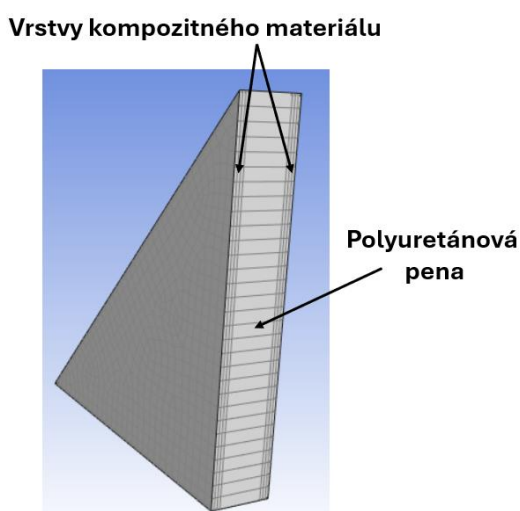
Rám elektrického bicykla má takzvanú monokokovú konštrukciu, čo znamená, že jednotlivé rúrky nie sú spojené, ale tvoria pevný, uzavretý tvar. Na výrobu týchto rámov sa používajú kompozitné materiály, najčastejšie uhlíkové vlákna s epoxidovou matricou.

Na začiatku výrobného procesu rámu sa pripraví viacdielna forma obsahujúca ľavú a pravú polovicu rámu alebo jednotlivé komponenty pre spodnú, sedlovú alebo hlavovú časť. Konečný tvar rámu vrátane jeho výstuh a prierezov zodpovedá vnútornej geometrii formy [42].

Vystužený kompozitný diel medzi hornou rámovou trúbkou a sedlovou trúbkou

Pri konštrukcii rámu elektrického bicykla z kompozitných materiálov je potrebné venovať osobitnú pozornosť oblastiam, ktoré sú častejšie vystavené mechanickému namáhaniu. Jedným z takýchto miest, kde často dochádza k veľkej koncentrácii namáhania pri prenose síl od jazdca, pohonného systému alebo namontovaných komponentov, je spojenie hornej rámovej rúrky a sedlovej rúrky. Preto má konštrukcia rámu ako samostatný spevňujúci prvok kompozitnú vložku v tvare trojuholníka.

Na obrázku č. 7. môžeme vidieť trojuholníkovú štruktúru vystuženého prvku rámu bicykla. Vnútorňa časť rámu obsahuje polyuretánovú penu, zatiaľ čo výstužný prvok sa skladá z kompozitného materiálu, zvyčajne z uhlíkových vlákien s epoxidovou živicom bisfenol F.



Obr. 7. Štruktúra výstužného prvku z kompozitu a polyuretánovej peny

Syntetické polyméry nazývané polyuretánové peny alebo PU peny vznikajú chemickou kombináciou izokyanátov a polyolov. V závislosti od presného zloženia môže byť konečným produktom materiál, ktorý je mäkký, tvrdý, pružný alebo extrémne pevný. Vďaka svojim fyzikálnym vlastnostiam, najmä nízkej hmotnosti, tlmiacim schopnostiam a odolnosti proti oderu, nachádzajú polyuretánové peny široké využitie v strojárstve.

Typy polyuretánovej peny

- Mäkké (pružné) peny, napríklad tie, ktoré sa používajú na zníženie hluku a vibrácií.
- Tvrdé (tuhé) peny, ako sú peny používané na izoláciu.
- Elastoméry – s vysokou hustotou sú pružnejšie ako guma.

3.3 Dostatočné spevnenie rámu výstužným prvkom

Na zlepšenie príľnavosti sa kontaktné plochy rámu a trojuholníka po vybratí rámu z hlavnej formy mechanicky očistia a zdrsnia. Na prilepenie výstužného trojuholníka na miesto sa potom použije štruktúrne lepidlo, zvyčajne epoxidové. Vytvorí sa tuhá trojuholníková výstuž medzi sedlovou trúbkou a hornou rámovou trúbkou.

Aby sa zaručila optimálna pevnosť spoja, spoj sa utesní a potom sa nechá vytvrdnúť pri regulovanej teplote (napríklad v peci nastavenej na 60 - 80 °C počas niekoľkých hodín). Potom sa na celý rám aplikuje konečná povrchová úprava a kontrola presnosti rozmerov [46-49].

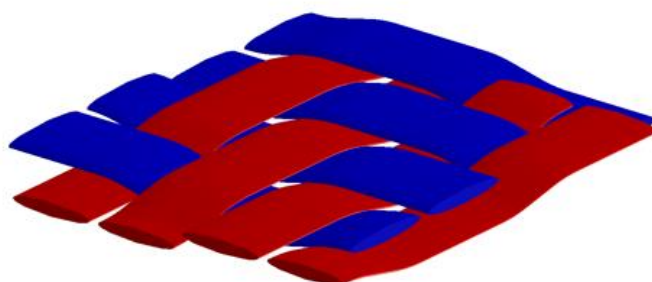
4 DATABÁZA MATERIÁLOVÝCH VLASTNOSTÍ KOMPOZITOV

V tejto kapitole je uvedená databáza určitých kompozitných materiálov, ktoré boli podrobené analýze mechanických vlastností. Kompozity vystužené uhlíkovými vláknami, ktoré sú jednou z najčastejšie používaných výstuh v aplikáciách vyžadujúcich vysoké požiadavky na pevnosť a hmotnosť, sú hlavným predmetom tejto štúdie. V nasledujúcich častiach sú uvedené štyri druhy uhlíkových vlákien a epoxidová živica, ktorá slúži ako matrica pri tvorbe kompozitov.

4.1 Materiál GG204T – predimpregovaný materiál

Vysokopevnostné uhlíkové vlákno GG204T je vhodné pre aplikácie, ktoré vyžadujú flexibilitu a zároveň vynikajúcu nosnosť, pretože je kompromisom medzi pevnosťou a modulom. Zaručuje vysokokvalitnú väzbu medzi vláknom a matricou vďaka jemnej väzbe a vynikajúcej kompatibilite s epoxidovými živcami. Pomer hmotnosti a pevnosti sa zdôrazňuje v športovom a automobilovom priemysle, kde sa tento materiál často využíva [50].

Engineering constants	
	Value
E11	60999
E22	60999
E33	13268
nu12	0.065387
nu21	0.065387
nu13	0.47796
nu31	0.10396
nu23	0.47796
nu32	0.10396
G12	5678.8
G13	4403.6
G23	4403.6
Theta Angle 1	90
Phi Angle 1	0
Theta Angle 2	90
Phi Angle 2	90
Theta Angle 3	0
Phi Angle 3	90
Global density	1.4688

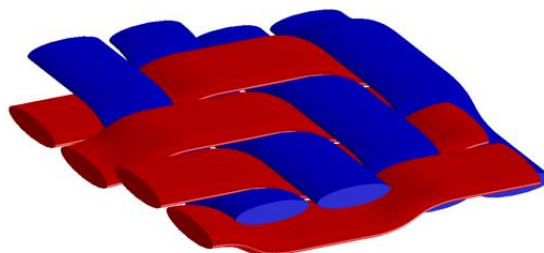


Obr. 8. Technické hodnoty a tkaná vizualizácia materiálu GG204T

4.2 Materiál GG285T2

Uhlíková tkanina GG285T2 s vyššou základnou hmotnosťou (približne 285 g/m²) je spoľahlivou voľbou pre aplikácie, ktoré si vyžadujú silnú tuhosť aj zvýšenú pevnosť. Tkanina s keprovou väzbou 2x2 poskytuje pozoruhodnú poddajnosť na výrobu zložitých geometrických tvarov bez vzniku záhybov. Jej štruktúra umožňuje jednoduchú impregnáciu epoxidovou živicom pri zachovaní vynikajúcej kvality laminátu. Medzi aplikácie tohto materiálu, ktoré uprednostňujú mechanickú odolnosť a výkon, patrí motoristický šport, lietadlá a športové vybavenie [51].

Engineering constants	
	Value
E11	72208
E22	72208
E33	19605
nu12	0.081794
nu21	0.081794
nu13	0.49558
nu31	0.13455
nu23	0.49558
nu32	0.13455
G12	10421
G13	7594.9
G23	7594.9
Theta Angle 1	90
Phi Angle 1	0
Theta Angle 2	90
Phi Angle 2	90
Theta Angle 3	0
Phi Angle 3	90
Global density	1.5959

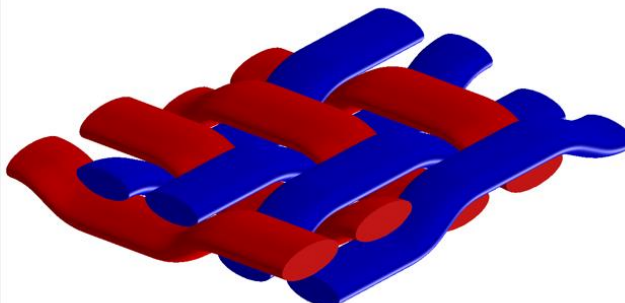


Obr. 9. Technické hodnoty a tkaná vizualizácia materiálu GG285T2

4.3 Materiál GG300T

S plošnou hmotnosťou približne 300 g/m² patrí uhlíková tkanina GG300T k ťažším typom tkanín, ktoré sú vhodné na aplikácie vyžadujúce väčšiu pevnosť, tuhosť a rozloženie. Jej 2x2 keprová väzba z 3K uhlíkových vlákien ponúka okrem vysokej pružnosti aj vizuálne atraktívny laminátový povrch. Vďaka zvýšenej hustote vlákien GG300T možno vyrobiť lamináty, ktoré sú odolnejšie voči namáhaniu v konštrukčných prvkoch. Tento materiál sa často využíva v priemyselných odvetviach vrátane výroby priemyselných komponentov, častí karosérií dronov a častí karosérií pretekárskych vozidiel. V kombinácii s epoxidovou živicom vytvára pevný, rovnomerný spoj, ktorý zabezpečuje stabilitu hotového kompozitu [50].

Engineering constants	
	Value
E11	55429
E22	55429
E33	14049
nu12	0.047418
nu21	0.047418
nu13	0.48925
nu31	0.124
nu23	0.48925
nu32	0.124
G12	6477.8
G13	6857.6
G23	6857.6
Theta Angle 1	90
Phi Angle 1	0
Theta Angle 2	90
Phi Angle 2	90
Theta Angle 3	0
Phi Angle 3	90
Global density	1.5478

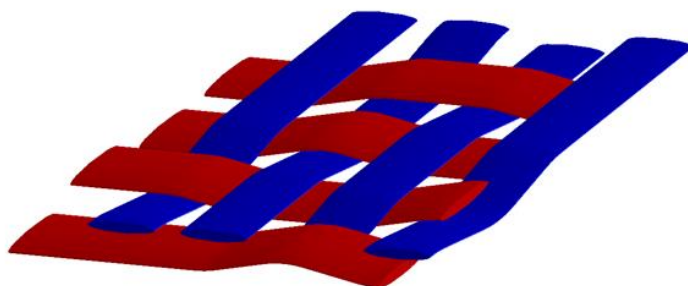


Obr. 10. Technické hodnoty a tkaná vizualizácia materiálu GG300T

4.4 Materiál GG630T – predimpregovaný materiál

S plošnou hmotnosťou približne 630 g/m² je GG630T ťažká uhlíková tkanina, ktorá je spoľahlivým materiálom pre kompozitné aplikácie, ktoré sú vystavené vysokému namáhaniu. Dokonca aj pri tejto hustote existuje určitá flexibilita laminovania, pretože je vyrobená z ťažších 12K uhlíkových vlákien s 2x2 keprovou väzbou. Keď je potrebná výnimočná pevnosť, tuhosť a odolnosť proti poškodeniu, napríklad pri výrobe konštrukčných panelov, rámov alebo výstuže pre veľmi zaťažované konštrukcie, GG630T sa využíva vďaka svojej vysokej hmotnosti a hustote vlákien. Výsledkom je kompozit s vynikajúcou nosnosťou a dlhodobou životnosťou v spojení s epoxidovou matricou [52].

