



Fakulta aplikovaných věd
Katedra mechaniky

Bakalářská práce

Návrh vertikální korekce triatlonových řídítek

Autor: Tereza Vaňková
Studijní program: B3947 / Počítačové modelování v technice
Studijní obor: 3902R051 / Výpočty a design
Vedoucí práce: Ing. Tomáš Kroupa, Ph.D.
Akademický rok: 2016/2017

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem zadanou bakalářskou práci zpracovala samostatně s použitím uvedené literatury a zdrojů informací.

V Plzni, 31. května 2017

Tereza Vaňková

Poděkování

Ráda bych poděkovala Ing. Tomáši Kroupovi, Ph.D., vedoucímu bakalářské práce, za cenné rady, trpělivost, příjemné prostředí při konzultacích a čas, který mi věnoval při tvorbě této práce. Dále bych chtěla poděkovat Ing. Janu Krystkovi, Ph.D. a Ing. Haně Srbové za pomoc a čas strávený při experimentech. Poděkování patří i Ing. Robertu Zemčíkovi, Ph.D., za spolupráci při výrobě prototypu a věcné připomínky. A v neposlední řadě děkuji své rodině, která mi byla oporou po celou dobu studia.

Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá návrhem a výrobou vertikální korekce triatlonových řídítek z kompozitního materiálu tvořeného uhlíkovými vlákny a epoxidem. První část práce je zaměřena na seznámení se s triatlonovými řídítky, jejich částmi, typy a normami, které je třeba při navrhování a výrobě dodržet. Pro výpočty byly vybrány dva způsoby zatížení navrhované součásti, jejichž velikosti byly stanoveny výpočtem s využitím výsledků z provedených experimentů.

Tvar navrhované součásti použitý při výrobě byl určen z analytických výpočtů, v nichž byl užitý materiál pro zjednodušení považován za homogenní a izotropní. Součástí práce je i popis výroby prototypu. Poslední část práce pojednává o hledání optimálního řešení. Za tímto účelem byl s využitím softwarů Python a Simulia ABAQUS sestaven model pro konečnoprvkovou analýzu. Pevnost součásti byla vyhodnocena pomocí kritéria Tsai-Wu a kritéria maximálního napětí. Materiálové parametry potřebné pro model byly stanoveny pomocí tahové zkoušky vzorků z použitého materiálu.

Klíčová slova: triatlonová řídítka, kompozit, biaxiální prepreg, konečnoprvkový model, kritérium Tsai-Wu, kritérium maximálního napětí

Abstrakt

The bachelor thesis deals with the design and manufacturing of vertical correction of triathlon handlebars that are made of composite material (carbon fibers and epoxy). The first part of the thesis is focused on description of the triathlon handlebars, their parts, types and standards which should be followed during the design and manufacturing process. Two main loading states were taken into consideration during calculations. Loads were determined using experiments, analytical calculations and standards.

The shape of manufactured prototype was determined from the analytical calculations where the material was considered homogeneous and isotropic. Another part of the thesis describes the prototype manufacturing using autoclave. The final part of the thesis deals with searching for an optimal solution. For this purpose was made a model for finite-element analysis using the Python and Simulia ABAQUS softwares. For the strength analysis of the component the Tsai-Wu criterion and criterion of maximal stress were used. Material parameters that were needed for the model were determined by a tensile test.

Key words: triathlon handlebars, composite, biaxial prepreg, finite-element model, Tsai-Wu criterion, creation of maximum stress

Obsah

Úvod	1
1 Současný stav v oblasti triatlonových řídítek	2
1.1 Typy řídítek	2
1.2 Normy	4
1.3 Shrnutí	5
2 Zatížení navrhované součásti	6
2.1 Síla od jednoho šroubu	7
2.2 Síla od člověka	8
2.3 Shrnutí	11
3 Analytická rozvaha	12
3.1 První varianta zatížení	12
3.1.1 Průřez	13
3.1.2 Maximální ohybový moment	14
3.1.3 Modul průřezu	15
3.1.4 Stanovení tloušťky materiálu idealizovaného modelu	15
3.2 Druhá varianta zatížení	16
3.2.1 Moment M_p	17
3.2.2 Moment třecí síly M_t	17
3.3 Minimální koeficient tření	18
3.4 Shrnutí	18
4 Výroba prototypu	20
4.1 Použitý materiál	20
4.2 Vrstvení materiálu	21
4.3 Forma	23
4.4 Vyrobena součást	24
5 Stanovení materiálových parametrů	26
5.1 Kompozitní materiál	26
5.2 Další použité materiály	31
6 Materiálový model	32
6.1 Ortotropní materiál	32
6.1.1 Kritérium maximálního napětí	33
6.1.2 Tsai-Wu kritérium	34

6.2	Izotropní materiál	35
7	Konečnoprvkový model součásti	36
7.1	Popis modelu	36
7.1.1	Varianta zatížení 1	38
7.1.2	Varianta zatížení 2	39
8	Dimenzování	40
8.1	Dimenzování průřezu součásti	40
8.2	Navržení postupu výroby optimální součásti	45
	Závěr	46

Seznam obrázků

1	Základní komponenty řídítek	1
1.1	Karbonová řídítká typu „monocoque“ [2]	3
1.2	Zvednutá řídítká z uhlíkového kompozitu [4]	4
1.3	Normovaný test nástavců	5
2.1	Umístění šroubů ve zvyšovátku (nákres bez podpěrek pod lokty)	6
2.2	Model zatížení součásti	7
2.3	Experimentální určení síly F_s	8
2.4	Poloha těžiště	10
3.1	První varianta zatížení	12
3.2	Kombinované namáhání součásti	13
3.3	Navrhovaný průřez zvyšovátká	14
3.4	Zjednodušení součásti pro výpočet ohybového momentu	14
3.5	Závislost napětí na tloušťce materiálu	16
3.6	Druhá varianta zatížení	16
3.7	Silové účinky při variantě 2	17
3.8	Průřez zvyšovátká po úpravě	18
3.9	Zjednodušený průřez zvyšovátká	19
4.1	Použitý prepreg	20
4.2	Orientace vláken pruhu určeného k vytvoření obalu součásti	21
4.3	Orientace a způsob nařezání pruhů určených k vytvoření výztuže	21
4.4	Vrstvení výztuže součásti	22
4.5	Vrstvení obalu součásti	22
4.6	Výrobek uzavřený ve formě	23
4.7	Rozřezání výrobku	23
4.8	Otevřená forma	24
4.9	Hotový prototyp zvyšovátká	24
4.10	Součást namontovaná na kole	25
5.1	Vzorek kompozitního materiálu upevněný v trhacím stroji	27
5.2	Model tahové zkoušky	28
5.3	Graf závislosti napětí na deformaci pro vzorky z první desky	28
5.4	Graf závislosti napětí na deformaci pro vzorky z druhé desky	29
5.5	Graf závislosti napětí na deformaci pro vzorky ze třetí desky	29
5.6	Graf závislosti napětí na deformaci pro vzorky ze čtvrté desky	30
5.7	Označení směrů v kompozitu	30

7.1	Model soustavy	37
7.2	Geometrie vrstev	37
7.3	Orientace vrstev	38
7.4	Model varianty 1	38
7.5	Model varianty 2	39
8.1	Výsledky z modelu vyrobené součásti zpracované pomocí kritéria maximálního smykového napětí v rovině 12	40
8.2	Výsledky z modelu součásti s jednou vrstvou v obalu zpracované pomocí kritéria maximálního smykového napětí v rovině 12	41
8.3	Výsledky z modelu součásti s jednou vrstvou v obalu a odebranými 34 vrstvami výztuže zpracované pomocí kritéria Tsai-Wu	41
8.4	Výsledky z modelu optimální součásti zpracované pomocí kritéria maximálního normálového napětí ve směru 1	42
8.5	Výsledky z modelu optimální součásti zpracované pomocí kritéria maximálního normálového napětí ve směru 2	42
8.6	Výsledky z modelu optimální součásti zpracované pomocí kritéria maximálního normálového napětí ve směru 3	43
8.7	Výsledky z modelu optimální součásti zpracované pomocí kritéria maximálního smykového napětí v rovině 12	43
8.8	Výsledky z modelu optimální součásti zpracované pomocí kritéria maximálního smykového napětí v rovině 13	43
8.9	Výsledky z modelu optimální součásti zpracované pomocí kritéria maximálního smykového napětí v rovině 23	44
8.10	Výsledky z modelu optimální součásti zpracované pomocí kritéria Tsai-Wu	44
8.11	Výsledky z modelu optimální součásti při variantě zatížení 2 zpracované pomocí kritéria maximálního smykového napětí v rovině 12	44
8.12	Výsledky z modelu optimální součásti při variantě zatížení 2 zpracované pomocí kritéria Tsai-Wu	45
8.13	Vrstvení prepregu při výrobě optimalizované součásti	45

Seznam tabulek

2.1	Hodnoty potřebné při výpočtu síly F_s [11] (šroub M6)	7
2.2	Velikosti síly F_s	8
2.3	Konstanty sloužící k výpočtu hmotnosti jednotlivých částí těla	9
2.4	Hmotnost jednotlivých částí těla	9
2.5	Síly působící na navrhovanou součást	11
5.1	Materiálové parametry kompozitu použitého při výrobě zvyšovátka ¹	31
5.2	Meze pevnosti kompozitu použitého při výrobě zvyšovátka ²	31

Seznam značení

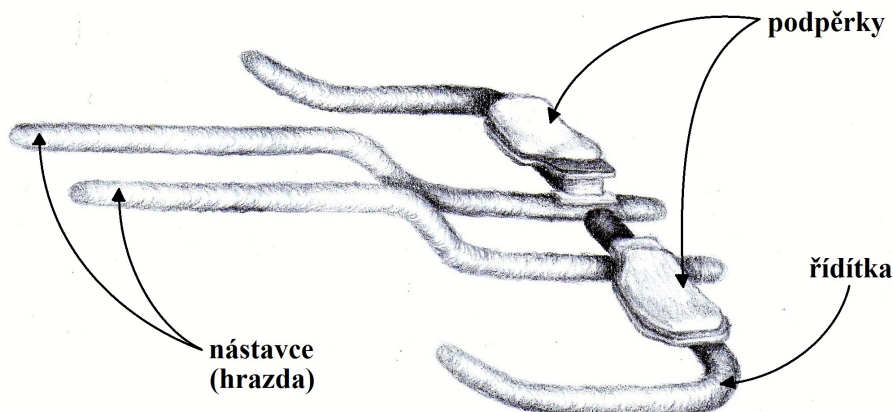
F_s	[N]	síla působící ve šroubu po utažení
M_u	[Nm]	utahovací moment šroubu
f_1	[-]	součinitel smykového tření mezi maticí šroubu a podložkou
D	[m]	roztečný průměr třecí plochy mezi maticí a šroubem
γ, β	[-]	pomocné proměnné
d_2	[mm]	střední průměr závitu šroubu
d	[mm]	vnější průměr závitu šroubu
p	[-]	stoupání závitu šroubu
α	[°]	vrcholový úhel závitu šroubu
f_2	[-]	součinitel smykového tření v závitu šroubu
M6		označení šroubu o průměru 6 mm
l_{s0}	[m]	měřená délka šroubu před utažením
l_s	[m]	měřená délka šroubu po utažení
E_s	[Pa]	modul pružnosti šroubu
A_s	[m ²]	plocha průřezu šroubu
B_0	[kg]	konstanta sloužící k výpočtu hmotnosti části těla
B_1	[-]	konstanta sloužící k výpočtu hmotnosti části těla
B_2	[kg/cm]	konstanta sloužící k výpočtu hmotnosti části těla
m_i	[kg]	hmotnost jednotlivých částí těla
m_c	[kg]	hmotnost člověka
v	[cm]	výška člověka
m_1	[kg]	váha kola a cyklisty na přední kolo
m_k	[kg]	hmotnost kola a cyklisty
l_t	[m]	horizontální vzdálenost těžiště cyklisty od osy otáčení zadního kola
l_{os}	[m]	vzdálenost os otáčení předního a zadního kola
s	[m]	vertikální vzdálenost těžiště cyklisty od osy otáčení zadního kola
m_{1a}	[kg]	váha kola a cyklisty na přední kolo při zvednutí zadního kola do určité výšky
φ	[°]	úhel naklonění zadního kola
F_h	[N]	síla působící na podpěrku
m	[kg]	hmotnost částí těla opírajících se do opěrky
g	[ms ⁻²]	tíhové zrychlení
σ_D	[Pa]	dovolené napětí
X_H^C	[Pa]	pevnost v tlaku ve směru vláken
k	[-]	bezpečnost
M	[Nm]	moment síly připojený po posunutí síly působící na podpěrku
l	[m]	vzdálenost středu podpěrky od osy zvyšovátka
σ_r	[Pa]	analyticky vypočítané maximální napětí na součásti
σ_F	[Pa]	analyticky vypočítané napětí od síly