Engineering constants	
	Value
E11	31906
E22	31906
E33	7624.6
nu12	0.063554
nu21	0.063554
nu13	0.50336
nu31	0.12029
nu23	0.50336
nu32	0.12029
G12	2616.8
G13	2497.4
G23	2497.4
Theta Angle 1	90
Phi Angle 1	0
Theta Angle 2	90
Phi Angle 2	90
Theta Angle 3	0
Phi Angle 3	90
Global density	1.3398



Obr. 11. Technické hodnoty a tkaná vizualizácia materiálu GG630T

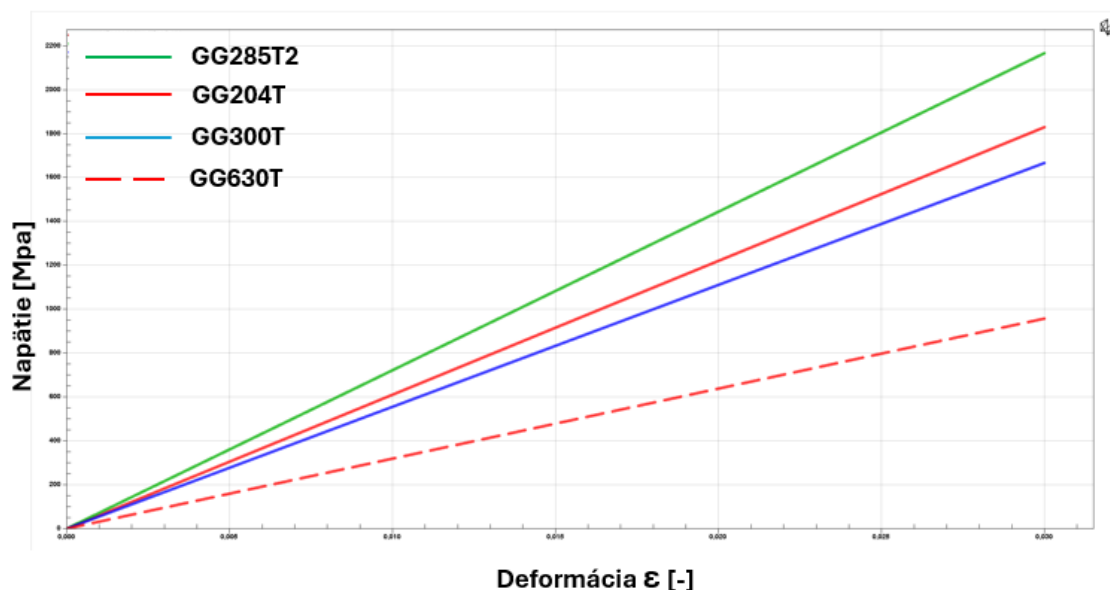
4.5 Epoxidová živica Bisfenol F

Všetky štyri uvedené uhlíkové vlákna (GG204T, GG285T2, GG300T a GG630T) boli použité v kombinácii s epoxidovou živcou typu Bisfenol F.

Táto živica je známa svojimi vynikajúcimi mechanickými vlastnosťami, ako je vysoký modul a pevnosť, ktoré poskytujú vynikajúcu odolnosť voči korózii a mechanickému namáhaniu. V kompozitoch vystužených uhlíkovými vláknami sa živica bisfenol F často používa v aplikáciách vrátane športových, automobilových a leteckých technológií, ktoré si vyžadujú kombináciu vysokého výkonu a nízkej hmotnosti [53].

Výsledky simulácie hodnôt kompozitných materiálov s epoxidovou živcou Bisfenol F

Graf znázorňuje vzťah medzi napätím a deformáciou pre štyri rôzne materiály označené ako GG285T2, GG204T, GG300T a GG630T. Tieto materiály sú vytvorené s použitím epoxidovej živice na báze Bisfenolu F, ktorá plní funkciu matricového spojiva a významne ovplyvňuje ich mechanické vlastnosti. Na vodorovnej osi sa nachádza deformácia (bezrozmerná veličina), ktorá predstavuje relatívnu zmenu dĺžky pri zaťažení, a na zvislej osi je zobrazené napätie v jednotkách MPa.



Obr. 12. Graf kriviek kompozitných materiálov

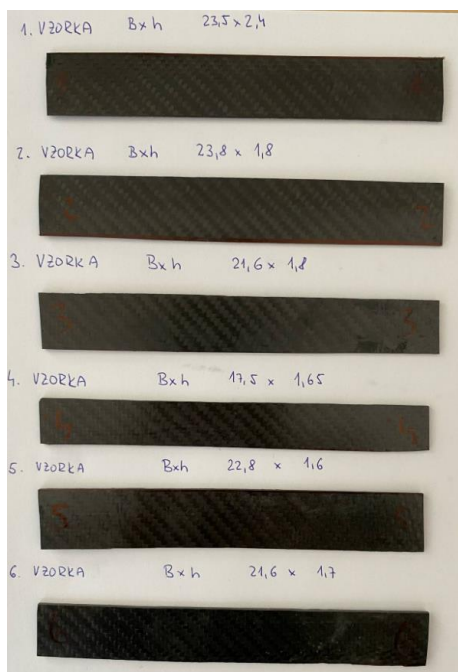
Každá z kriviek v grafe reprezentuje odozvu konkrétneho materiálu pri zaťažení:

- GG285T2 (zelená plná čiara) – Materiál s najvyšším napätím pri danej deformačii. Pri deformačii 0.030 dosahuje napätie približne 2200 MPa. Vykazuje najvyššiu tuhosť a je vhodný pre aplikácie vyžadujúce odolnosť voči vysokému zaťaženiu.
- GG204T (červená plná čiara) – Má mierne nižšiu pevnosť ako GG285T2, dosahuje okolo 1900 MPa pri rovnakej deformačii. Jeho mechanické správanie je stále veľmi dobré a vyrovnané.
- GG300T (modrá plná čiara) – Pri deformačii 0.030 vykazuje napätie približne 1750 MPa, čo ho radí medzi materiály so strednou pevnosťou v tejto skupine.
- GG630T (červená prerušovaná čiara) – Tento materiál má najnižšiu pevnosť, s napätím okolo 1100 MPa pri deformačii 0.030. Má výrazne nižšiu tuhosť a je náchylnejší na deformačiu.

Všetky krivky vykazujú takmer lineárne správanie, čo naznačuje, že v tomto rozsahu deformačii sa materiály správajú elasticky – to znamená, že sa po odľahčení vrátia do pôvodného tvaru. Takéto správanie je typické pre kvalitné epoxidové systémy, akým je aj živica Bisfenol F, známa svojou vysokou chemickou odolnosťou, nízkym zmršťovaním a stabilitou za mechanického zaťaženia.

5 TESTOVANIE VZORIEK KOMPOZITOV

V tejto kapitole sú prezentované vzorky kompozitných materiálov, ktoré boli odrezané z rámu elektrického bicykla. Každá vzorka má dĺžku 150 mm a rôznu hrúbku a šírku, čo umožňuje testovanie v rôznych podmienkach zaťaženia. Rozdielna hrúbka vzoriek je dôležitá pre hodnotenie ich mechanických vlastností, ako je pevnosť a pružnosť, pri rôznych hrúbkach materiálu. Testovanie týchto vzoriek poskytuje informácie o správaní kompozitu v reálnych aplikáciách. Na obrázku sú zobrazené jednotlivé vzorky pripravené na ďalšie experimentálne skúšky.

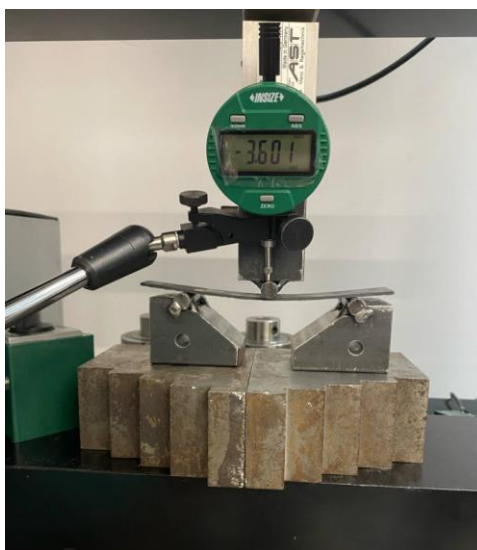


Obr. 13. Testované kompozitné vzorky

V súlade s platnou technickou normou sa vzorky podrobili mechanickej skúške ohybom metódou trojbodového ohybu. Ide o štandardizovanú metódu na hodnotenie mechanického správania kompozitných materiálov pri namáhaní ohybom. Zaťažovací trť pôsobil silou kolmo zhora na stred vzorky, zatiaľ čo každá vzorka bola umiestnená na dvoch podporných valcoch vzdialených od seba 100 mm. Pevnosť v ohybe a modul pružnosti v ohybe sa môžu vypočítať vďaka kombinácii ťahových a tlakových napätí, ktoré vznikli pri tejto konfigurácii.

Počas skúšky sme na monitore v reálnom čase sledovali veľkosť pôsobiacej sily, ktorú vyvíjala testovacia hlava na vzorku. Paralelne s tým bol zaznamenávaný aj priehyb vzorky v strede jej rozpätia, a to pomocou odchýlkomera (hodinkového indikátora), ktorý slúžil ako presný indikátor vertikálnej deformácie. Získané hodnoty boli priebežne zaznamenávané a slúžili ako základ pre výpočet ohybových charakteristík.

Rôzne hrúbky skúmaných vzoriek umožnili preskúmať vplyv geometrických vlastností na celkovú odolnosť materiálu voči zaťaženiu, priehyb a rozloženie napätia. Od výsledkov týchto skúšok závisí hodnotenie konštrukcie a optimalizácia kompozitných dielov, ako sú rámy bicyklov, ktoré musia spĺňať špecifikácie nízkej hmotnosti, vysokej tuhosti a mechanickej spoľahlivosti.



Obr. 14. Skúška trojbodovým ohybom

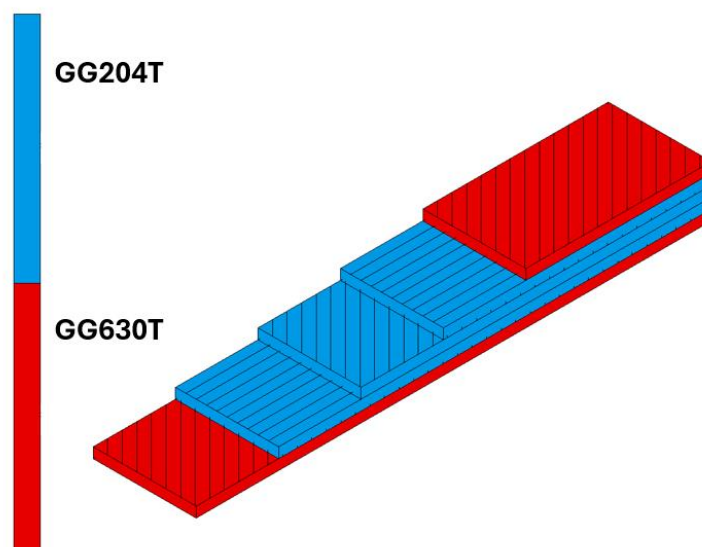
Skúšanie vzoriek prebiehalo metódou trojbodového ohybu, pričom vzorky boli zaťažované v krokoch po 0,2 mm. Pre prehľadnosť sú však v nasledujúcej tabuľke uvedené len vybrané hodnoty zodpovedajúce každému celému milimetru priehybu. Počas skúšky bola zaznamenávaná sila potrebná na deformáciu vzorky, a to v jednotkách Newton (N). Namerané hodnoty sú uvedené v nasledujúcej tabuľke.

Tabuľka 3 Namerané hodnoty síl pri trojbodovej ohybovej skúške

Vzorka	Priehyb 1 mm	Priehyb 2 mm	Priehyb 3 mm	Priehyb 4 mm
1. Vzorka	36N	73N	112N	149N
2. Vzorka	19N	41N	66N	90N
3. Vzorka	19N	40N	60N	82N
4. Vzorka	15N	30N	45N	59N
5. Vzorka	14N	34N	52N	72N
6. Vzorka	14N	30N	47N	65N

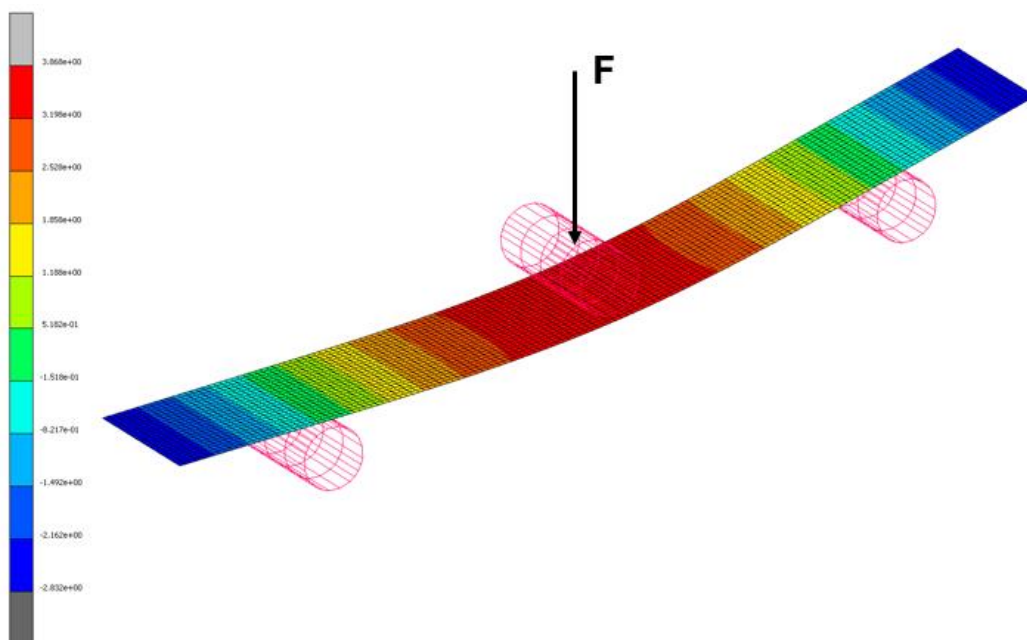
5.1 Numerická simulácia skúšky trojbodového ohybu

Toto experimentálne skúšanie metódou trojbodového ohybu je potrebné overiť aj pomocou numerickej simulácie. Pri simulácii bola každá vzorka samostatne namodelovaná na základe stredových rozmerov jej šírky a hrúbky. Zároveň boli pre jednotlivé modely zadané príslušné materiálové parametre s cieľom dosiahnuť porovnateľné výsledky s experimentálnym meraním.



Obr. 15. Model vrstvej kompozitnej vzorky: GG204T a GG630T

Na obrázku č.15. je znázornený model vrstvej kompozitnej vzorky, pozostávajúci z predimpregovaných materiálov GG204T a GG630T. Usporiadanie výstužných vlákien v jednotlivých vrstvách bolo zvolené nasledovne: 45°, 0°, 45°, 0°, 45°. Uvedené usporiadanie je optimalizované pre efektívny prenos zaťaženia a zlepšenie celkového mechanického správania sa kompozitnej štruktúry. Na účely porovnania experimentálnych výsledkov bola realizovaná numerická simulácia v softvéri MSC Marc.



Obr. 16. Simulovaný priebeh deformácie pri trojbodovom ohybe kompozitnej vzorky

Na obrázku č.16. sú znázornené výsledky numerickej simulácie trojbodového ohybu kompozitnej vzorky č. 1, zloženej z materiálov GG240T a GG630T, ktoré boli spojené epoxidovou živickou typu bisfenol F. Simulácia bola realizovaná v softvéri MSC Marc za účelom porovnania výpočtových výsledkov s údajmi z experimentálneho merania.

V nasledujúcom odseku je uvedená tabuľka porovnávajúca výsledky experimentálneho skúšania trojbodovým ohybom a numerickej simulácie pre každú jednotlivú vzorku. Tabuľka obsahuje konečné hodnoty zaťažovacej sily (v Newtonoch), ktoré boli namerané počas experimentu, a zodpovedajúce výsledky deformácie zo simulácie, vypočítané pri tejto konečnej sile. Týmto spôsobom je možné priamo porovnať experimentálne a numerické údaje a vyhodnotiť presnosť simulácie.

Tabuľka 4 Výsledky merania síl a simulovaných deformácií rámu elektrického bicykla

Vzorka č.	Nameraná sila (N)	Deformácia zo simulácie (mm)
1	149	3.87
2	90	3.91
3	82	4.12
4	59	4.19
5	72	4.06
6	65	3.92

Odchýlky medzi experimentálnymi a simulačnými výsledkami

Rozdiely medzi hodnotami získanými z numerickej simulácie a reálnymi výsledkami experimentu sú prirodzené a do určitej miery očakávané. Tieto odchýlky môžu vzniknúť v dôsledku viacerých faktorov:

Odchýlky medzi experimentálnymi a simulačnými výsledkami

- **Zjednodušenia v numerickom modeli:** v simulácii sa predpokladajú ideálne podmienky – presná geometria, homogénne materiálové vlastnosti a dokonale definované okrajové podmienky, čo sa v skutočnom experimente len ťažko dosiahne.
- **Výrobná variabilita vzoriek:** vzorky môžu mať malé rozdiely v rozmeroch, ako je šírka, hrúbka či dokonca celková dĺžka. Napríklad aj menšia odchýlka od nominálnej dĺžky 150 mm môže mať vplyv na priebeh deformácie a reakciu vzorky pri zaťažení.
- **Nepresné umiestnenie zaťaženia:** v simulácii je zaťažovací prvok umiestnený presne do stredu rozpätia medzi podperami, čo zabezpečuje ideálne podmienky trojbodového ohybu.
- **Chyba merania a prístrojové obmedzenia:** aj samotné meranie priehybu a sily v laboratórnych podmienkach môže byť ovplyvnené presnosťou meracích zariadení a ľudským faktorom.

Tieto faktory spolu vytvárajú priestor pre určitú odchýlku, ktorá však zvyčajne ostáva v akceptovateľných toleranciách. Preto sa považuje za bežnú súčasť porovnávania experimentálnych a numerických výsledkov.

6 SIMULAČNÁ ANALÝZA KOMPOZITNÉHO RÁMU ELEKTRICKÉHO BICYKLA V PROGRAME ANSYS WORKBENCH

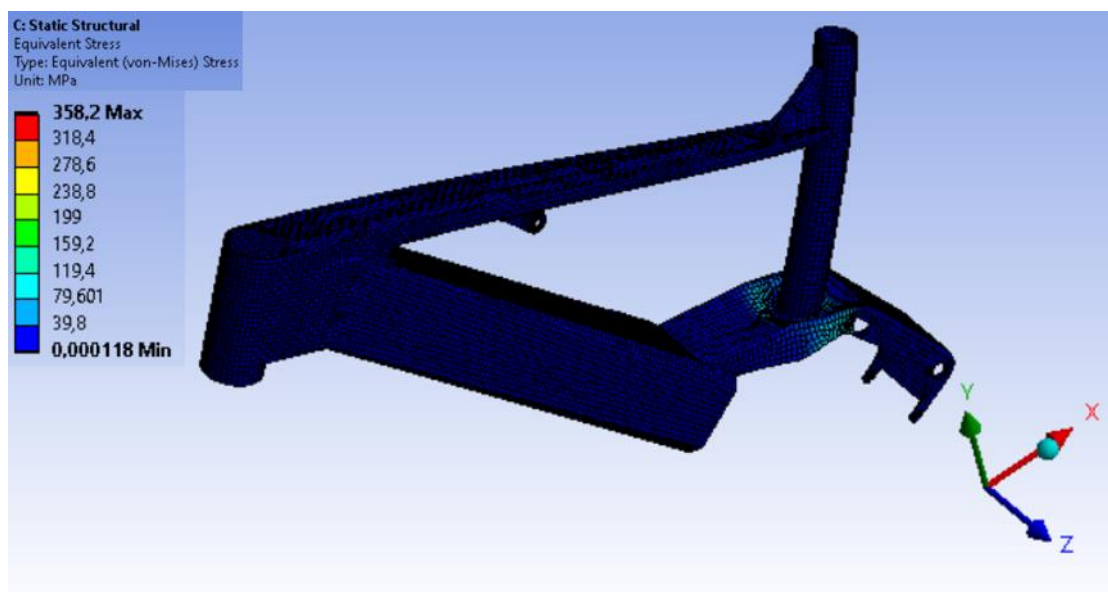
Cieľom tejto kapitoly je reálne potvrdiť mechanické vlastnosti rámu elektrického bicykla z kompozitného materiálu. Na tento účel sa použil softvér ANSYS Workbench na vytvorenie simulačnej analýzy, ktorá sledovala napätia a deformácie pri bežnom prevádzkovom zaťažení. Simulácia sa zameriava na dve najdôležitejšie časti rámu - stredovú časť rámu, na ktorú pôsobia striedavé sily počas pedálovania a sedlovú trubku, na ktorú pôsobia sily od hmotnosti jazdca.