σ_M	[Pa]	analyticky vypočítané napětí od ohybového momentu
σ_h	[Pa]	analyticky vypočítané napětí od síly F_h
σ_s	[Pa]	analyticky vypočítané napětí od síly F_s
A	[m ²]	plocha průřezu zvyšovátka
M_o	[Nm]	maximální ohybový moment
W_o	[m ³]	modul průřezu v ohybu
R	[m]	vnější poloměr oblé části zvyšovátka
b	[m]	délka rovné části průřezu zvyšovátka
t	[m]	šířka stěny zvyšovátka
$M(x)$	[Nm]	průběh ohybového momentu
h	[m]	výška zvyšovátka
J_z	[m ⁴]	kvadratický moment k neutrální ose součásti
e	[m]	vzdálenosti krajního bodu součásti od neutrální osy
J_{zo}	[m ⁴]	kvadratický moment k neutrální ose rovné části zvyšovátka
J_{zk}	[m ⁴]	kvadratický moment k neutrální ose oblé části zvyšovátka
F_p	[N]	síla působící na konci hrazdy
M_t	[Nm]	moment třecí síly
M_p	[Nm]	moment síly připojený po posunutí síly působící na konci hrazdy
l_h	[m]	délka hrazdy
F_{pr}	[N]	přítlačná síla působící na říditka
N	[N]	normálová reakce
T	[N]	třecí síla
f	[-]	koeficient tření
ϕ	[°]	třecí úhel
r	[m]	poloměr řídítek
t_v	[m]	tloušťka výztuže
f_{\min}	[-]	minimální koeficient tření
σ	[Pa]	napětí
ε	[-]	poměrné prodloužení (deformace)
E_1	[Pa]	modul pružnosti v tahu ve směru 1
E_2	[Pa]	modul pružnosti v tahu ve směru 2
E_3	[Pa]	modul pružnosti v tahu ve směru 3
ν_{12}	[-]	Poissonovo číslo pro rovinu 12
ν_{13}	[-]	Poissonovo číslo pro rovinu 13
ν_{23}	[-]	Poissonovo číslo pro rovinu 23
G_{12}	[Pa]	smykový modul pružnosti v rovině 12
G_{13}	[Pa]	smykový modul pružnosti v rovině 13
G_{23}	[Pa]	smykový modul pružnosti v rovině 23
X_C	[Pa]	pevnost v tlaku ve směru 1
X_T	[Pa]	pevnost v tahu ve směru 1
Y_C	[Pa]	pevnost v tlaku ve směru 2
Y_T	[Pa]	pevnost v tahu ve směru 2
Z_C	[Pa]	pevnost v tlaku ve směru 3
Z_T	[Pa]	pevnost v tahu ve směru 3
S_{12}	[Pa]	smyková pevnost pro rovinu 12
S_{13}	[Pa]	smyková pevnost pro rovinu 13
S_{23}	[Pa]	smyková pevnost pro rovinu 23
E	[Pa]	modul pružnosti v tahu hliníku
ν	[-]	Poissonovo číslo hliníku

σ_1	[Pa]	normálové napětí ve směru 1
σ_2	[Pa]	normálové napětí ve směru 2
σ_3	[Pa]	normálové napětí ve směru 3
σ_4	[Pa]	smykové napětí v rovině 12
σ_5	[Pa]	smykové napětí v rovině 13
σ_6	[Pa]	smykové napětí v rovině 23
ε_1	[-]	poměrné prodloužení (deformace) ve směru 1
ε_2	[-]	poměrné prodloužení (deformace) ve směru 2
ε_3	[-]	poměrné prodloužení (deformace) ve směru 3
ε_4	[-]	zkos v rovině 12
ε_5	[-]	zkos v rovině 13
ε_6	[-]	zkos v rovině 23
$\boldsymbol{\sigma}$	[Pa]	vektor napětí
$\boldsymbol{\varepsilon}$	[-]	vektor deformace
\mathbf{C}	[Pa]	matice tuhosti
\mathbf{S}	[Pa ⁻¹]	matice poddajnosti
$F_i, i = 1, 2, \dots, 6$	[Pa ⁻¹]	parametry kritéria Tsai-Wu
$F_{ij}, i = 1, 2, \dots, 6, j = 1, 2, \dots, 6$	[Pa ⁻¹]	parametry kritéria Tsai-Wu

Úvod

Cílem práce je navrhnout vertikální korekci triatlonových (časovkových) řídítek, tedy lépe řečeno navrhnout zvýšení polohy hrazdy (resp. nástavce) oproti řídítkům. Triatlonová řídítka nejsou zcela totožná s řídítky, která jsou na běžně používaných silničních či horských kolech. Hlavním rozdílem je, že se skládají ze tří základních částí (viz obrázek 1) a ne pouze z jedné, jak jsme zvyklí. První částí jsou samotná řídítka, která bývají zakončena brzdovými páčkami. Druhou částí je hrazda, na níž mohou být přidělané řadící páčky nebo tlačítka v případě, že nejsou na řídítkách nebo na rámu. Spolu se třetí hlavní částí, podpěrkami pod lokty, slouží hrazda jako podpěra, při zalehnutí cyklisty na řídítka, čímž dojde k zlepšení aerodynamických vlastností jezdce.



Obrázek 1: Základní komponenty řídítek

Provedením výše uvedené korekce nedojde ke zrychlení závodníka při jízdě (spíše naopak), ale ke zvýšení jeho pohodlí. Jedním z důvodů provedení této korekce jsou bolesti zad, způsobené dlouhodobým strnulým ohnutím při jízdě. Mezi další důvody se řadí špatné prokrvování dolních končetin nebo žaludeční obtíže způsobené stlačením žaludku. Doba jízdy na kole se u triatlonových závodníků pohybuje mezi dvěma až osmi hodinami. Při takto dlouhé jízdě je nutné během jízdy pít, popřípadě jíst. Při velkém předklonu dochází ke stlačení i jiných vnitřních orgánů než jen žaludku, což může způsobovat obtíže při dýchání v průběhu závodu. Tyto problémy se částečně odstraní zvýšením řídítek.

Kapitola 1

Současný stav v oblasti triatlonových řídítek

V současné době je na trhu velké množství různých druhů a značek triatlonových řídítek. O některých typech, jejich výhodách a nevýhodách, ale také o normách platících pro řídítka pojednává tato kapitola.

1.1 Typy řídítek

Časovkářská řídítka se vyrábí z různých druhů materiálů. Nejrozšířenějším materiálem používaným při výrobě kol i řídítek je hliník, ale jeho význam v poslední době upadá a je nahrazován uhlíkovými kompozitními materiály. Výhodou těchto materiálů je při vhodném použití jejich malá hmotnost a vysoká pevnost.

Současným trendem jsou řídítka typu „monocoque“, tedy jednolitá řídítka. Cena konkrétních řídítek tohoto typu zobrazených na obrázku 1.1 je 19 660,-Kč. Tato řídítka mají většinou líbivý design, a jelikož jsou z jednoho kusu, není k nim nutné již nic přidělovat a nemůže se stát, že se v průběhu jízdy uvolní například šroub. Tyto výhody jsou sníženy tím, že až na malé detaily, není možné řídítka nastavit dle individuálních potřeb.¹ Chce-li jezdec řídítka přizpůsobit vlastním potřebám, je nutné si řídítka sestavit z jednotlivých částí.

¹Výjimku tvoří velmi drahá kola, např. Cervélo P5X [1].



Obrázek 1.1: Karbonová řídítka typu „monocoque“ [2]

Samotná řídítka je možné pořídit v různých tvarových variantách. Mohou být zahnutá směrem dolů („berany“), vodorovná, či mírně zvedlá nahoru. Také profil řídítkové trubky může být různý od klasického kruhového průřezu až po různě se zužující a rozšiřující elipsoidy. Asi nejpoužívanější jsou nyní u vrcholných sportovců vodorovná karbonová řídítka, jejichž profil připomíná tvar kapky (tento tvar má dobré aerodynamické vlastnosti). Stejně tak i hrazdy se vyrábí v různých tvarových modifikacích. Nejčastější jsou vodorovné, popřípadě mírně nakloněné směrem vzhůru, ale různě tvarované. Tvarování vyhovuje každému ze závodníků jiné, proto je na trhu široký výběr. Podpěrky mají tvar většinou podobný, liší se pouze velikostí opěrné plochy. Menší podpěrky bývají lehčí a mají o trochu menší odpor vzduchu, oproti tomu větší plocha podpěrek přináší větší komfort a nehrozí vypadnutí loktů z podpěrek [3].

Na trhu jsou i řídítka se zvyšenou hrazdou. Jedny z takovýchto řídítek jsou vidět i na obrázku 1.2. Jedná se o řídítka s upravitelnou výškou hrazdy a jejich cena je 22 000,- Kč. Nevýhodou těchto řídítek je, že se prodávají jako celek a není tedy možné si na ně dát například jinou hrazdu.



Obrázek 1.2: Zvednutá řídítka z uhlíkového kompozitu [4]

Z finančního hlediska se většinou vyplatí si řídítka seskládat z jednotlivých částí. Cena řídítek v celku je zhruba dvojnásobná než součet cen jednotlivých komponentů.

1.2 Normy

Technické normy stanovují základní kvalitativní a bezpečnostní požadavky na různé druhy výrobků a výrobních procesů, proto je třeba na ně při navrhování a výrobě součástí brát zřetel. V současné době jsou platné dvě normy pojednávající o závodních kolech a řídítkách:

Norma: ČSN EN ISO 4210-2

Název: Jízdní kola - Bezpečnostní požadavky na jízdní kola - Část 2: Požadavky na městská a trekingová kola, na kola pro mladé lidi, na horská a závodní kola

Obor: 30 - SILNIČNÍ VOZIDLA

Účinnost: 02/2015

a

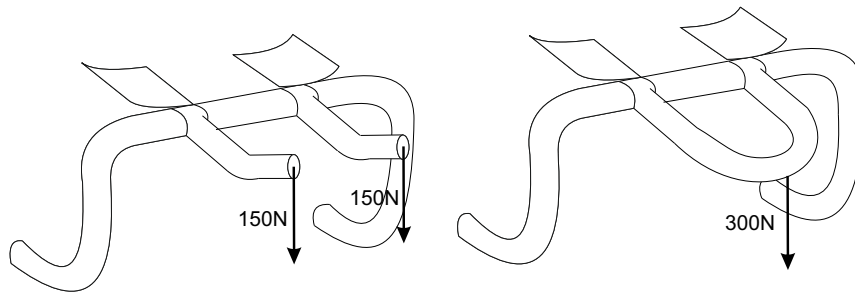
Norma: ČSN EN ISO 4210-5

Název: Jízdní kola - Bezpečnostní požadavky na jízdní kola - Část 5: Zkušební metody pro řízení

Obor: 30 - SILNIČNÍ VOZIDLA

Účinnost: 02/2015

Z normy 4210-2 vyplývá, že výška měřená od středu sedačky v nejnižší poloze do nejvyšší části řídítek v nejvyšší poloze nesmí být větší než 400 [mm] [5] a váha působící na přední kolo by měla být uvažována minimálně 25% z hmotnosti kola a cyklisty [6]. Norma 4210-5 pojednává o metodách testování řídítek. Po zvýšení nastavců je podle této normy zapotřebí upevnit nastavec spolu s navrhovanou součástí na řídítka dle návodu a poté zatížit silou 300 [N] tak, aby ohybový moment byl maximální (viz obrázek 1.3) [7]. V průběhu testu by nemělo dojít k viditelným změnám.



Obrázek 1.3: Normovaný test nástavců

Na triatlonových kolech je většinou sedačka nad úrovní řídítek, proto pro navrhovanou součást o maximální výšce 100 [mm] nepředstavuje první uvedená norma žádné omezení.

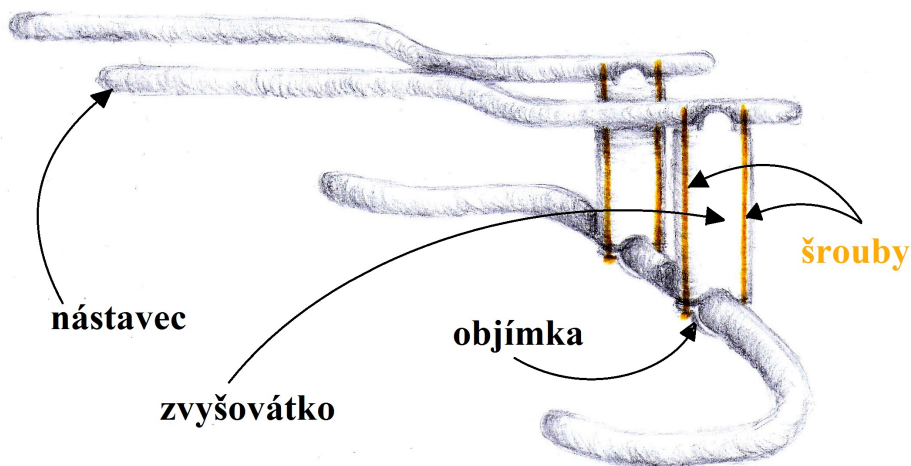
1.3 Shrnutí

Řídítka, na která je žádoucí přidělat navrhovanou součást, mají v místě uchycení nástavců většinou kulatou řídítkovou trubku o průměru 31,8 [mm]. K navržení součásti je nutné stanovit její zatížení a vytvořit dostatečně tuhý svěrný spoj, aby uchycení nástavců vyhovovalo normě ČSN EN ISO 4210-5.