6.1 Skúška pevnosti rámu sedlovej trubky v programe Ansys Workbench

Sedlová trubka je jedným zo základných prvkov rámu, aby sa sily počas jazdy rozkladali smerom od jazdca.. Preto je na vyhodnotenie odolnosti a bezpečnosti celého systému rámu potrebná skúška pevnosti v tejto časti rámu.

Pevnostná oblasť napätia sedlovej trubky:

- Typ zaťaženia: skôr statické alebo vibráciami vyvolané napätie (napr. od jazdca alebo rámových deformácií).
- Dovoľené napätie (s bezpečnostným faktorom): 300 – 400 MPa [67].



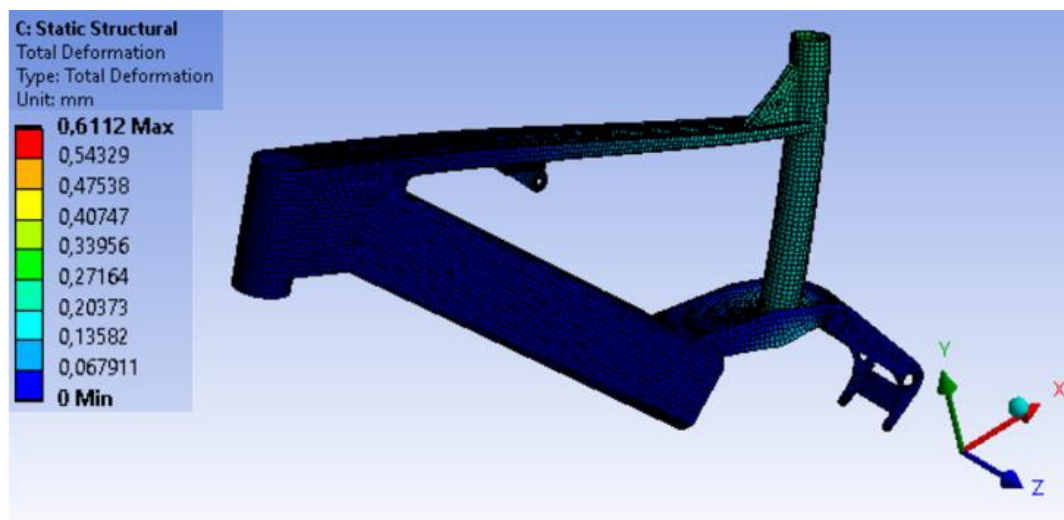
Obr. 17. Ekvivalentné napätie v sedlovej časti rámu bicykla pri pôsobení vertikálneho zaťaženia

S dôrazom na sedlovú trubku je na obrázku č.17. zobrazené rozloženie ekvivalentného napätia v oblasti rámu bicykla na základe von Mises kritéria. Zistenia vychádzajú zo statickej skúšky, pri ktorej bol rám vystavený sile 2000 N. Maximálna hodnota napätia modelu je 358,2 MPa, čo znamená, že pre tento druh zaťaženia je prijateľný rozsah 300 – 400 MPa.

Analýza celkovej deformácie rámu v oblasti sedlovej trubky

V tejto časti sa skúma celková deformácia rámu bicykla. Cieľom tejto analýzy je vyhodnotiť celkovú zmenu tvaru konštrukcie rámu a rýchlosť deformácie pri typickom zaťažení, ktoré kopíruje hmotnosť jazdca. Celková deformácia, ktorá sa meria v milimetroch, je výsledný vektorový pohyb každého jednotlivého bodu konštrukcie v dôsledku pôsobiaceho zaťaženia.

- Typická maximálna lineárna deformácia v tejto oblasti sa pohybuje v rozsahu: 0,3 mm až 1,2 mm (pri zaťažení zodpovedajúcom hmotnosti jazdca alebo normovanej skúške, a to silou 1500–2000 N) [68].



Obr. 18. Analýza celkovej deformácie rámovej konštrukcie bicykla sedlovej trubky pri statickom zaťažení

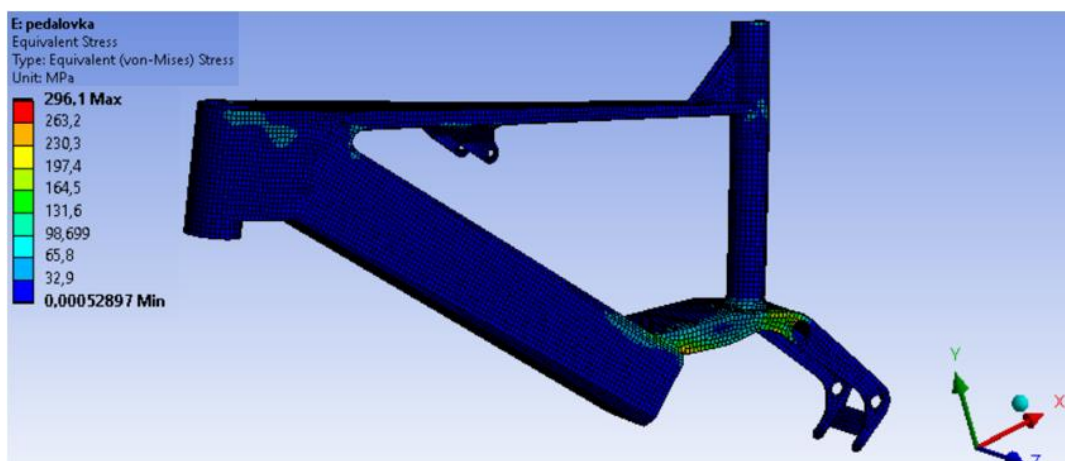
Na obrázku č.18. je znázornená celková deformácia rámu bicykla pri statickom zaťažení 2000 N. Na tomto obrázku, ktorý je uvedený v milimetroch (mm), je znázornené posunutie, ktoré vyplýva z jednotlivých bodov konštrukcie v priestore. Maximálny priehyb bol 0,611 mm, čo je v rámci prípustného rozsahu 0,3 – 1,2 mm, ktorý udáva platná norma pre túto triedu rámových systémov. Výsledok potvrdzuje dostatočnú tuhosť rámu a jeho schopnosť trvale odolávať zaťaženiu bez toho, aby došlo k neprimeranej deformácii.

6.2 Skúška pevnosti rámu únavy pedálovými silami v programe Ansys Workbench

Jedným z najdôležitejších opakujúcich sa zdrojov zaťaženia rámu počas jazdy sú sily pôsobiace na pedále. Sily pôsobia cyklicky pri každom zošliapnutí pedálov a prostredníctvom kľuky sa prenášajú na nosnú a stredovú konštrukciu rámu. Dlhodobé pôsobenie týchto opakujúcich sa tlakov môže spôsobiť únavové poškodenie rámu, najmä v miestach s vyššou koncentráciou napätia. Analýza sa zameriava najmä na identifikáciu kritických miest, kde môže dôjsť k poškodeniu v dôsledku dlhodobej prevádzky.

Pedálová skúška (oblasť stredového zloženia):

- Typ zaťaženia: dynamické cyklické zaťaženie (striedavé sily na pedále, 1500 až 1800 N).
- Typický rozsah výsledného napätia v stredovej oblasti (CFRP): 200 – 400 MPa [69].

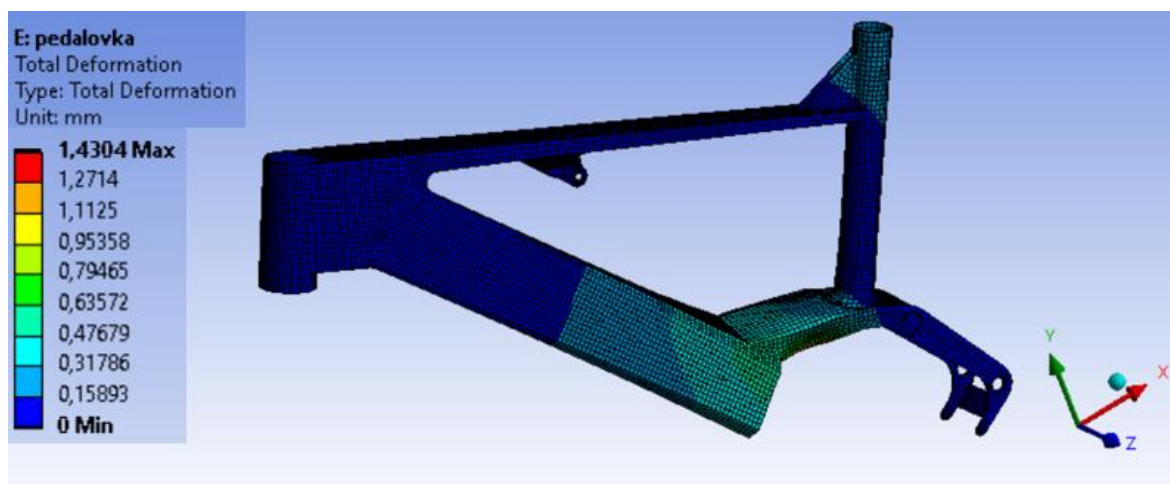


Obr. 19. Rozloženie ekvivalentného napätia v ráme bicykla pri zaťažení pedálovou silou

S dôrazom na oblasť rámu v mieste pôsobenia pedálovej sily je na obrázku č. 19. zobrazené rozloženie ekvivalentného napätia podľa von Mises kritéria. Zistenia vychádzajú zo statickej analýzy, pri ktorej bol rám zaťažený silou 1800 N pôsobiace v smere pedálovej sily. Maximálna hodnota napätia v modeli dosiahla 296,1 MPa, čo spadá do akceptovateľného rozsahu 200 – 400 MPa.

Celková deformácia rámu spôsobená silou v pedálovej oblasti

V tejto časti sa analyzuje celková deformácia rámu bicykla spôsobená silou pôsobiace v oblasti pedálov. Cieľom tohto výskumu je posúdiť, ako rám reaguje na simulované zaťaženie, ktoré predstavuje silu, ktorú jazdec prenáša pri pedálovaní. typická maximálna lineárna deformácia rámu bicykla v oblasti pôsobenia pedálovej sily (najmä v okolí stredového zloženia a dolnej rámovej trubky) pri zaťažení v rozsahu 1500 – 1800 N pohybuje približne v intervale 1,0 – 2,0 mm [68].



Obr. 20. Analýza celkovej deformácie rámovej konštrukcie bicykla pedálovej sily pri statickom zaťažení

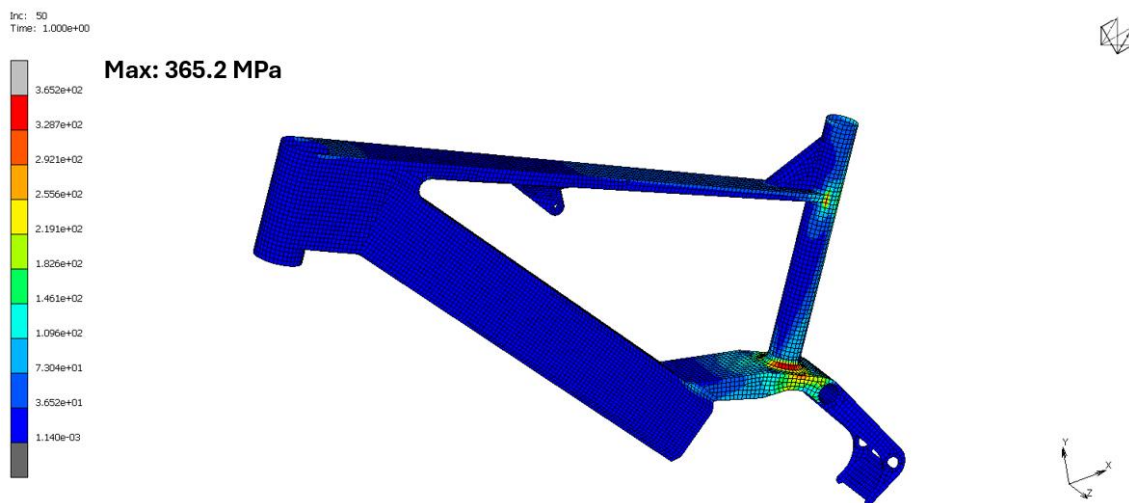
Na obrázku č. 20. je znázornená celková deformácia rámu bicykla v oblasti pedálovej jednotky (stredového zloženia) pri statickom zaťažení 1800 N. Výsledky simulácie zobrazené v milimetroch (mm) zobrazujú rozloženie posunutia jednotlivých bodov konštrukcie rámu v priestore. Najvyššia zaznamenaná deformácia predstavuje hodnotu 1,4304 mm, čo je v súlade s očakávaným rozsahom 1,0 – 2,0 mm pre túto kategóriu rámových systémov. Výsledky poukazujú na dostatočnú tuhosť rámu v oblasti pedálového zaťaženia a potvrdzujú, že konštrukcia odoláva vysokému zaťaženiu bez vzniku nadmerných deformácií.

7 SIMULAČNÁ ANALÝZA KOMPOZITNÉHO RÁMU ELEKTRICKÉHO BICYKLA V PROGRAME MARC MENTAT

Cieľom tejto kapitoly je overiť mechanické správanie rámu elektrického bicykla z kompozitného materiálu pomocou pokročilého simulačného prostredia MSC Marc Mentat. Tento softvér umožňuje detailnú nelineárnu analýzu, ktorá je vhodná najmä pre kompozitné materiály vystavené zložitým zaťaženiám. Vytvorená simulačná štúdia sa zameriava na kľúčové časti rámu – najmä oblasť stredového zloženia, kde pôsobia cyklické sily počas šliapania a sedlovú trúbku, ktorá prenáša zaťaženie od hmotnosti jazdca.

7.1 Skúška pevnosti rámu sedlovej trúbky v programe Marc Mentat

V tejto časti sa na analýzu sedlovej trúbky rámu používa softvér Marc Mentat, ktorý umožňuje posúdenie nelineárnych stavov napätia a deformácie pri zaťažení od hmotnosti jazdca. Cieľom je overiť pevnosť a spoľahlivosť tohto komponentu rámu pri zaťažení.

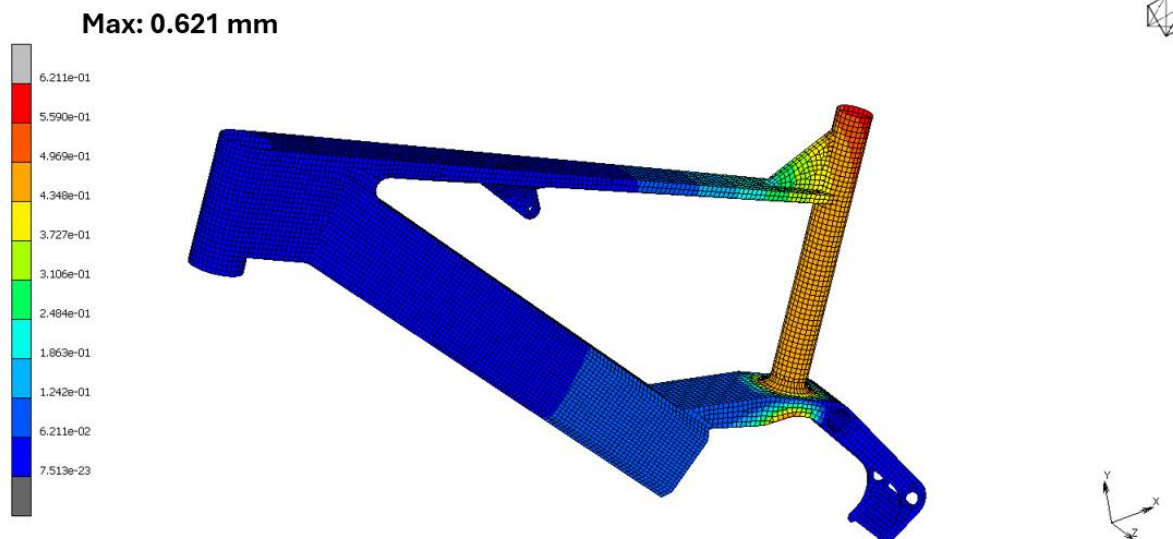


Obr. 21. Ekvivalentné napätie v sedlovej časti rámu bicykla pri pôsobení vertikálneho zaťaženia

S dôrazom na sedlovú trúbku je na obrázku č. 21. zobrazené rozloženie ekvivalentného napätia v oblasti rámu bicykla, vypočítané podľa von Mises kritéria v prostredí Marc Mentat. Výsledky vychádzajú zo statickej skúšky, pri ktorej bol rám zaťažený silou 2000 N. Maximálna hodnota napätia dosiahla 365,2 MPa, čo spadá do technicky prijateľného rozsahu 300 – 400 MPa.

Analýza celkovej deformácie rámu v oblasti sedlovej trúbky

V tejto časti sa analyzuje celková deformácia rámu bicykla v oblasti sedlovej trúbky s využitím simulačného softvéru Marc Mentat. Cieľom je presne určiť zmenu tvaru konštrukcie v dôsledku pôsobenia zaťaženia simulujúceho hmotnosť jazdca. Výsledkom je distribúcia posunutí v jednotlivých bodoch rámu, kde najväčšiu deformáciu zvyčajne vykazujú oblasti s menšou lokálnou tuhosťou a väčšou vzdialenosťou od upevnených bodov.

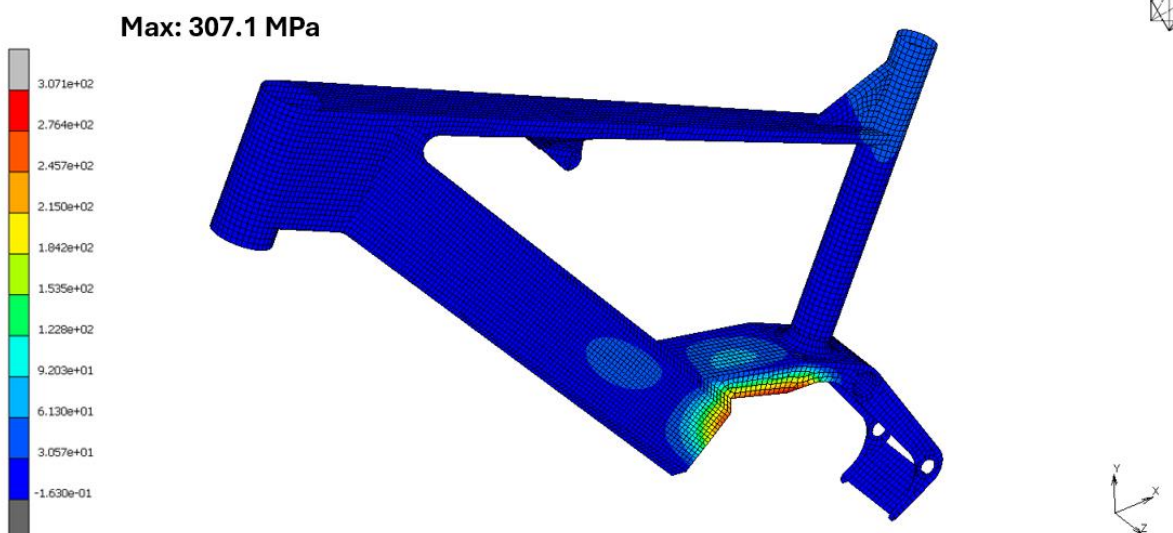


Obr. 22. Analýza celkovej deformácie rámovej konštrukcie bicykla sedlovej trúbky pri statickom zaťažení

Na obrázku č. 22. je zobrazená celková deformácia rámu bicykla pri statickom zaťažení 2000 N, spracovaná v simulačnom prostredí Marc Mentat. Vizualizácia, vyjadrená v milimetroch (mm), znázorňuje priestorové posunutie jednotlivých bodov konštrukcie v dôsledku pôsobiacej sily. Maximálny priehyb rámu dosiahol hodnotu 0,621 mm, čo sa nachádza v rámci technického rozsahu 0,3 – 1,2 mm stanoveného pre túto triedu rámových systémov.

7.2 Skúška pevnosti rámu únavy pedálovými silami v programe Marc Mentat

Jedným z kľúčových zdrojov opakovaného mechanického zaťaženia rámu počas prevádzky bicykla sú cyklicky pôsobiace pedálové sily. Tieto sily sa pri každom zošliapnutí prenášajú cez kľukový mechanizmus do oblastí stredového zloženia, čím zaťažujú nosnú konštrukciu rámu.