Kapitola 2

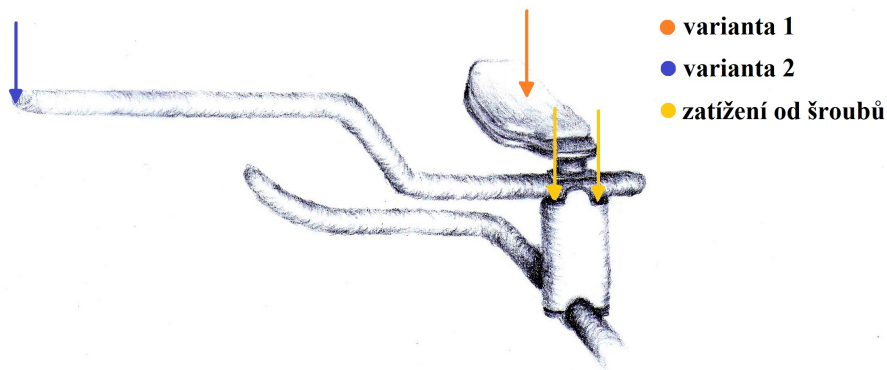
Zatížení navrhované součásti

Stanovení přesného zatížení součásti zvyšující polohu hrazdy časovkových řídicích (dále nazývané zvyšovátko) je obtížné, jelikož součást je s ostatními komponenty řídicích spojena šrouby (viz obrázek 2.1). Použitý model zatížení, vzniklého utažením šroubů, je zjednodušen na osamělé síly působící v místech závitů, do kterých se zmíněné šrouby upevňují.



Obrázek 2.1: Umístění šroubů ve zvyšovátku (náčrt bez podpěrek pod lokty)

V práci jsou uvažovány dvě různé varianty zatížení. Varianta 1 nastává při běžném provozu častěji, jedná se o zatížení silou vyvolanou člověkem opřeným při jízdě o podpěrky. Varianta 2 představuje zatížení na konci hrazdy. Síla F_p působící při této variantě zatížení je dána normou ČSN EN ISO 4210-5.



Obrázek 2.2: Model zatížení součásti

2.1 Síla od jednoho šroubu

Velikost síly od jednoho šroubu F_s je získána z výpočtu a ověřena experimentem. Pro výpočet síly F_s vzniklé utažením šroubu utahovacím momentem M_u je použit následující vzorec [12]:

$$F_s = \frac{M_u}{f_1 \frac{D}{2} + \operatorname{tg}(\gamma + \beta) \frac{d_2}{2}}, \quad (2.1)$$

kde d_2 je střední průměr závitu, D je roztečný průměr třecí plochy mezi maticí a šroubem a f_1 je součinitel smykového tření mezi maticí a podložkou. β a γ jsou dány jako:

$$\beta = \operatorname{arctg}\left(\frac{p}{\pi d}\right) \quad (2.2)$$

$$\gamma = \operatorname{arctg}\left(\frac{f_2}{\cos \frac{\alpha}{2}}\right), \quad (2.3)$$

kde α je vrcholový úhel závitu, f_2 je součinitel smykového tření v závitu, p je stoupání závitu a d je vnější průměr závitu. Všechny hodnoty až na utahovací moment M_u lze nalézt v tabulkách a použité hodnoty jsou uvedeny v tabulce 2.1.

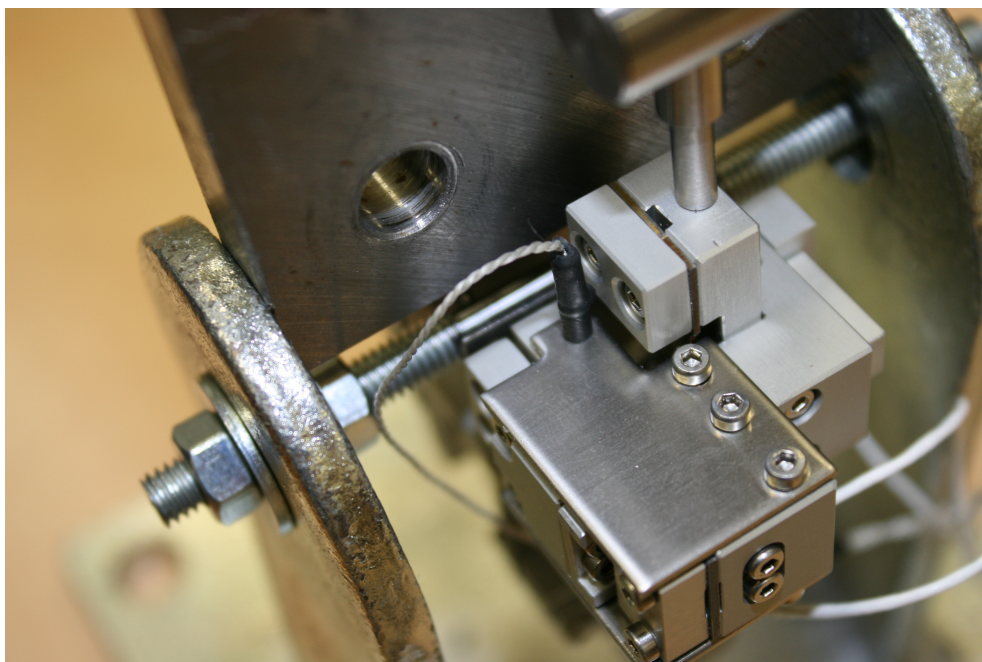
Tabulka 2.1: Hodnoty potřebné při výpočtu síly F_s [11] (šroub M6)

d_2	D	f_1	f_2	α	p	d
[mm]	[mm]	[-]	[-]	[°]	[mm]	[mm]
5,324	5,897	0,3	0,1	60	1	5,974

Experimentálně byla síla F_s zjištěna následujícím způsobem. Šroub byl vložen do přípravného stojanu (viz obrázek 2.3) a utažen momentovým klíčem na 10 [Nm]. Vše bylo naolejováno WD40. Pomocí extenzometru byla změřena délka l_{s0} před utažením šroubu a l_s po utažení. Síla F_s byla následně vypočtena dosazením do vztahu:

$$F_s = \frac{E_s(l_s - l_{s0})A_s}{l_{s0}}, \quad (2.4)$$

kde E_s je modul pružnosti, který byl změřen pomocí tahové zkoušky, a A_s je plocha průřezu šroubu.



Obrázek 2.3: Experimentální určení síly F_s

Velikost síly F_s vypočítané pro stejný utahovací moment, jako byl použit při experimentu, přibližně odpovídá síle získané experimentálně (viz tabulka 2.2). Pro další výpočty je použita síla F_s odpovídající utažení momentem $M_u = 7$ [Nm], což je moment běžně používaný při utahování šroubů.

Tabulka 2.2: Velikosti síly F_s

Způsob stanovení síly F_s	experiment	výpočet	výpočet ¹
Velikost utahovacího momentu M_u	10	10	7
Velikost síly F_s v [kN]	7,36	7,48	5,24

2.2 Síla od člověka

Tato síla je stanovena jako tíhová síla z části váhy cyklisty, která je určena pomocí výpočtu hmotnosti jednotlivých částí lidského těla a polohy těžiště.

Hmotností jednotlivých částí těla se zabývali pánové Zaciorskij a Selujanov. Z jejich výzkumu vznikla tabulka 2.3, díky níž se dají jednotlivé hmotnosti vypočítat [8].

¹Zatížení, které bude použito pro další výpočty.

Tabulka 2.3: Konstanty sloužící k výpočtu hmotnosti jednotlivých částí těla

Část těla	B_0 [kg]	B_1 [-]	B_2 [kg/cm]
hlava	1,29600	0,01710	0,01430
trup - horní část	8,21440	0,18620	-0,05840
trup - střední část	7,18100	0,22340	-0,06630
trup - dolní část	-7,49800	0,09760	0,04896
stehno	-2,64900	0,14630	0,01370
bérec	-1,59200	0,03616	0,01210
noha	-0,82900	0,00770	0,00730
nadloktí	0,25000	0,03013	-0,00270
předloktí	0,31850	0,01445	-0,00114
ruka	-0,11650	0,00360	0,00175

Pro vyjádření hmotnosti daného segmentu m_i pak platí rovnice:

$$m_i = B_0 + B_1 m_c + B_2 v, \quad (2.5)$$

kde m_c [kg] je celková hmotnost a v [cm] je výška osoby.

Výpočet, jehož výsledky jsou uvedeny v tabulce 2.4, byl proveden pro osobu o hmotnosti 120 [kg] a výšce 190 [cm]. Hmotnost testovací osoby byla zvolena z opatrnosti, kdy je raději připuštěno mírné předdimenzování než poddimenzování součástí.

Tabulka 2.4: Hmotnost jednotlivých částí těla

Část těla		hmotnost [kg]
hlava		6,0650
trup		54,3708
	horní část	19,4624
	střední část	21,3920
	dolní část	13,5164
dolní končetina		24,0382
	stehno	17,5100
	bérec	5,0462
	noha	1,482
horní končetina		5,8362
	nadloktí	3,3526
	předloktí	1,8359
	ruka	0,6480

Polohu těžiště cyklisty je možné určit pomocí vážení přední (resp. zadní) části kola i s cyklistou v rovině a v náklonu [9]. Jednodušší je určení podélné polohy těžiště. K tomu je zapotřebí znát pouze váhu na jedno kolo (např. na přední kolo m_1) měřenou při vodorovné poloze kola s cyklistou. Vzdálenost těžiště od osy otáčení zadního kola l_t pak je:

$$l_t = \frac{m_1}{m_k} l_{os}, \quad (2.6)$$

kde l_{os} je vzdálenost os otáčení předního a zadního kola a m_k je hmotnost kola s cyklistou. Minimální hodnota m_1 je dána normou na 25% z hmotnosti m_k , tato hodnota je opravdu minimální, jelikož po zvažení předního kola při pozici jezdce na obrázku 2.4 byla získána váha odpovídající přibližně 57%.

Určení výškové polohy těžiště s lze provést pomocí vztahu založeném na faktu, že při různé výšce nadzvednutí zadního kola se mění váha na předním kole.

$$s = \frac{(m_{1a} - m_1)l_{os}}{m_k \tan(\varphi)}, \quad (2.7)$$

kde m_{1a} je váha připadající na přední kolo při zvednutí zadního kola do určité výšky a φ je úhel naklonění.

Zvedání zadního kola s cyklistou na kole a předním kolem na váze je poměrně náročné. Zároveň je výše uvedeným způsobem možné zjistit polohu těžiště konkrétního kola a cyklisty, ne však polohu obecnou. Z těchto důvodů je podle vzorce (2.6) určena podélná poloha těžiště $l_t = 0,587$ [m] a výšková poloha je odhadnuta s přihlédnutím k metodické pomůcce pro řešení nehody s účastí cyklistů [10]. Zde je uvedeno, že těžiště cyklisty sedícího na jízdním kole se nachází nad rovinou sedla v rozmezí hodnot 0,05 až 0,25 [m] podle výšky a hmotnosti cyklisty.

Přibližná pozice těžiště cyklisty je vyznačena na obrázku 2.4. Z něj je patrné, že na přední kolo při běžné jízdě působí síla odpovídající zatížení hmotností rovnající se přibližně součtu váhy hlavy, obou rukou, horní a střední části trupu.



Obrázek 2.4: Poloha těžiště

Ve variantě zatížení 1 je jedna z podpěrek zatížena silou F_h , která je stanovena součtem celkové síly působící na přední kolo při standardní jízdě a tíhové síly dané hmotností dolní části trupu. Hmotnost všech částí těla zahrnutých do výpočtu je $m = 72,1$ [kg] (pro dříve uvedenou testovací osobu). Sílu F_h lze tedy určit ze vztahu:

$$F_h = mg = 0,71 \text{ [kN]}, \quad (2.8)$$

kde $g = 9,81$ [ms^{-2}] je tíhové zrychlení.

Důvodem zahrnutí celkové síly působící na přední kolo je, že jezdec se může v průběhu jízdy opírat pouze o jednu ruku (např. když pije). Hmotnost dolní části trupu je do výpočtu přidána, jelikož je možné se při jízdě nadzvednout ze sedačky, přitáhnout blíže k řídkům a tím změnit polohu těžiště.

2.3 Shrnutí

Součást je zatěžována třemi různými silami, jejichž velikosti jsou uvedeny v tabulce 2.5.