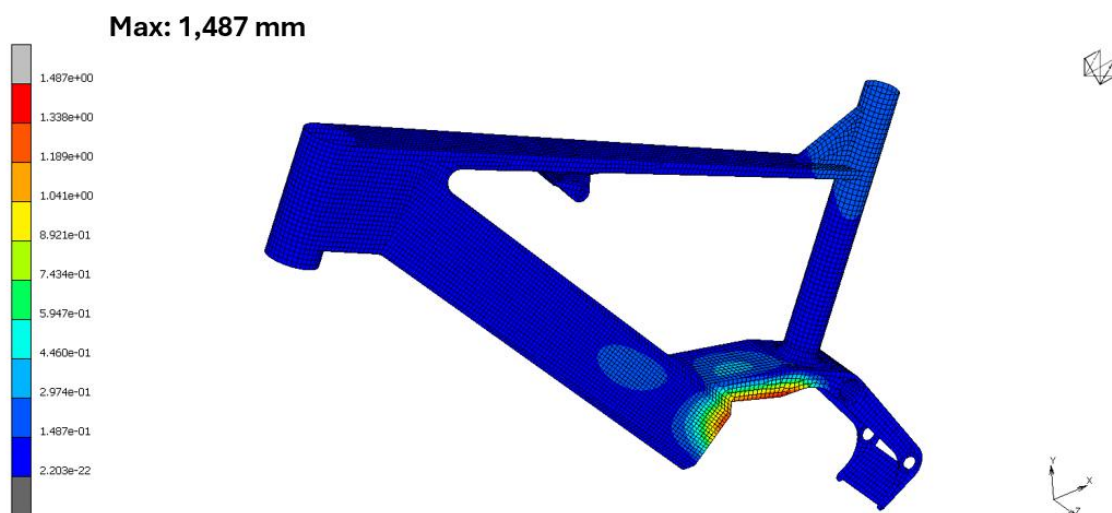


Obr. 23. Rozloženie ekvivalentného napätia v ráme bicykla pri zaťažení pedálovou silou

S dôrazom na oblasť rámu v mieste pôsobenia pedálovej sily je na obrázku č. 23. zobrazené rozloženie ekvivalentného napätia podľa von Mises kritéria, získané v simulačnom prostredí Marc Mentat. Výsledky vychádzajú zo statickej analýzy, pri ktorej bola na rám aplikovaná pedálová sila s veľkosťou 1800 N. Maximálna hodnota napätia v modeli dosiahla 307,1 MPa, čo sa nachádza v akceptovateľnom rozsahu 200 – 400 MPa pre túto oblasť rámovej konštrukcie.

Celková deformácia rámu získaná analýzou v Marc Mentat

V tejto časti sa analyzuje celková deformácia rámu bicykla získaná pomocou simulačného softvéru Marc Mentat. Výpočtový model rámu bol vystavený záťaži reprezentujúcej silu pôsobiacu v oblasti pedálov s cieľom preskúmať odozvu konštrukcie na reálne prevádzkové podmienky. Simulácia poskytuje detailné údaje o vektorovom posunutí jednotlivých uzlov konštrukčnej siete, na základe ktorého možno určiť miesta s najväčšou deformáciou. Zvláštny dôraz je kladený na oblasti s vysokým mechanickým napätím a nižšou lokálnou tuhosťou, ktoré vykazujú zvýšenú deformáciu. Výsledný tvar deformácie zobrazený v prostredí Marc Mentat umožňuje presne vizualizovať spôsob, akým sa rám deformuje pod aplikovaným zaťažením, a poskytuje dôležité informácie pre optimalizáciu geometrie a materiálového zloženia rámu.



Obr. 24. Analýza celkovej deformácie rámovej konštrukcie bicykla pedálovej sily pri statickom zaťažení

Na obrázku č. 24. je znázornená celková deformácia rámu bicykla v oblasti pedálovej jednotky pri statickom zaťažení 1800 N, analyzovaná pomocou softvéru Marc Mentat. Simulácia zobrazuje rozloženie priestorového posunutia jednotlivých bodov konštrukcie, pričom výsledky sú vyjadrené v milimetroch (mm). Maximálna zaznamenaná deformácia dosahuje hodnotu 1,487 mm, čo sa nachádza v očakávanom rozsahu 1,0 – 2,0 mm typickom pre moderné rámove konštrukcie tejto kategórie. Získané výsledky poukazujú na adekvátnu tuhosť rámu v oblasti pôsobenia pedálovej sily a potvrdzujú, že rámová konštrukcia spoľahlivo odoláva zaťaženiu bez vzniku nadmerných deformácií.

8 VYHODNOTENIE A POROVNANIE VÝSLEDKOV ANALÝZ RÁMU BICYKLA PROGRAMOV ANSYS WORKBENCH A MARC MENTAT

V tejto kapitole sa budeme zaoberať vyhodnotením a porovnaním výsledkov numerických analýz rámu bicykla, ktoré boli vykonané pomocou dvoch simulačných programov – Ansys Workbench a Marc Mentat. Cieľom tejto analýzy je posúdiť, ako rôzne softvérové nástroje reagujú na zaťaženie rámu v kritických oblastiach, konkrétne v oblasti sedlovej trubky a pedálovej sily. Tieto oblasti rámu sú vystavené najväčším mechanickým napätiam pri prevádzke bicykla, a preto ich správna analýza je kľúčová pre overenie stability a bezpečnosti celej konštrukcie.

Tabuľkové porovnanie napätí a celkových deformácií získaných v Ansys Workbench a Marc Mentat

Nasledujúca tabuľka sumarizuje výsledky maximálnych hodnôt napätia a celkových deformácií rámu bicykla získaných pomocou simulačných nástrojov Ansys Workbench a Marc Mentat. Zároveň sú uvedené aj minimálne rozdiely medzi oboma softvérmi, ktoré vznikli v dôsledku odlišného prístupu k výpočtom, použitému typu konečných prvkov a numerickým metódam. Tieto rozdiely sú dôležité pre objektívne zhodnotenie presnosti a spoľahlivosti jednotlivých nástrojov pri analýze mechanického správania rámu bicykla v zaťažovaných oblastiach.

Tabuľka 5 Porovnanie hodnôt napätí a deformácií v kritických oblastiach rámu bicykla získaných v Ansys Workbench a Marc Mentat

	<u>Ansys Workbench</u>	<u>Marc Mentat</u>
Napätie sedlovej trubky	358,2 MPa	365,2 MPa
Deformácia sedlovej trubky	0,611 mm	0,621 mm
Napätie pedálovej oblasti	296,1 MPa	307,1 MPa
Deformácia pedálovej oblasti	1,430 mm	1,487 mm

Z tabuľky zobrazenej na obrázku je zrejmé, že výsledky získané v programoch Ansys Workbench a Marc Mentat sa vo vybraných oblastiach rámu bicykla líšia len minimálne. Najväčší rozdiel bol zaznamenaný pri napätí v oblasti pedálovej časti, kde Marc Mentat vykázal hodnotu vyššiu približne o 4 % v porovnaní s výsledkom z Ansysu. V prípade deformácií a napätí v oblasti sedlovej trubky sa rozdiely pohybujú v rozmedzí 1,6 % až 2 %.

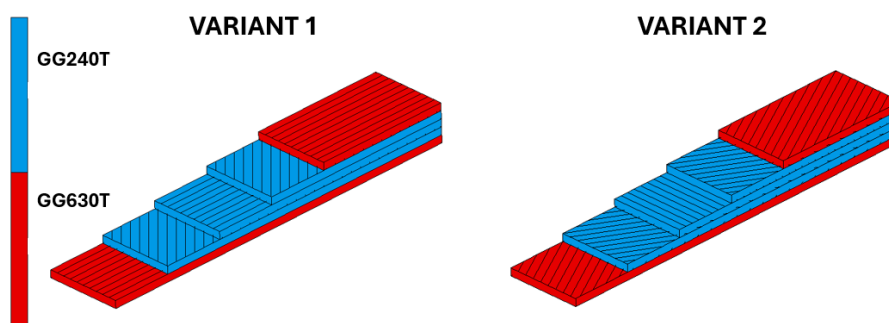
Pri deformácii pedálovej oblasti vykázal Marc Mentat hodnotu 1,487 mm, čo je o približne 3,99 % viac ako hodnota 1,430 mm získaná v Ansys Workbench.

Dôvody minimálnych rozdielov vo výsledkoch medzi Ansys Workbench a Marc Mentat

- Zaťaženia a okrajové podmienky
- Geometria a vlastnosti materiálu
- Analýza lineárnej statiky
- Rôzne parametre siete konečných prvkov (mesh)

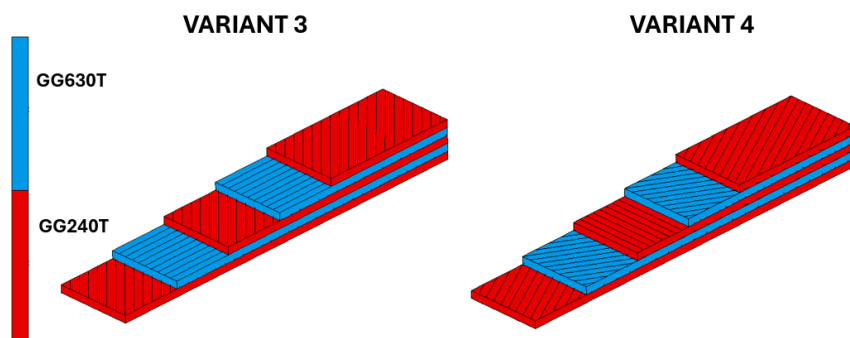
9 OPTIMALIZÁCIA USPORIADANIA KARBÓNOVÝCH VRSTIEV RÁMU

Rám elektrického bicykla vyrobený z uhlíkových kompozitov ponúka výnimočný pomer pevnosti a hmotnosti, no jeho výsledné mechanické vlastnosti závisia vo veľkej miere od správneho usporiadania a orientácie jednotlivých vrstiev karbónových tkanín. V tejto kapitole sú predstavené viaceré návrhové varianty laminátovej štruktúry rámu, v ktorých sa líši orientácia a kombinácia výstužných vlákien s cieľom optimalizovať pevnosť, tuhosť a dlhodobú spoľahlivosť celej konštrukcie.



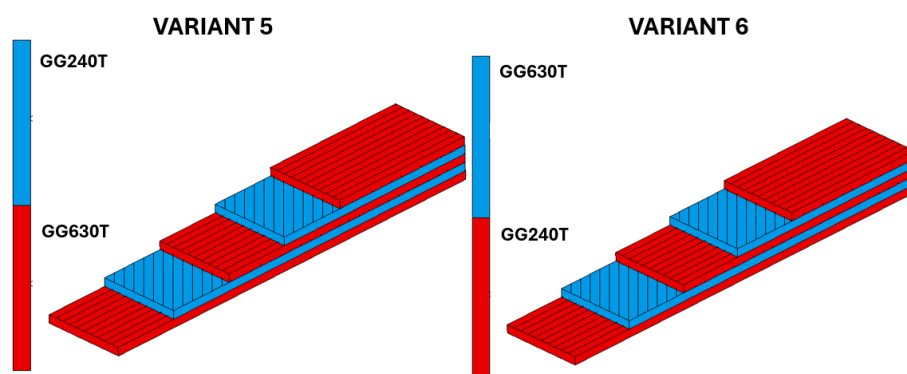
Obr. 25. Schematické znázornenie usporiadania vrstiev kompozitných materiálov GG240T a GG630T pre variant 1 a variant 2

Na obrázku č.25. je znázornené usporiadanie vrstiev kompozitného materiálu pre dve rôzne návrhové varianty. Variant 1 využíva sekvenciu vrstiev s orientáciou vlákien v smere 0°, 45°, 0°, 45°, 45°, čo predstavuje inverzné (opačné) poradie oproti konfigurácii rámu, ktorá bola analyzovaná v prvej simulácii v kapitole 10 a 11. V prípade varianty 2 je orientácia jednotlivých vrstiev nasledovná: 30°, -30°, 90°, -30°, 30°. Táto konfigurácia predstavuje alternatívne uhlové usporiadanie s dôrazom na vyvážené správanie vo viacerých smeroch zaťaženia.