Tabulka 2.5: Síly působící na navrhovanou součást

Síla od jednoho šroubu	Síla působící na podpěrku	Síla působící na hrazdu
F_s [kN]	F_h [kN]	F_p [kN]
5,24	0,71	0,15

Kapitola 3

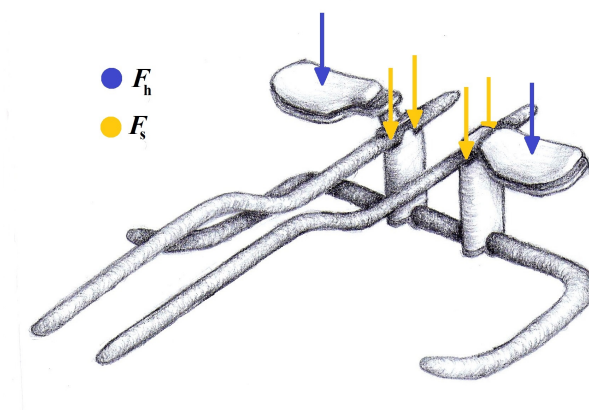
Analytická rozvaha

Analytické řešení problému je provedeno pro homogenní materiál, přestože k výrobě zvyšovátka je zvolen materiál kompozitní. Mez pevnosti určující maximální dovolené napětí homogenního materiálu je ve výpočtech nahrazena pevností v tlaku ve směru vláken $X_H^C = 600$ [MPa]. Koeficient bezpečnosti je zvolen $k = 10$, jelikož uvedená pevnost ve směru vláken není stanovena pro použitý materiál, ale pouze podobný a zároveň zvyšovátka není namáhána jen na tlak, ale také na ohyb, a nemá všechna vlákna orientována ve směru působící síly. Maximální dovolené napětí je tudíž stanoveno jako:

$$\sigma_D = \frac{X_H^C}{k} = 60 \text{ [MPa]}. \quad (3.1)$$

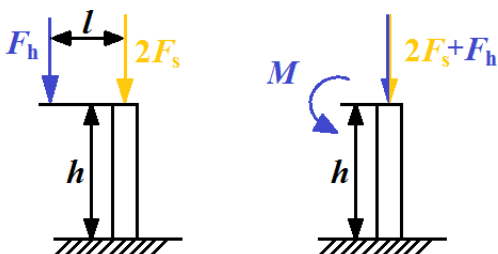
3.1 První varianta zatížení

Cílem rozvahy provedené pro první variantu zatížení (viz obtáček 3.1) je určit minimální tloušťku materiálu zvyšovátka tak, aby napětí na součásti nepřekročilo dovolené napětí. Při stanovování maximálního napětí na součásti bylo spojení zvyšovátka s řídky zjednodušeno na vetknutí zvyšovátka do rovné plochy.



Obrázek 3.1: První varianta zatížení

Navrhovaná součást je ve variantě 1 namáhána zároveň na tlak a ohyb, jelikož podpěrka, na kterou působí člověk silou F_h , není k nástavci připevněna ve středu, ale na kraji. Tento typ kombinovaného namáhání je možné řešit přesunutím působící síly na střed a připojením momentu $M = lF_h$, kde l je vzdálenost mezi původním a přesunutým působištěm síly (viz obrázek 3.2).



Obrázek 3.2: Kombinované namáhání součásti

K přesunuté síle je zapotřebí přičíst dvakrát sílu F_s , což je výsledná síla vzniklá součtem sil působících ve šroubech po utažení. Maximální napětí zjednodušeného modelu součásti σ_F se nachází u vetknutí na straně, kde je ke zvyšovátku připojena podpěrka, a je možné jej vypočítat jako součet napětí od síly σ_F a od ohybového momentu σ_M :

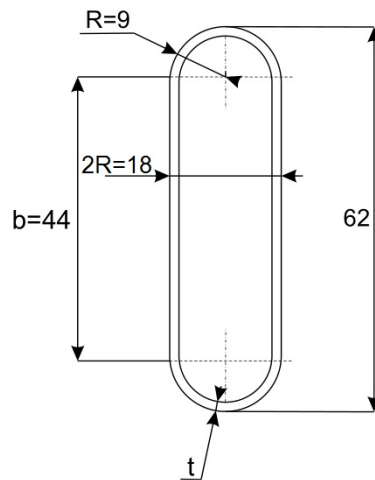
$$\sigma_F = \frac{F_h + 2F_s}{A}, \quad (3.2)$$

$$\sigma_M = \frac{M_o}{W_o}, \quad (3.3)$$

kde A je plocha průřezu zvyšovátka, M_o je maximální ohybový moment od momentu působícího na součást a W_o je modul průřezu v ohybu.

3.1.1 Průřez

Navržený průřez součásti je znázorněn na obrázku 3.3. Tloušťka materiálu t je hledaným parametrem.



Obrázek 3.3: Navrhovaný průřez zvyšovátka

Plocha průřezu je vypočtena jako součet plochy mezikruží dvou soustředných kružnic a ploch dvou obdélníků:

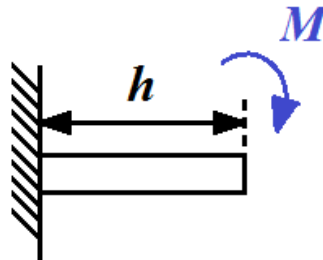
$$A = \pi R^2 - \pi(R - t)^2 + 2bt. \quad (3.4)$$

Vztah (3.4) lze upravit do tvaru:

$$A = t(\pi 2R + 2b) - \pi t^2. \quad (3.5)$$

3.1.2 Maximální ohybový moment

K určení maximálního ohybového momentu je nutné znát průběh ohybového momentu $M(x)$. Zvyšovátka bylo při výpočtu M_o považováno za nosník na jedné straně vetknutý a na druhé straně zatížený momentem $M = F_h l$ (viz obrázek 3.4).



Obrázek 3.4: Zjednodušení součásti pro výpočet ohybového momentu

Ohybový moment $M(x)$ tohoto nosníku je konstantní M . Maximální ohybový moment M_o je maximem absolutní hodnoty funkce $M(x)$, tudíž je roven:

$$M_o = M = F_h l = 71 \text{ [Nm]}. \quad (3.6)$$

3.1.3 Modul průřezu

Modul průřezu v ohybu je definován jako podíl kvadratického momentu k neutrální ose a vzdálenosti krajního bodu od neutrální osy:

$$W_o = \frac{J_z}{e} . \quad (3.7)$$

Vzdálenost e je v tomto případě polovina šířky zvyšovatka:

$$e = \frac{2R}{2} = R, \quad (3.8)$$

a kvadratický moment je roven součtu kvadratických momentů soustředných obdélníků a mezikruží:

$$J_z = J_{zo} + J_{zk}. \quad (3.9)$$

Kvadratický moment J_{zk} je možné vypočítat jako rozdíl kvadratických momentů velkého kruhu o poloměru R a malého kruhu s poloměrem $R-t$. Podobně lze určit také kvadratický moment J_{zo} jako rozdíl kvadratických momentů velkého obdélníku se stranami $2R$ a b a malého obdélníku se stranami $2(R-t)$ a b :

$$J_{zk} = \frac{\pi R^4}{64} - \frac{\pi(R-t)^4}{64} = \frac{\pi[R^4 - (R-t)^4]}{64}, \quad (3.10)$$

$$J_{zo} = \frac{b(2R)^3}{12} - \frac{b[2(R-t)]^3}{12} = \frac{2b[R^3 - (R-t)^3]}{3}. \quad (3.11)$$

Dosazením J_{zk} a J_{zo} do (3.9), je získán vztah pro celkový kvadratický moment:

$$\begin{aligned} J_z &= \frac{\pi[R^4 - (R-t)^4]}{64} + \frac{2b[R^3 - (R-t)^3]}{3} = \\ &= \frac{3\pi[R^4 - (R-t)^4] + 128b[R^3 - (R-t)^3]}{192}. \end{aligned} \quad (3.12)$$

Výrazy (3.8) a (3.12) je následně možné dosadit do (3.7) a určit tak modul průřezu jako:

$$W_o = \frac{3\pi[R^4 - (R-t)^4] + 128b[R^3 - (R-t)^3]}{192R}. \quad (3.13)$$

3.1.4 Stanovení tloušťky materiálu idealizovaného modelu

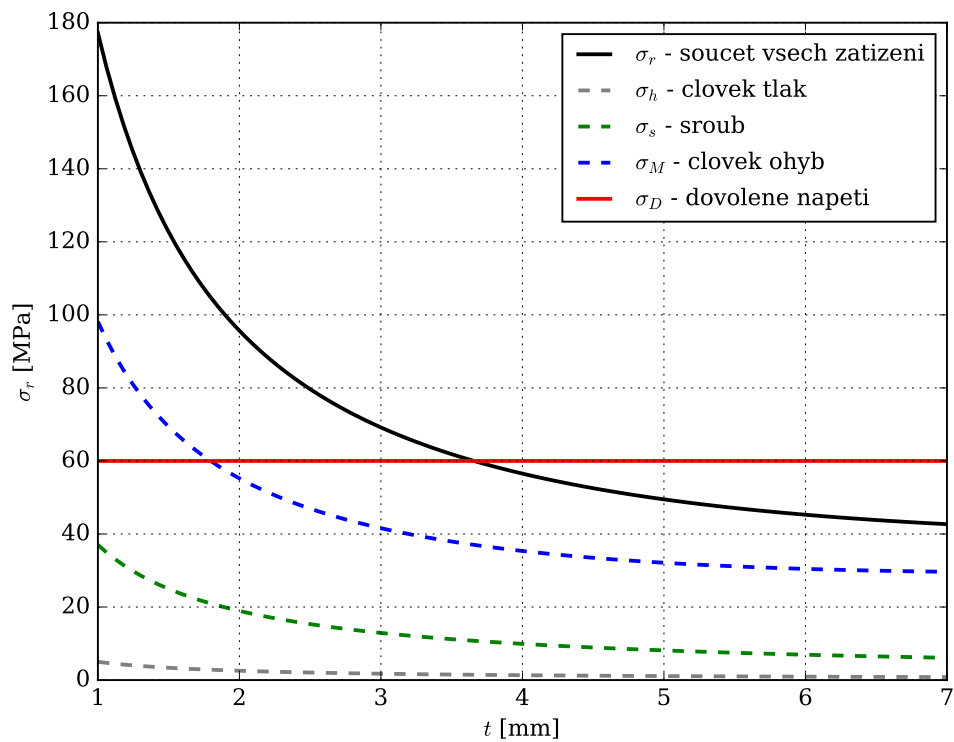
Tloušťka materiálu je určena z podmínky:

$$\sigma_D \geq \sigma_r. \quad (3.14)$$

Po dosazení za celkové napětí σ_r vznikne vztah:

$$\sigma_D \geq \frac{F_h + 2F_s}{t(\pi 2R + 2b) - \pi t^2} + \frac{192RM_o}{3\pi[R^4 - (R-t)^4] + 128b[R^3 - (R-t)^3]}, \quad (3.15)$$

kde tloušťka t je jediným neznámým parametrem. Explicitní vyjádření t ze vztahu (3.15) není možné, proto byl v jazyce Python vytvořen skript vykreslující napětí v závislosti na t .

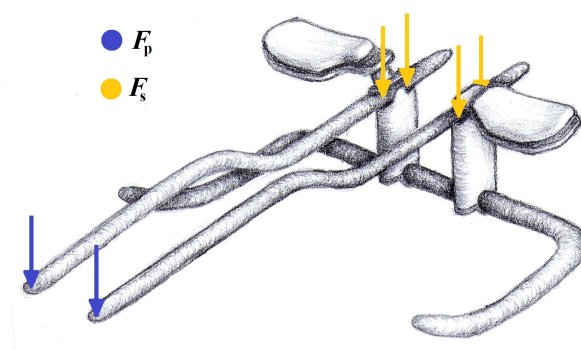


Obrázek 3.5: Závislost napětí na tloušťce materiálu

Minimální tloušťka t je z obrázku 3.5 odečtena 3,7 [mm].

3.2 Druhá varianta zatížení

Cílem analytické rozvahy provedené pro druhou variantu zatížení (viz obrázek 3.6) je zjistit za jakých podmínek nedojde k prokluzu mezi navrhovanou součástí a řídky.



Obrázek 3.6: Druhá varianta zatížení

Protočení nástavce okolo řídítek může vyvolat síla F_p působící na konci hrazdy. Aby k protočení nedošlo, musí platit:

$$M_t \geq M_p, \quad (3.16)$$

kde M_t je moment třecí síly a M_p je moment, který protočení způsobuje.

3.2.1 Moment M_p

Posunu-li sílu F_p na střed nástavce, pak je nutné k této síle připojit ještě moment síly. V takto upraveném modelu je zřejmé, že protočení způsobuje připojený moment, jehož velikost je rovna:

$$M_p = F_p l_h, \quad (3.17)$$

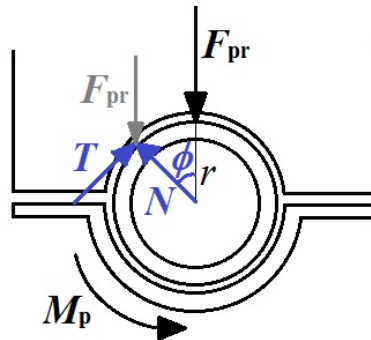
kde l_h je délka hrazdy.

3.2.2 Moment třecí síly M_t

Řídítka jsou držena přítláčnou silou F_{pr} , která se skládá z posunuté síly F_p a předepínacích sil od šroubů F_s ($F_{pr} = F_p + 2F_s$). Objímka obepínající řídítko vyvolává normálovou reakci N . Protočením vzniká třecí síla T (viz obrázek 3.7), pro kterou platí [13]:

$$T = fN, \quad (3.18)$$

kde f je koeficient tření.



Obrázek 3.7: Silové účinky při variantě 2

Normálovou reakci N je možné určit z podmínky rovnováhy v normálovém směru:

$$0 = N - F_{pr} \cos \phi, \quad (3.19)$$

dosazením N do vztahu (3.18) je získán výraz:

$$T = f F_{pr} \cos \phi. \quad (3.20)$$

Třecí moment M_t vyvolaný třecí silou T je dán jako:

$$M_t = rT, \quad (3.21)$$

kde r je poloměr řídítek. Dosazením výrazu (3.20) do rovnice (3.21) je třecí moment určen vztahem:

$$M_t = r f F_{pr} \cos \phi. \quad (3.22)$$

Nedojde-li k protočení je úhel $\phi = 0$, tudíž funkce kosinus nabývá svého maxima ($\cos(0) = 1$), proto lze psát:

$$M_t = r f F_{pr}. \quad (3.23)$$

3.3 Minimální koeficient tření

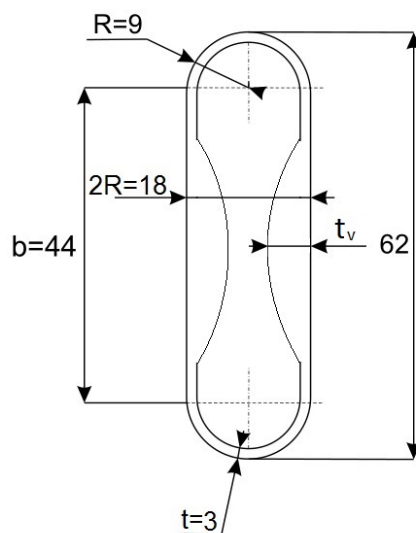
Minimální koeficient tření f je dán z podmínky (3.24), která vznikne dosazením do (3.16):

$$r f F_{pr} \geq F_p l_h \Rightarrow f_{\min} = \frac{F_p l_h}{F_{pr} r}. \quad (3.24)$$

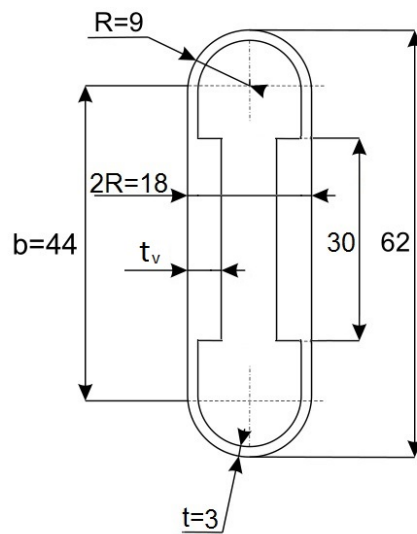
Takto vypočítaný koeficient tření je po zaokrouhlení 0,3.

3.4 Shrnutí

Vyrobení zvyšovátka s konstantní tloušťkou materiálu $t = 3,7$ [mm] po celém obvodu není vhodné ani možné, jelikož při takovéto šířce stěny by se do zvyšovátka nevešly šrouby, jejichž průměr a vzdálenost od sebe jsou pevně dány. Tvar průřezu zvyšovátka byl proto upraven na tloušťku 3 [mm] s vyztužením v nejméně namáhaných oblastech (viz ob rázek 3.8). Tvar výtzuže znázorněný na obrázku 3.8 vychází z reálného stavu, kdy zvyšovátka není upevněno na rovné ploše, ale na řídítkové trubce. Tento tvar je poměrně složitý, a proto byl zjednodušen (viz obrázek 3.9). Při výrobě prototypu byla výtzuž z opatrnosti, a též z důvodu zjednodušení výroby, vytvořena plná (od kraje do kraje, bez mezery uprostřed).



Obrázek 3.8: Průřez zvyšovátka po úpravě



Obrázek 3.9: Zjednodušený průřez zvyšovátka

Ověření velikosti koeficientu tření mezi zvyšovátkem a řídky (popř. řídky a objímkou) je obtížné, proto je předpokládáno, že zmíněný koeficient je vyšší než $f_{\min} = 0,3$, stanovený jako minimální. Po vyrobení a připevnění prototypu zvyšovátka na kolo k protočení nedošlo.

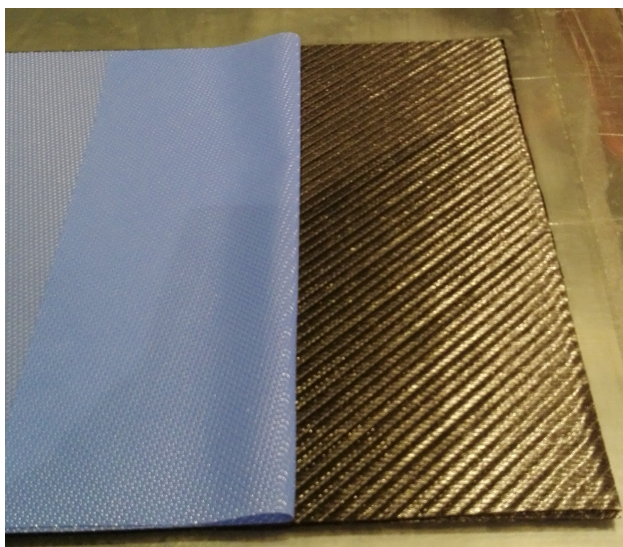
Kapitola 4

Výroba prototypu

Prototyp byl vyroben dříve, než byla provedena důkladnější analýza metodou konečných prvků, jelikož se blížila doba expirace použitého materiálu. Zároveň bylo třeba vyrobit vzorky na mechanické testy, kterými by bylo možné určit základní materiálové vlastnosti potřebné pro důkladnější model. Z těchto důvodů byl prototyp vyroben současně se vzorky.

4.1 Použitý materiál

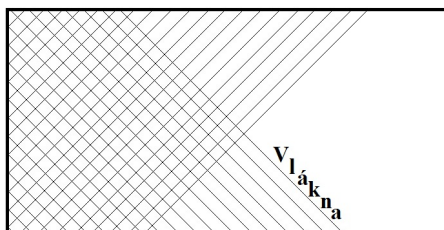
Zvyšovátko je vyrobeno z prepregu s biaxiálním uspořádáním tvořeného uhlíkovými vlákny a epoxidem. Vlákna jsou v jedné vrstvě uspořádána do dvou směrů, jenž mezi sebou svírají pravý úhel. Tloušťka jedné vrstvy prepregu po vytvrzení je cca 0,3 [mm]. Výhodou prepregu je vysoký podíl vláken v materiálu a jejich přesné uspořádání, ale také poměrně snadné postupy při výrobě. Zvyšovátko by bylo možné vyrobit též z jednosměrného kompozitního materiálu, avšak z důvodu dostupnosti byl nakonec použit výše uvedený biaxiální kompozit.



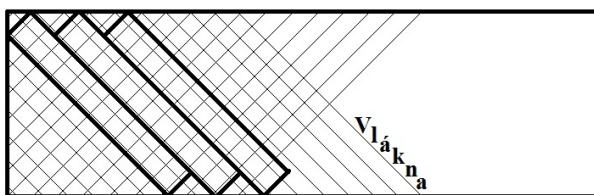
Obrázek 4.1: Použitý prepreg

4.2 Vrstvení materiálu

Z role materiálu byl uříznut jeden pruh o šířce půl metru, ze kterého je vytvořen obal součásti. Orientace vláken tohoto pruhu je $+45^\circ$ a -45° vzhledem k nejdelsí straně pruhu, jak je naznačeno na obrázku 4.2. Výztuž součásti je tvořena ze tří centimetrových pruhů. Tyto pruhy byly nařezány způsobem znázorněným na obrázku 4.3 a orientace snopků vláken je tudíž 0° a 90° vzhledem k nejdelsí straně pruhu.

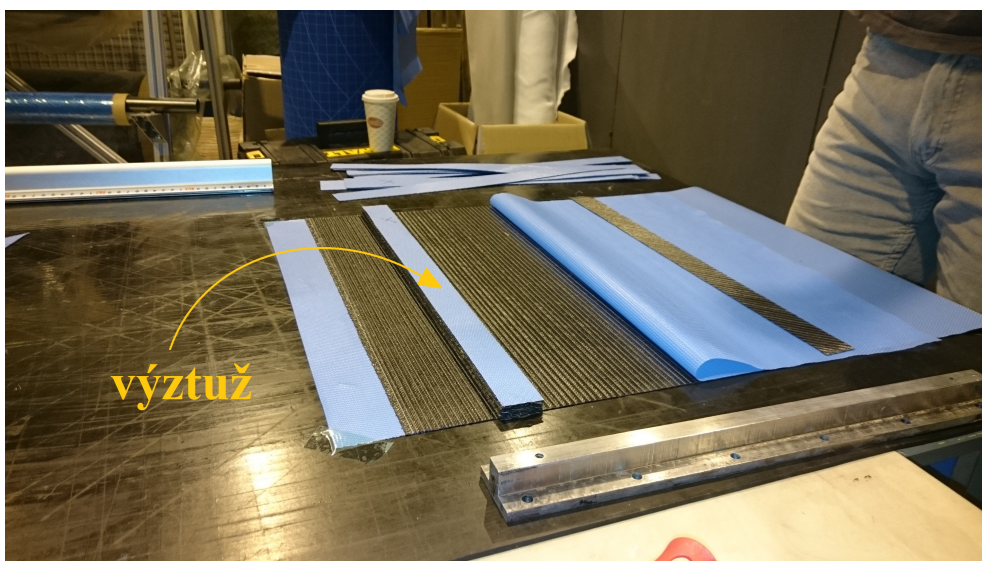


Obrázek 4.2: Orientace vláken pruhu určeného k vytvoření obalu součásti

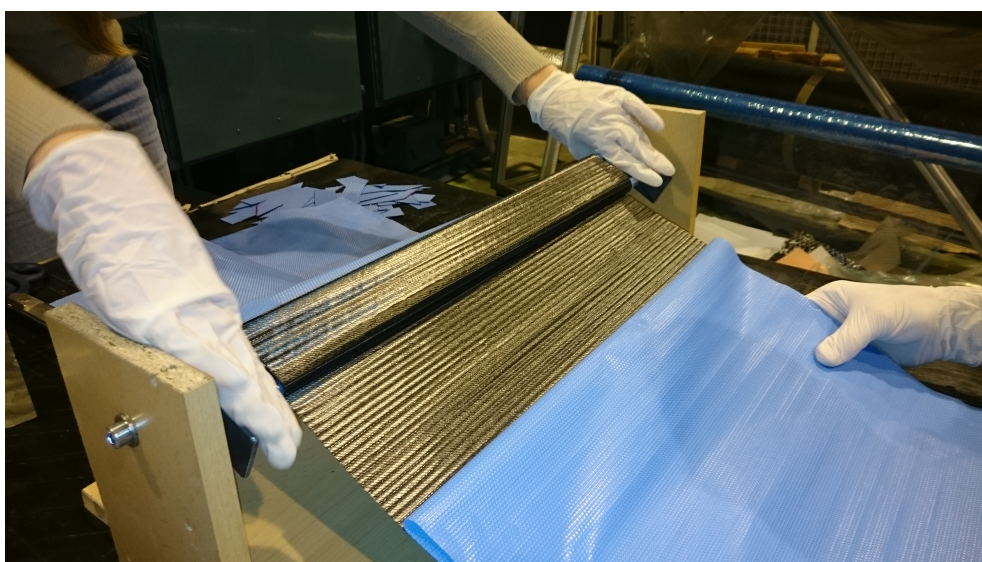


Obrázek 4.3: Orientace a způsob nařezání pruhů určených k vytvoření výztuže

Z části širokého pruhu byla sejmuta ochranná fólie a v tomto místě byly na sebe navrstveny všechny úzké proužky (viz obrázek 4.4). Takto vytvořená výztuž součásti byla vložena mezi dvě ocelové trubky, které byly upevněny v předem připraveném držáku. Trubky byly upevněny tak, aby mezi nimi byla stále stejná vzdálenost a bylo možné s nimi otáčet okolo osy rovnoběžné s trubkami a ležící ve středu mezi nimi. Následně byly trubky otáčeny kolem již zmíněné osy, čímž byly navíjeny jednotlivé vrstvy obalu (viz obrázek 4.5).