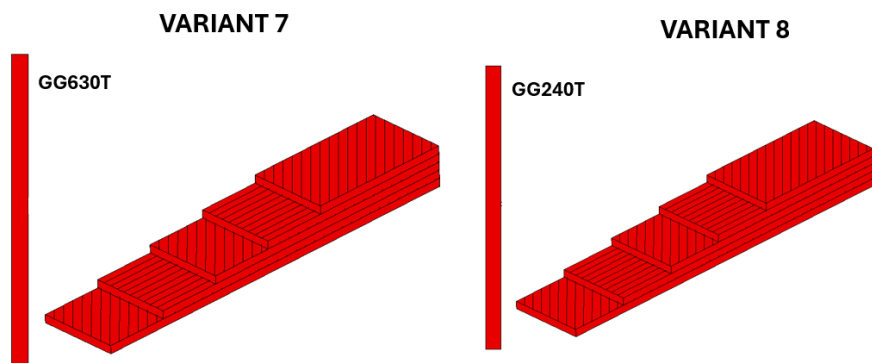
Obr. 26. Schematické znázornenie usporiadania vrstiev kompozitných materiálov GG240T a GG630T pre variant 3 a variant 4

Na obrázku č.26. je znázornené usporiadanie vrstiev pre varianty 3 a 4. V prípade varianty 3 je orientácia vlákien v jednotlivých vrstvách nasledovná: 45° , 0° , 45° , 0° , 45° . V porovnaní s predchádzajúcimi variantmi je zmena aj v samotnom usporiadaní použitých materiálov GG630T a GG240T, ktoré sú v tejto konfigurácii rozmiestnené odlišne. Variant 4 zachováva rovnaké materiálové usporiadanie ako variant 3, avšak mení orientáciu vlákien na: 30° , -30° , 90° , -30° , 30° .



Obr. 27. Schematické znázornenie usporiadania vrstiev kompozitných materiálov GG240T a GG630T pre variant 5 a variant 6

Na zobrazenom obrázku č.27. sú predstavené varianty 5 a 6, ktoré zachovávajú rovnakú orientáciu vlákien ako vo variante 1, teda: 0° , 45° , 0° , 45° , 45° . Rozdiel medzi týmito variantmi spočíva v poradí použitých kompozitných materiálov GG630T a GG240T. Variant 5 využíva nasledovné materiálové usporiadanie: GG630T / GG240T / GG630T / GG240T / GG630T, čím je zdôraznený vyšší podiel tuhšieho materiálu GG630T. Naopak, vo variante 6 je vrstvenie materiálov opačné – GG240T / GG630T / GG240T / GG630T / GG240T – čím sa zvyšuje podiel flexibilnejšieho GG240T.



Obr. 28. Schematické znázornenie usporiadania vrstiev kompozitných materiálov GG240T a GG630T pre variant 7 a variant 8

Ako posledný je obrázok č.58. a zobrazuje varianty 7 a 8, ktoré nadväzujú na orientáciu vlákien použitú v simuláciách uvedených v kapitolách 10 a 11. Orientácia vrstiev je teda zachovaná, no zmena nastáva v použitom materiáli. Variant 7 pozostáva výlučne z vrstiev kompozitného materiálu GG630T, zatiaľ čo variant 8 je tvorený výhradne z materiálu GG240T. Tieto varianty slúžia na posúdenie vplyvu homogénneho materiálového zloženia na celkové mechanické správanie rámu pri zachovaní identickej vrstvenej orientácie ako v predchádzajúcom prípade.

8.1 Vyhodnotenie napätí a deformácií pre navrhované varianty

Na základe vykonaných numerických simulácií boli pre všetky navrhnuté varianty zaznamenané hodnoty maximálneho hlavného napätia a celkovej deformácie v dvoch kritických oblastiach rámu – v oblasti sedlovej trubky a v pedálovej oblasti. Tieto údaje sú prehľadne spracované v nasledujúcej tabuľke, ktorá umožňuje vzájomné porovnanie jednotlivých konfigurácií z hľadiska ich mechanickej odozvy. Cieľom tejto analýzy je porovnať varianty, ktoré pri zachovaní požadovanej pevnosti a tuhosti rámu zároveň minimalizujú deformácie a napätia v namáhaných častiach konštrukcie. Sily a okrajové podmienky aplikované v simuláciách sú totožné s tými, ktoré boli detailne definované v kapitolách 8 a 9.

Tabuľka 6 Porovnanie hlavných napätí a celkových deformácií v sedlovej a pedálovej oblasti pre jednotlivé varianty vrstvenia

Variant	Napätie sedlovej trubky [MPa]	Deformácia sedlovej trubky [mm]	Napätie pedálovej oblasti [MPa]	Deformácia pedálovej oblasti [mm]
Variant 1	358,43	0,616	294,02	1,431
Variant 2	358,41	0,591	293,57	1,430
Variant 3	358,07	0,589	292,92	1,419
Variant 4	356,91	0,620	292,41	1,415
Variant 5	364,14	0,656	295,56	1,442
Variant 6	365,68	0,664	296,37	1,448
Variant 7	377,49	0,789	299,93	1,475
Variant 8	345,95	0,521	289,87	1,399

Na základe uvedených výsledkov možno pozorovať rozdiely v mechanickej odozve jednotlivých návrhových variantov rámu pri identických okrajových podmienkach. varianty 1 až 4 vykazujú veľmi podobné hodnoty napätí aj deformácií, čo naznačuje, že drobné zmeny v orientácii vrstiev alebo poradí materiálov v týchto prípadoch nemajú zásadný vplyv na celkovú tuhosť rámu. Varianty 5 a 6 dosahujú mierne vyššie hodnoty napätia aj deformácie, čo je dôsledkom rozdielneho pomeru použitých materiálov GG630T a GG240T.

Najvyššie napätia aj deformácie boli zaznamenané pri variante 7, ktorá je zložená výhradne z tuhšieho materiálu GG630T. Naopak, variant 8, tvorený výlučne z materiálu GG240T, dosiahol najnižšie napätia a deformácie spomedzi všetkých testovaných konfigurácií, čo poukazuje na jeho vyššiu poddajnosť, ale aj potenciálnu výhodu z hľadiska tlmenia vibrácií.

Celkovo možno konštatovať, že voľba materiálovej skladby má výraznejší vplyv na výsledky ako samotná orientácia vrstiev. Najvyváženejší pomer medzi tuhosťou a deformáciou vykazuje variant 3, ktorý kombinuje priaznivé hodnoty napätia aj relatívne nízku deformáciu v oboch sledovaných oblastiach rámu.

10 ZÁVER

Dizertačná práca s názvom „Optimalizácia tvaru a štruktúr komponentov tvorených na báze kompozitných materiálov“ sa zamerala na komplexné preskúmanie správania sa kompozitnej konštrukcie rámu elektro bicykla, najmä zloženú z anizotropných materiálov, s cieľom optimalizovať ich tvar a štruktúru pre konkrétne aplikácie v oblasti nosných systémov. Teoretická časť práce poskytla podrobný prehľad o vlastnostiach kompozitných materiálov, ich štruktúrach a praktickom využití, pričom osobitná pozornosť bola venovaná uhlíkovým vláknám vystuženým epoxidovou živcou – materiálom, ktorý bol ďalej skúmaný v praktickej časti práce.

V praktickej časti boli vykonané numerické simulácie v dvoch výpočtových prostrediach ANSYS Workbench a MSC Marc Mentat pre praktickú časť dizertačnej práce. Okrajové a zaťažovacie podmienky, ako aj vstupné materiálové charakteristiky získané z databázy vytvorenej v softvéri Digimat boli v oboch systémoch rovnaké. Cieľom bolo overiť presnosť a spoľahlivosť každého výpočtového programu pri simulácii kompozitných konštrukcií. Porovnaním zistení získaných zo simulácií sa zistili rozdiely vo výstupných údajoch vrátane maximálnych napätí, deformácií a rozloženia napätí v dôležitých častiach rámu.

S cieľom posúdiť vplyv na mechanickú odozvu konštrukcie sa simulačné štúdie sústredili na analýzu správania sa rámu s rôznymi kombináciami uhlíkových tkanín z hľadiska napätia a deformácie. Zistenia ukázali, že pevnosť a tuhosť rámu možno výrazne zvýšiť starostlivým usporiadaním a orientáciou výstuž. Štúdia tiež ukázala, že sofistikované simulačné techniky ponúkajú užitočný spôsob, ako predpovedať správanie kompozitných konštrukcií pred ich výrobou, čím sa vytvárajú nové možnosti rýchlejšieho, presnejšieho a cenovo dostupnejšieho navrhovania komponentov.

Záverom možno konštatovať, že ciele dizertačnej práce boli úspešne naplnené – boli prehĺbené poznatky o numerickej simulácii anizotropných kompozitných systémov, navrhnutá metodika optimalizácie štruktúr na báze uhlíkových vlákien a prezentovaný praktický prípad využitia týchto poznatkov pri návrhu rámu elektrického bicykla. Výsledky práce môžu poslúžiť ako východisko pre ďalší výskum i pre aplikáciu v inžinierskej praxi, najmä v oblastiach, kde sú požiadavky na vysoký pomer pevnosti k hmotnosti a dlhodobú spoľahlivosť konštrukcie.

Prínos pre vedu

- **Rozšírenie poznatkov o správaní sa kompozitných materiálov v nosných konštrukciách:**
Táto práca rozšírila naše poznatky o tom, ako anizotropné kompozity - konkrétne uhlíkové textílie vystužené epoxidovou živcou bisfenol F - mechanicky reagujú na rôzne scenáre zaťaženia. V mnohých oblastiach inžinierskej praxe sú tieto poznatky užitočné pri navrhovaní tuhých a ľahkých konštrukcií.
- **Metodologický prínos v oblasti numerického modelovania:**
Práca ponúka metodiku na vytvorenie dôveryhodných výpočtových modelov kompozitných dielov, od vytvorenia 3D modelu a presnej databázy materiálových vlastností až po ich implementáciu do simulácií MKP. Porovnávajú sa výsledky zo softvérov ANSYS a MSC Marc Mentat, pričom sa poukazuje na výhody a nevýhody jednotlivých programov a ponúkajú sa návrhy na ich využitie v praxi a vo výskume.
- **Overenie numerických modelov experimentom:**
Výpočtové modely boli overené a kalibrované prostredníctvom experimentálneho testovania skutočných vzoriek rámu bicykla a porovnaní so simuláciami. Tým sa zlepšila ich schopnosť predpovedať, čo je dôležité pre vedecký pokrok v oblasti simulácie kompozitných materiálov.
- **Optimalizácia štruktúr pomocou výpočtových simulácií:**
V tejto práci sa ukázalo, že cielená orientácia výstuže môže optimalizovať mechanické vlastnosti kompozitného rámu bicykla. Tento postup sa dá použiť na viaceré druhy kompozitných dielov v športovom, automobilovom a leteckom odvetví.
- **Interdisciplinárny prínos:**
Práca prispieva k rozvoju multidisciplinárneho výskumu zameraného na vytváranie nových, efektívnych a ľahkých štruktúr z kompozitných materiálov prepojením oblastí materiálového inžinierstva, výpočtovej mechaniky, mechanického dizajnu a výrobných technológií.

Prínos pre prax

- **Zvýšenie efektivity návrhu kompozitných komponentov:**
Pred výrobou kompozitných dielov možno ich tvar a štruktúru efektívne navrhnuť a optimalizovať podľa navrhovaného prístupu. Výsledkom je výrazné zníženie nárokov na fyzické prototypy, skrátenie vývojového cyklu a zníženie nákladov na vývoj výrobku.

- **Zavedenie overeného prístupu k digitálnemu testovaniu:**

Overenie návrhu v digitálnom prostredí je možné vďaka kombinácii numerických simulácií a experimentálneho testovania. To zvyšuje bezpečnosť, spoľahlivosť a životnosť výrobkov tým, že umožňuje podnikom presnejšie predpovedať, ako sa budú návrhy správať za skutočných okolností.

- **Optimalizácia hmotnosti a pevnosti konštrukcií:**

Výsledky práce ukázali, že správna konfigurácia výstuže môže výrazne znížiť hmotnosť konštrukcie a zároveň zachovať alebo zlepšiť jej mechanické vlastnosti. To má priamy vplyv na oblasť elektromobility, kde je malá hmotnosť nevyhnutná.

- **Prenositelnosť metodiky do iných odvetví:**

Pomocou navrhovanej metodiky možno navrhovať aj iné druhy kompozitných nosných komponentov, ako sú časti karosérie, drony, športové zariadenia, lietadlá alebo diely pre stavebníctvo. Práca poskytuje všeobecný rámec pre navrhovanie kompozitných dielov na mieru.

- **Zvýšenie konkurencieschopnosti výrobcov:**

Podniky môžu získať technologický náskok využitím navrhovaných metód pri vývoji výrobkov s cieľom vytvoriť ľahší, pevnejší a odolnejší tovar. To im umožní konkurovať na celosvetovej úrovni a rýchlejšie reagovať na požiadavky trhu.

- **Podpora digitalizácie a inžinierskych simulácií v praxi:**

Tým, že práca ukazuje, ako sa dá sofistikovaný simulačný softvér (ANSYS, Marc Mentat, Digimat) využiť v reálnej inžinierskej praxi, prispieva k trendu digitalizácie v priemysle. To podporuje používanie sofistikovaných nástrojov CAE vo fázach návrhu a výroby výrobku.

Resumé

The dissertation entitled "Optimization of the shape and structure of components made from composite materials" focused on a comprehensive examination of the behavior of the composite frame structure of an electric bicycle, composed mainly of anisotropic materials, with the aim of optimizing their shape and structure for specific applications in the field of load-bearing systems. The theoretical part of the thesis provided a detailed overview of the properties of composite materials, their structures, and practical applications, with particular attention paid to carbon fibers reinforced with epoxy resin—a material that was further examined in the practical part of the thesis.

In the practical part, numerical simulations were performed in two computational environments, ANSYS Workbench and MSC Marc Mentat, for the practical part of the dissertation. The boundary and load conditions, as well as the input material characteristics obtained from the database created in the Digimat software, were the same in both systems. The aim was to verify the accuracy and reliability of each computational program in the simulation of composite structures. By comparing the findings obtained from the simulations, differences in the output data were found, including maximum stresses, deformations, and stress distribution in important parts of the frame.

In order to assess the impact on the mechanical response of the structure, the simulation studies focused on analyzing the behavior of the frame with different combinations of carbon fabrics in terms of stress and deformation. The findings showed that the strength and stiffness of the frame can be significantly increased by careful arrangement and orientation of the stiffeners. The study also showed that sophisticated simulation techniques offer a useful way to predict the behavior of composite structures prior to their manufacture, creating new opportunities for faster, more accurate, and more affordable component design.

In conclusion, the objectives of the dissertation were successfully achieved – knowledge of numerical simulation of anisotropic composite systems was deepened, a methodology for optimizing carbon fiber-based structures was proposed, and a practical case of applying this knowledge in the design of an electric bicycle frame was presented. The results of this work can serve as a starting point for further research and for application in engineering practice, especially in areas where there are requirements for a high strength-to-weight ratio and long-term structural reliability.

Zoznam publikačnej činnosti

Publikácie v zahraničných karentovaných časopisoch

- **KOHÁR, R., MISKOLCI, J., POMPÁŠ, L., KUČERA, L., ŠTEVKO, P., PETRU, M., & MISHRA, R. K.** *Computational Analysis of Mechanical Properties in Polymeric Sandwich Composite Materials. Polymers*, 2024, roč.16, č..5, s. 1-22. DOI 10.3390/polym16050673.

Publikácie v časopisoch, ktoré nie sú karentované, ale sú registrované v databázach WoS alebo SCPOUS

- **VANKO, K., POMPÁŠ, L., MADAJ, R., VINCEN, M., ŠUTKA, J.** *Optimization of assembly devices of automated workplaces using the TRIZ methodology. Production Engineering Archives*, 2023, roč. 29, č.3, s. 234-240. DOI 10.30657/pea.2023.29.27.
- **GAJDÁČ, I., KUČERA, L., GAJDOŠÍK, T., POMPÁŠ, L., SMETANKA, L., WITKOVSKÝ, V., WIMMER, G.** *Design and Construction of Metrological Equipment for Torque Sensors with a Carbon-based Measuring Arm. Measurement Science Review*, 2023, roč. 23, č.4, s. 163-167. DOI 10.2478/msr-2023-0021.
- **POMPÁŠ, L., BRUMERČÍK, F., KUČERA, L., SMETANKA, L.** *Design of a Bicycle's Structural Components and a Comparison of Their Characteristics in Steel, Aluminum and Carbon. COMMUNICATIONS*, 2023, roč.25, č.3, s. 259-267. DOI 10.26552/com.C.2023.061.

Publikácie na zahraničných vedeckých konferenciách

- **ČECHMÁNEK, D., KOHÁR, R., ČUCHOR, D., POMPÁŠ, L.** *A structural design of the injection mould. TRANSCOM 2023, Transportation Research Procedia*, ISSN 2352-1465, 2023, č.74, s.576-583. DOI 10.1016/j.trpro.2023.11.184.
- **POMPÁŠ, L., KUČERA, L., ČECHMÁNEK, D., FIAČAN, J.** *Construction design of the reaction arm for tightening tools. TRANSCOM 2023, Transportation Research Procedia*, ISSN 2352-1465, 2023, č. 74, s. 568-575. DOI 10.1016/j.trpro.2023.11.183.
- **FIAČAN, J., HRČEK, S., ČECHMÁNEK, D., POMPÁŠ, L.** *Matematická analýza simulácie letu vrtule. SEMDOK 2023, ISBN 978-80-554-1347-3, s.36-42.*

Zoznam použitej literatúry

- [1] **ENGINEERING**, 2023 [online]. 2023 [cit. 2023-04-13]. Dostupne na internete: <https://www.engineering.sk/clanky2/stroje-a-technologie/4166-vyuzitie-kompozitnych-materialov-v-priemysle>
- [2] **SCIENCEDIRECT**, 2018 [online]. 2023 [cit. 2023-04-13]. Dostupne na internete: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263822317336279>
- [3] **EASTMAN MACHINE COMPANY**. *Prepreg Processing: Considerations for Cutting Pre-impregnated Composites* [online]. 2020 [cit. 2025-04-13]. Dostupné z: <https://www.eastmancuts.com/prepreg-processing/>
- [4] **EUROLASER GmbH**. *Cutting of Composites – Delcotex* [online]. 2024 [cit. 2025-04-13]. Dostupné z: <https://www.eurolaser.com/news/delcotex-cutting-of-composites>
- [5] **RACECAR ENGINEERING**. *Tech Explained: Carbon Fibre Prepreg* [online]. 2018 [cit. 2025-04-13]. Dostupné z: <https://www.racecar-engineering.com/articles/tech-explained-carbon-fibre-prepreg/>
- [6] **NITPRO COMPOSITES**. *Everything You Need to Know About Bladder Molding Process* [online]. [cit. 2025-04-13]. Dostupné z: <https://www.nitprocomposites.com/blog/everything-you-need-to-know-about-bladder-molding-process>
- [7] **PIRAN COMPOSITES**. *How Does a Composite Autoclave Work? (9 Steps)* [online]. 2024 [cit. 2025-04-13]. Dostupné z: <https://pirancomposites.com/news/composite-autoclave/>

- [8] **KLOPČIČ, M. et al.** *Study of trimming damages of CFRP structures in function of the machining processes and their impact on the mechanical behavior* [online]. In: *Composites Part B: Engineering*, 2014, vol. 57, s. 136–143. ISSN 1359-8368. [cit. 2025-04-13]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.09.050>
- [9] **DVOŘÁK, M. et al.** *Experimental Development of Composite Bicycle Frame* [online]. In: *Applied Sciences*, 2022, vol. 12, č. 16, s. 8377. ISSN 2076-3417. [cit. 2025-04-13]. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/app12168377>
- [10] **COSTA, L. – MACHADO, M. – ANDRADE, A. – SILVA, F.** *Optimization of design and fatigue simulations for an electric assisted bicycle frame* [online]. In: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 2022, vol. 236, č. 22, s. 11335–11350. ISSN 0954-4062. [cit. 2025-04-13]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1177/09544062221081587>
- [11] **Bastovanský, R., Smetanka, L., Kohár, R., Mishra, R. K., & Petru, M.** (2024). Comparison of Mechanical Property Simulations with Results of Limited Flexural Tests of Different Multi-Layer Carbon Fiber-Reinforced Polymer Composites. *Polymers*, 16(11), 1588. <https://doi.org/10.3390/polym16111588>
- [12] **Microtex Composites.** *GG 285 T – Carbon Fiber Fabric.* [s.a.] [online]. [Citované: 29.4.2025]. Dostupné na: <https://www.microtexcomposites.com/products/structural-composites/carbon-fiber-fabrics/gg-285-t-2/>
- [13] **Microtex Composites.** *GG 630 T – Carbon Fiber Fabric.* [s.a.] [online]. [Citované: 29.4.2025.] Dostupné na: <https://www.microtexcomposites.com/products/structural-composites/special-carbon-fabrics/gg-630-t/>
- [14] **Zhang, L., Li, X., & Wang, Y.** (2023). Fluorescent aggregate structure revealed in bisphenol F epoxy resin and its effect on mechanical properties of carbon fiber composites. *Polymer Testing*, 114, 107725. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2023.107725>
- [15] **KİTSELİS, Alexandros G.; NIKOLAKEA, Chrysavgi S.; MANOLAKOS, Dimitrios E.** *The Design Process of an Optimized Road Racing Bicycle Frame.* *Machines*, MDPI, 2022, vol. 10, č. 2, č. 149. DOI: 10.3390/machines10020149.
- [16] **AKHYAR, M.; TAMBUN, E. T. W.** Fatigue simulation with pedalling load and vertical load for city bike frame following British Standard EN 14764. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2021, vol. 1034, 012013