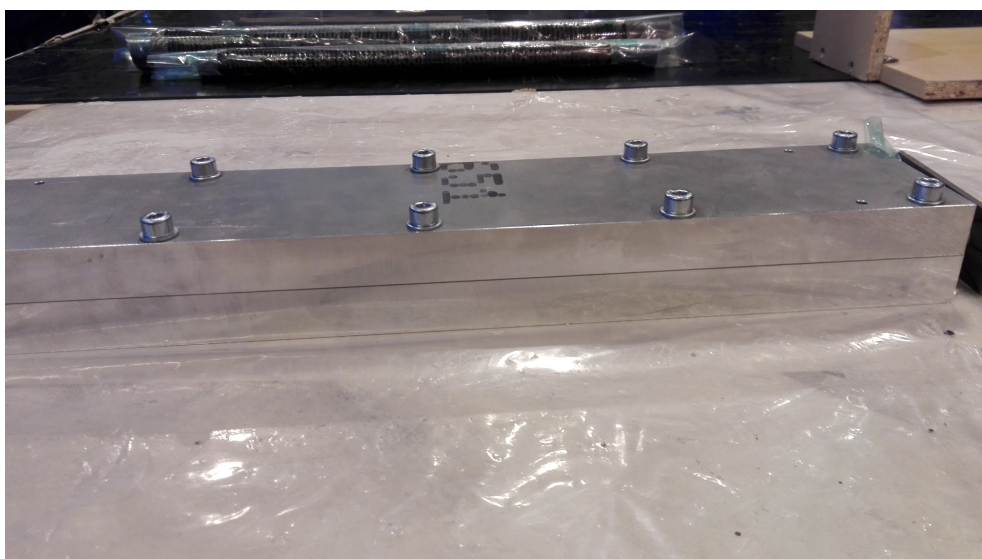


Obrázek 4.4: Vrstvení výztuže součásti



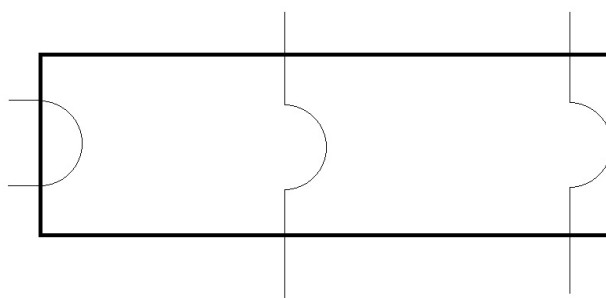
Obrázek 4.5: Vrstvení obalu součásti

Obě ocelové trubky byly předem důkladně vyčištěny a obaleny separační fólií, aby bylo možné je z vytvrzeného výrobku vyndat. Rovněž byly odstraněny všechny nečistoty z formy, do níž byl výrobek i s trubkami vložen. Forma byla navíc několikrát natřena separačním roztokem, jelikož mezi ní a výrobek nebyla dána žádná fólie. Po vložení výrobku do formy byly dotaženy šrouby uzavírající formu. Takto připravený výrobek byl dán na několik hodin do autoklávu, kde došlo k vytvrzení součásti.



Obrázek 4.6: Výrobek uzavřený ve formě

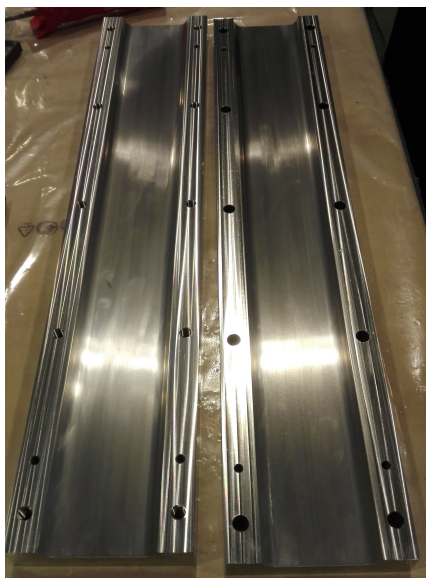
Po vyjmutí z autoklávu byla otevřena forma a vyndány trubky. V této fázi bylo zjištěno, že obalení trubek fólií bylo zřejmě zbytečné. Fólie snadnému vyndání trubek spíše bránila, než aby mu napomohla. Na závěr byl výrobek rozřezán (viz obrázek 4.7) a zabroušen.



Obrázek 4.7: Rozřezání výrobku

4.3 Forma

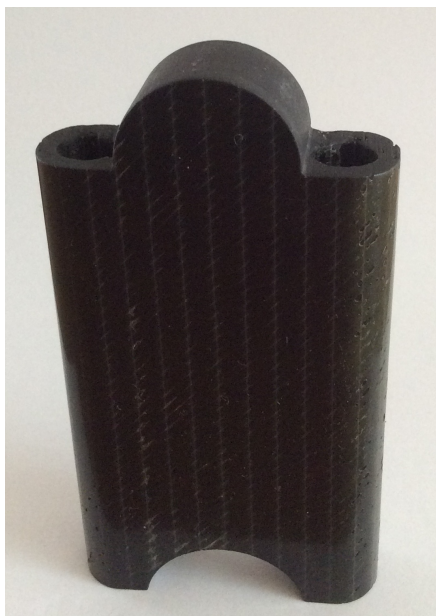
Forma byla vyrobena z hliníkové slitiny EN AW 6082. Vnitřní povrch formy byl vyfrézován na malou drsnost, aby během vytvrzování nedošlo k přilnutí formy a výrobku.



Obrázek 4.8: Otevřená forma

4.4 Vyrobená součást

Vytvořená součást je vyrobena z většího množství materiálu než je nutné, ale způsob výroby je jednoduchý. Hmotnost prototypu, který zvýší polohu hrazdy o 100 [mm], je 124,5 [g]. Při zmenšení množství materiálu, a tedy odlehčení výrobku by bylo zapotřebí výrobní postup změnit (viz kapitola 8.2).



Obrázek 4.9: Hotový prototyp zvyšovátka

Přípevnění prototypu na řídítka nebylo úplně jednoduché, jelikož i po úpravě z původního návrhu nebylo snadné šrouby do zvyšovátka vložit. To je způsobeno nepřesností ruční výroby, avšak i takto vyrobená součást je funkční a je tudíž možné ji používat (viz obrázek 4.10).



Obrázek 4.10: Součást namontovaná na kole

Kapitola 5

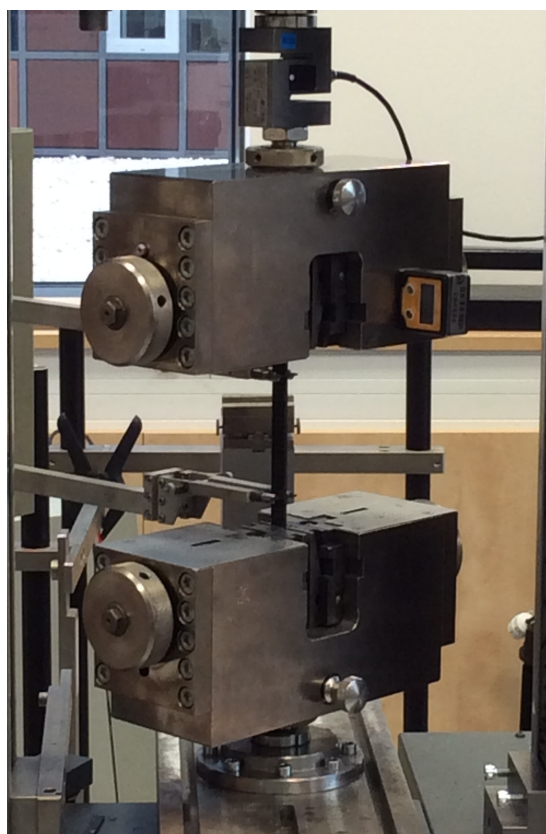
Stanovení materiálových parametrů

Tato kapitola pojednává o parametrech kompozitního materiálu použitého při výrobě a způsobu, kterým byly tyto parametry stanoveny. V závěru kapitoly jsou uvedeny parametry dalších materiálů použitých při vytváření konečnoprvkového modelu.

5.1 Kompozitní materiál

Parametry použitého kompozitního materiálu s biaxiálním uspořádáním uhlíkových vláken byly stanoveny pomocí výsledků z experimentu. Za účelem provedení experimentu byly vyrobeny čtyři různé desky, skládající se z deseti vrstev prepregu s různou orientací vláken. První dvě desky byly vytvořeny z vrstev se stejnou orientací. První vyrobená deska obsahuje vrstvy s orientací vláken 0° a 90° a druhá 45° a -45° . Druhé dvě desky se skládají z obou předchozích variant orientace vrstev. Třetí deska byla navrstvena následujícím způsobem: nejprve dvě vrstvy s orientací vláken 0° a 90° , poté šest s orientací vláken 45° a -45° a na závěr dvě vrstvy s orientací vláken 0° a 90° . Čtvrtá vytvořená deska obsahuje popořadě tři vrstvy s orientací vláken 45° a -45° , čtyři vrstvy s orientací vláken 0° a 90° a tři vrstvy s orientací vláken 45° a -45° .

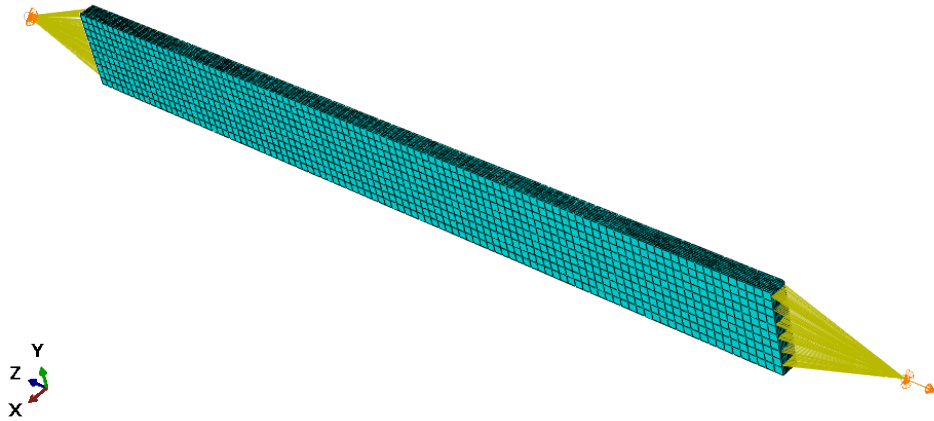
Z desek byly vyříznuty obdélníkové vzorky o velikosti 150×10 [mm] (z prvních dvou desek) resp. o velikosti 200×15 [mm] (z třetí a čtvrté desky). Vzorky byly upevněny do trhacího stoje (viz obrázek 5.1), tak že vzdálenost mezi čelistmi a tudíž zatěžovaná délka vzorku byla 100 [mm] (resp. 150 [mm]). Následně byla připnuta ramena extenzometru ve vzdálenosti 60 [mm] (resp. 100 [mm]) od sebe. V průběhu experimentu byly vzorky zatěžovány tahem v podélném směru až do porušení.



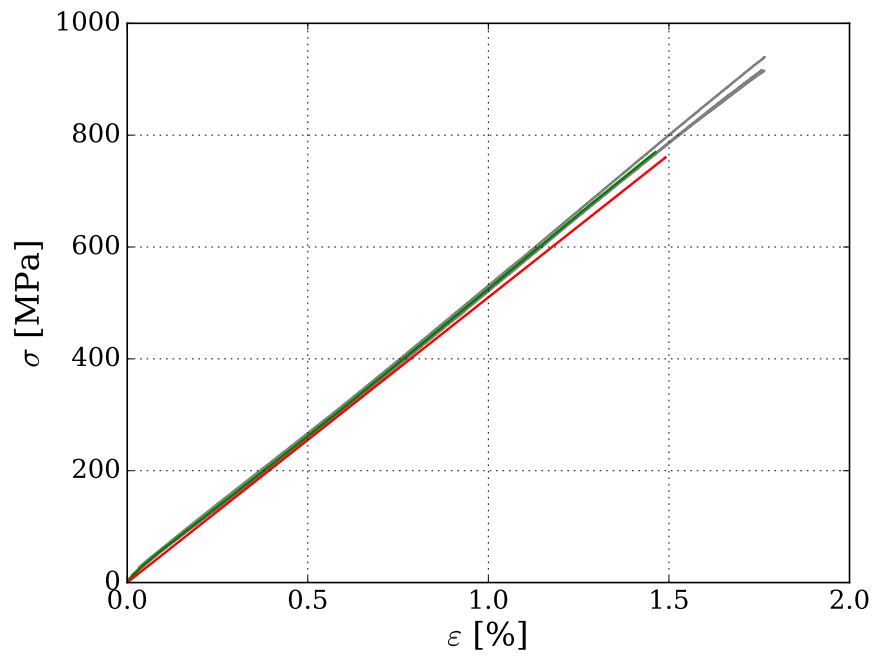
Obrázek 5.1: Vzorek kompozitního materiálu upevněný v trhacím stroji

Pro každou orientaci vláken byly změřeny čtyři vzorky a zaznamenány závislosti síly na posunutí, které byly převedeny na závislosti napětí σ na deformaci ϵ . Získaná data jsou zpracována v programu Python. Křivky získané experimentem jsou na obrázcích 5.3 – 5.6 znázorněny šedou barvou. Za výsledek experimentu lze považovat zelené křivky, což jsou průměrné křivky z experimentu.

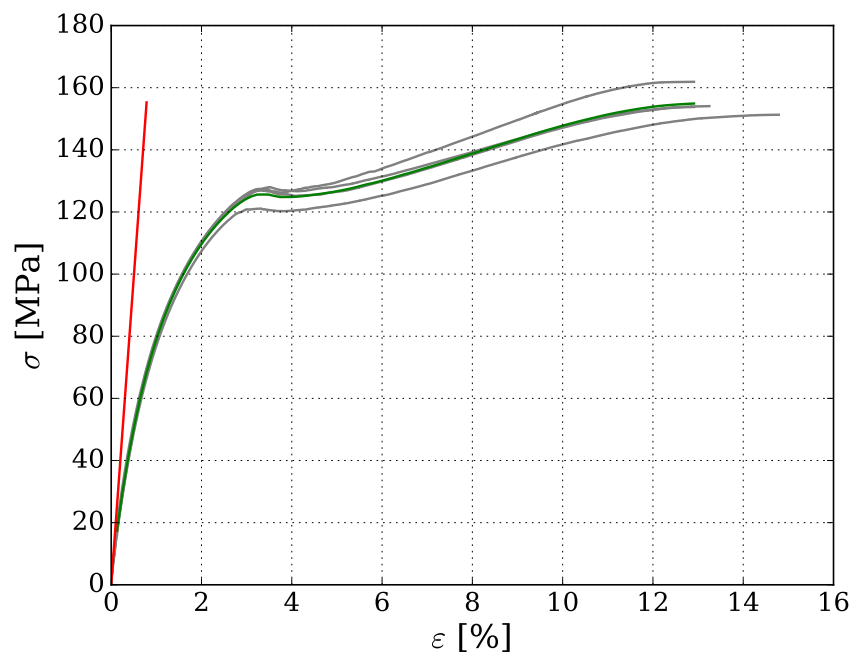
Červená křivka v obrázcích představuje výsledek získaný z modelu tahové zkoušky simulované v softwaru Abaqus. Model byl postaven automaticky s využitím programovacího jazyka Python. Uvedený software byl vybrán, jelikož je v něm Python dobře integrován a model vytvořený pomocí skriptu je parametrický, tudíž lze snadno měnit vstupní hodnoty.



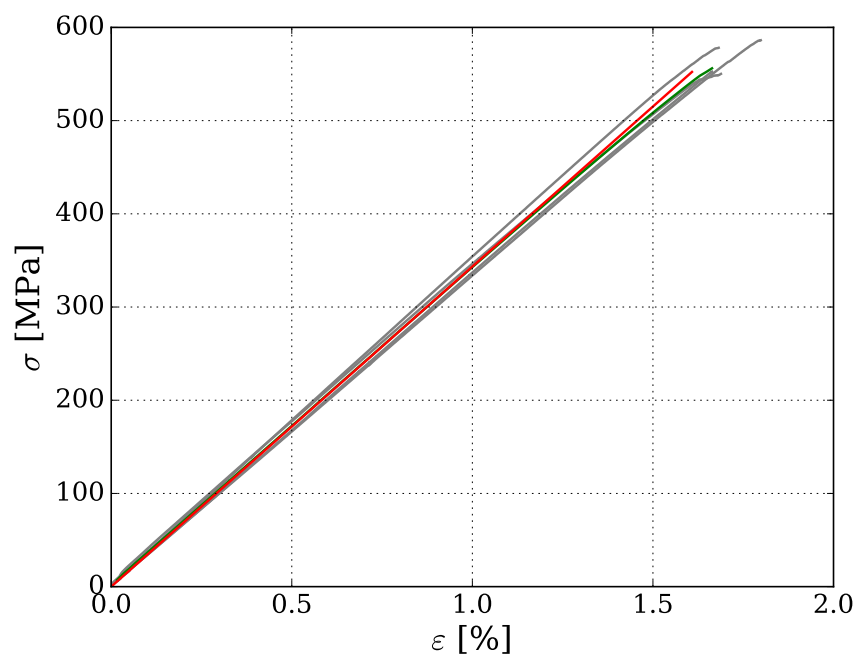
Obrázek 5.2: Model tahové zkoušky



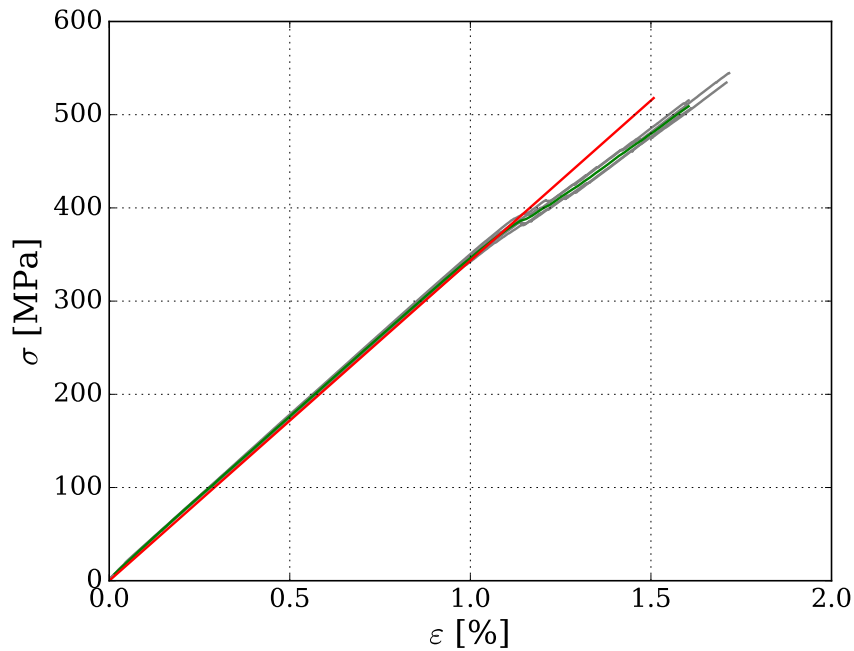
Obrázek 5.3: Graf závislosti napětí na deformaci pro vzorky z první desky (šedá – experiment, zelená – průměr z experimentu, červená – numerická analýza)



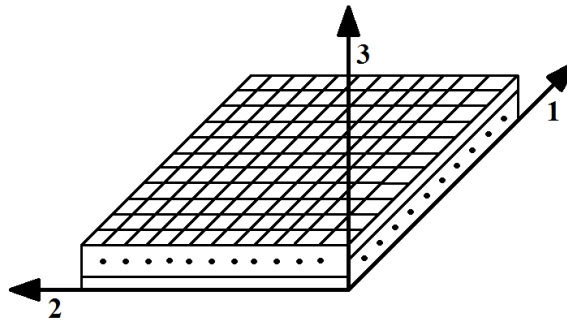
Obrázek 5.4: Graf závislosti napětí na deformaci pro vzorky z druhé desky (šedá – experiment, zelená – průměr z experimentu, červená – numerická analýza)



Obrázek 5.5: Graf závislosti napětí na deformaci pro vzorky ze třetí desky (šedá – experiment, zelená – průměr z experimentu, červená – numerická analýza)



Obrázek 5.6: Graf závislosti napětí na deformaci pro vzorky ze čtvrté desky (šedá – experiment, zelená – průměr z experimentu, červená – numerická analýza)



Obrázek 5.7: Označení směrů v kompozitu

Na obrázku 5.7 je znázorněno označení směrů pro použitý kompozitní materiál. Modul pružnosti E_1 ve směru 1 je stejný jako modul pružnosti E_2 ve směru 2, jelikož parametry materiálu jsou hledány pro jednu vrstvu prepregu. Z obrázku 5.3 je patrné, že závislost napětí na deformaci lze při namáhání vzorku tahem ve směru 1 považovat za lineární, proto je modul pružnosti E_1 stanoven pomocí vztahu:

$$E_1 = \frac{\sigma}{\epsilon}. \quad (5.1)$$

Ostatní parametry byly odhadnuty tak, aby rozdíl mezi výsledky z experimentu a z jeho modelu byl co možná nejmenší. Získané parametry daného kompozitního materiálu jsou uvedeny v tabulce 5.1.

Tabulka 5.1: Materiálové parametry kompozitu použitého při výrobě zvyšovátka¹

Modul pružnosti v tahu			Poissonovo číslo			Modul pružnosti ve smyku		
E_1	E_2	E_3^*	ν_{12}^*	ν_{13}^*	ν_{23}^*	G_{12}^*	G_{13}^*	G_{23}^*
[GPa]	[GPa]	[GPa]	[-]	[-]	[-]	[GPa]	[GPa]	[GPa]
51	51	5	0,1	0,25	0,25	6	1	1

Z výsledků experimentu byly stanoveny i meze pevnosti. Mez pevnosti v tahu ve směru 1 a 2 je $X_T = Y_T = 900$ [MPa] a mez pevnosti ve smyku v rovině 12 je $S_{12} = 75$ [MPa]. Mez pevnosti S_{12} byla určena ze smykového napětí v rovině 12 odečteného z konečnoprvkového modelu tahové zkoušky vzorku z druhé desky. Meze pevnosti materiálu použité při vyhodnocování výsledků z modelu zvyšovátka jsou uvedeny v tabulce 5.2. Hodnoty X_T , Y_T a S_{12} jsou poníženy, aby bylo dosaženo větší bezpečnosti. Ostatní hodnoty byly odhadnuty na základě znalosti pevností obdobných materiálů.

Tabulka 5.2: Meze pevnosti kompozitu použitého při výrobě zvyšovátka²

v tahu ve směru			v tlaku ve směru			ve smyku v rovině		
1	2	3	1	2	3	12	13	23
X_T	Y_T	Z_T^*	X_C^*	Y_C^*	Z_C^*	S_{12}	S_{13}^*	S_{23}^*
[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
800	800	30	450	450	100	60	60	60

5.2 Další použité materiály

Materiálem použitým v modelu zvyšovátka je kromě výše popsaného materiálu také hliník. Jedná se o homogenní, lineární, izotropní materiál s modulem pružnosti v tahu $E = 68,98$ [GPa] a Poissonovým číslem $\nu = 0.33$. K překročení meze kluzu materiálu nedojde, pokud Von Misesovo napětí vzniklé na součásti nepřekročí 210 [MPa].

¹Parametry označené * byly odhadnuty pomocí porovnání s podobným materiálem a materiálovými listy.

²Pevnosti označené * byly odhadnuty pomocí porovnání s podobným materiálem.

Kapitola 6

Materiálový model

Tato kapitola pojednává o modelech materiálů použitých v konečnoprvkové analýze. Hlavním použitým materiálem je uhlíkový kompozit, který má dvě navzájem kolmé roviny symetrie elastických vlastností (např. roviny 12 a 13), proto je možné jej označit za ortotropní materiál [14]. Dalším použitým materiálem je hliník, což je, jak bylo již dříve uvedeno, izotropní materiál.

6.1 Ortotropní materiál

Vlivem vnějšího zatížení vzniká v tělese napjatost. Stav napjatosti lze v každém bodě tělesa popsat pomocí tzv. tenzoru napětí, který je možné zapsat ve formě vektoru:

$$\boldsymbol{\sigma} = \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix}, \quad (6.1)$$

kde $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ jsou normálové složky napětí ve směrech 1, 2, 3 a $\sigma_4, \sigma_5, \sigma_6$ jsou smykové složky napětí v rovinách 12, 13 a 23. Při zatížení tělesa dochází k jeho deformaci, kterou je možné popsat pomocí tenzoru deformace. Vektorový tvar tohoto tenzoru je:

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{bmatrix}, \quad (6.2)$$

kde $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ jsou poměrná prodloužení ve směrech 1, 2, 3 a $\varepsilon_4, \varepsilon_5, \varepsilon_6$ jsou zkoso v rovinách 12, 13 a 23.

Vztah mezi napětím a deformací lze, za předpokladu lineárního elastického materiálu, vyjádřit pomocí zobecněného Hookeova zákona, jehož tvar pro ortotropní materiál je:

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{bmatrix}, \quad (6.3)$$

což je možné přepsat do tvaru:

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{C}\boldsymbol{\varepsilon}, \quad (6.4)$$

kde \mathbf{C} je matice tuhosti. Tato matice je symetrická, tudíž obsahuje celkem 9 nezávislých prvků.

Inverzní tvar rovnice (6.4) je:

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{C}^{-1}\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{S}\boldsymbol{\sigma}, \quad (6.5)$$

kde \mathbf{S} je tzv. matice poddajnosti. S využitím faktu, že i tato matice je symetrická a s použitím v předchozí kapitole určených materiálových parametrů, lze matici poddajnosti napsat ve tvaru:

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} 1/E_1 & -\nu_{12}/E_1 & -\nu_{13}/E_1 & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{12}/E_1 & 1/E_2 & -\nu_{23}/E_2 & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{13}/E_1 & -\nu_{23}/E_2 & 1/E_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/G_{12} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{13} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{23} \end{bmatrix}. \quad (6.6)$$

Výše uvedený materiálový model použitého materiálu je možné zjednodušit dosazením následujících rovností do (6.6):

$$E_1 = E_2, \quad \nu_{13} = \nu_{23}, \quad G_{13} = G_{23}. \quad (6.7)$$

6.1.1 Kritérium maximálního napětí

Jedná se o pevnostní kritérium, které vychází z rozšířených a upravených podmínek pevnosti pro homogenní lineární izotropní materiál. Předpokládá se, že materiál je homogenní, nebo-li že se nerozlišuje vlákno a matrice, a uvažuje se lineární průběh napětí až do okamžiku porušení materiálu. O porušení materiálu rozhoduje velikost jednotlivých složek napětí.

K porušení materiálu podle kritéria maximálního napětí dojde tehdy, nesplní-li některé z výše uvedených napětí jednu z následujících dvanácti podmínek:

$$\begin{aligned} -X_C &< \sigma_1 < X_T, \\ -Y_C &< \sigma_2 < Y_T, \\ -Z_C &< \sigma_3 < Z_T, \\ -S_{12} &< \sigma_4 < S_{12}, \\ -S_{13} &< \sigma_5 < S_{13}, \\ -S_{23} &< \sigma_6 < S_{23}. \end{aligned} \quad (6.8)$$

Nevýhodou tohoto kritéria je, že je neinteraktivní, což znamená, že neexistují žádné vazby mezi normálovými a smykovými složkami napětí. Při jednoosém namáhání to nemá vliv, ale při víceosém namáhání je třeba na tento nedostatek brát zřetel.

Při vyhodnocování výsledků z konečnoprvkové analýzy bylo kritérium upraveno tak, že hodnota napětí byla podělena příslušnou mezí pevnosti. K porušení materiálu tudíž nedojde, náleží-li takto získaná hodnota intervalu $\langle -1, 1 \rangle$.

6.1.2 Tsai-Wu kritérium

Pevnostní kritérium Tsai-Wu vychází z Goldenblattovy a Kopnovovy teorie zabývající se porušením materiálu při obecném stavu napjatosti. Tsai a Wu navrhli k posouzení pevnosti materiálu následující polynom:

$$F_i \sigma_i + F_{ij} \sigma_i \sigma_j = 1, \quad i, j = 1, 2, \dots, 6, \quad (6.9)$$

kde σ_i a σ_j jsou popořadě normálová napětí ve směrech 1, 2, 3 a smyková napětí v rovinách 12, 13 a 23. Parametry F_i a F_{ij} je možné určit pomocí experimentem stanovených pevností pro jednotlivé způsoby zatěžování. Pro ortotropní materiál je možné přepsat výraz (6.9) do tvaru [15]:

$$F_1 \sigma_1 + F_2 \sigma_2 + F_3 \sigma_3 + F_4 \sigma_4 + F_5 \sigma_5 + F_6 \sigma_6 + F_{11} \sigma_1^2 + F_{22} \sigma_2^2 + F_{33} \sigma_3^2 + F_{44} \sigma_4^2 + F_{55} \sigma_5^2 + F_{66} \sigma_6^2 + 2F_{12} \sigma_1 \sigma_2 + 2F_{13} \sigma_1 \sigma_3 + 2F_{23} \sigma_2 \sigma_3 = 1, \quad (6.10)$$

$$F_1 = \frac{1}{X_T} - \frac{1}{X_C}, \quad F_2 = \frac{1}{Y_T} - \frac{1}{Y_C}, \quad F_3 = \frac{1}{Z_T} - \frac{1}{Z_C}, \\ F_4 = F_5 = F_6 = 0,$$

$$F_{11} = \frac{1}{X_T X_C}, \quad F_{22} = \frac{1}{Y_T Y_C}, \quad F_{33} = \frac{1}{Z_T Z_C}, \\ F_{44} = \frac{1}{S_{12}^2}, \quad F_{55} = \frac{1}{S_{13}^2}, \quad F_{66} = \frac{1}{S_{23}^2}. \quad (6.11)$$

Parametry F_{12} , F_{13} a F_{23} lze určit pomocí ekvibiaxiálních testů, jejichž provedení je poměrně náročné, proto byly při posuzování výsledků ve vztahu (6.10) zanedbány výrazy obsahující tyto parametry.

K porušení materiálu podle kritéria Tsai-Wu dojde v případě, je-li hodnota polynomu větší nebo rovna 1.

6.2 Izotropní materiál

Matici tuhosti a matice poddajnosti izotropního materiálu je možné stanovit z matic platných pro ortotropní materiál s přihlédnutím k následujícím rovnostem, které platí pro izotropní materiál:

$$\begin{aligned} E_1 &= E_2 = E_3 = E, \\ \nu_{12} &= \nu_{13} = \nu_{23} = \nu, \\ G_{12} &= G_{13} = G_{23} = \frac{E}{2(1+\nu)}. \end{aligned} \tag{6.12}$$

Matrice tuhosti \mathbf{C} a matice poddajnosti \mathbf{S} izotropního materiálu mají potom tvar:

$$\begin{aligned} \mathbf{C} &= \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{11} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{12} & C_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2}(C_{11} - C_{12}) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2}(C_{11} - C_{12}) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2}(C_{11} - C_{12}) \end{bmatrix}, \\ \mathbf{S} &= \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{12} & 0 & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{11} & S_{12} & 0 & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{12} & S_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2(S_{11} - S_{12}) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2(S_{11} - S_{12}) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2(S_{11} - S_{12}) \end{bmatrix}, \end{aligned} \tag{6.13}$$

kde prvky těchto matic lze určit pomocí materiálových parametrů jako:

$$\begin{aligned} C_{11} &= \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)}, & C_{12} &= \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}, \\ S_{11} &= \frac{1}{E}, & S_{12} &= -\frac{\nu}{E}. \end{aligned} \tag{6.14}$$

Kapitola 7

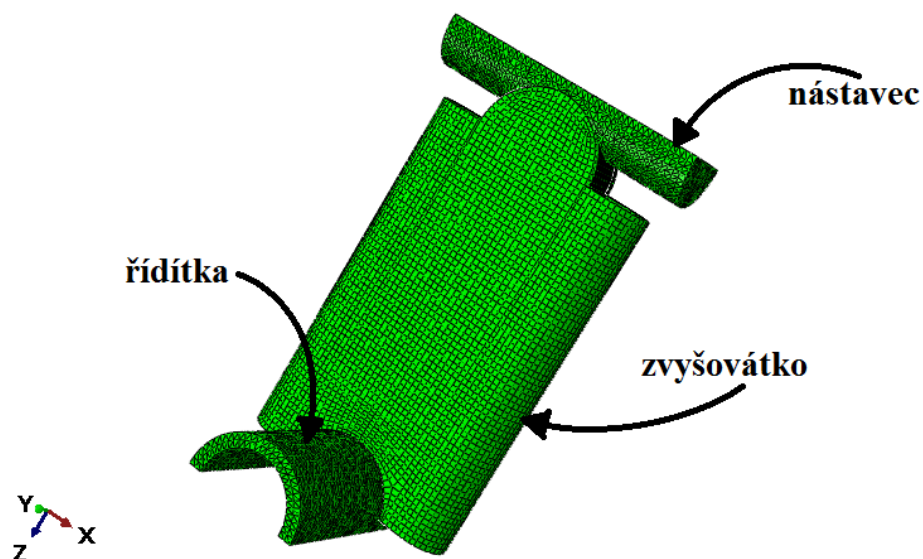
Konečnoprvkový model součásti

Model zvyšovátka je stejně jako model tahové zkoušky vytvořen pro konečnoprvkové analýzy v softwaru Abaqus pomocí skriptu v jazyce Python. Také v tomto modelu lze snadno měnit vstupní hodnoty. Navrhovaná součást je modelována jako 3D objekt a je modelována celá, ne jen její část, ač se jedná o součást symetrickou, protože silové účinky na ní působící, symetrické nejsou.

7.1 Popis modelu

Zvyšovátko je modelováno po jednotlivých vrstvách (jedna vrstva elementů odpovídá jedné vrstvě prepregu), každá vrstva je vytvořena zvlášť jako samostatné těleso a s ostatními následně spojena pomocí constraintu typu tie do jedné soustavy. Funkce tohoto constraintu byla otestována. Constraint typu tie byl zvolen, jelikož změna z něj na kohezivní kontakt, který více odpovídá reálnému stavu, je triviální. Zmíněný kontakt nebyl využit při výpočtech, jelikož zatím nebyly určeny vlastnosti materiálu potřebné pro užití tohoto kontaktu.

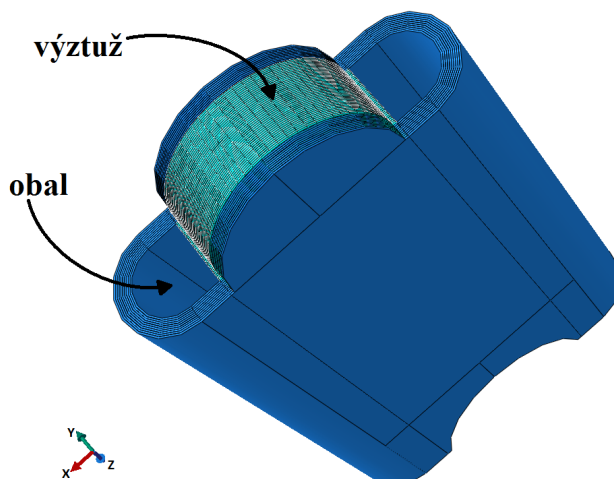
K soustavě jsou přidány ještě dvě další části reprezentující řídkovou tyč a nástavec (viz obrázek 7.1). Řídkka jsou se zvyšovátkem propojena kontaktem typu hard, který zabraňuje pronikání těles do sebe, ale umožňuje pohyb po dotykových plochách s daným koeficientem tření. Stejný kontakt propojuje také zvyšovátko s nástavcem.



Obrázek 7.1: Model soustavy

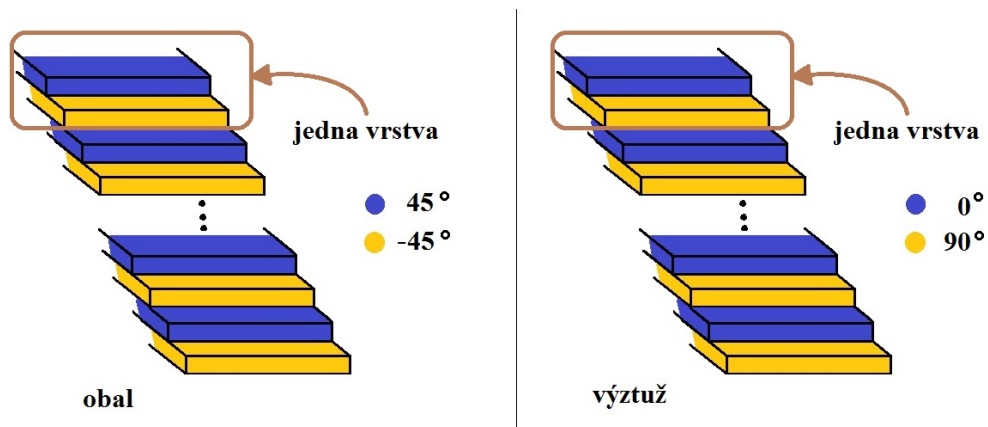
Z řídítek je modelována pouze polovina trubky, na níž dosedá navrhovaná součást. Při modelování celé řídítkové trubky by bylo zapotřebí modelovat také objímku, což by nejen prodloužilo dobu trvání výpočtu (větší počet elementů), ale také by způsobilo komplikace s definováním zatížení od šroubů. Stejně tak i z nástavce je modelována jen část, která leží na zvyšovátku. Síly působící na nástavec mimo modelovanou část jsou s ní spojeny vazbami typu coupling, které vhodně přenášejí silové účinky, což bylo ověřeno.

Vrstvy zvyšovátka lze rozdělit na vrstvy výztuže a vrstvy obalu (viz obrázek 7.2). Vrstvy výztuže jsou všechny stejné. Vrstvy obalu se s každou vrstvou zmenšují, aby zapadly jedna do druhé. To zcela přesně neodpovídá obalovým vrstvám ve vyrobené součásti, které byli navíjeny bez přerušení po navinutí jedné vrstvy, aby nedocházelo k porušení v místě spoje.



Obrázek 7.2: Geometrie vrstev

K jednotlivým vrstvám jsou přiřazeny stejné materiálové parametry (viz tabulka 5.1), ale orientace vláken vrstev výztuže a obalu je různá (viz obrázek 7.3). Orientace vrstev výztuže je 0° a obalu 45° .

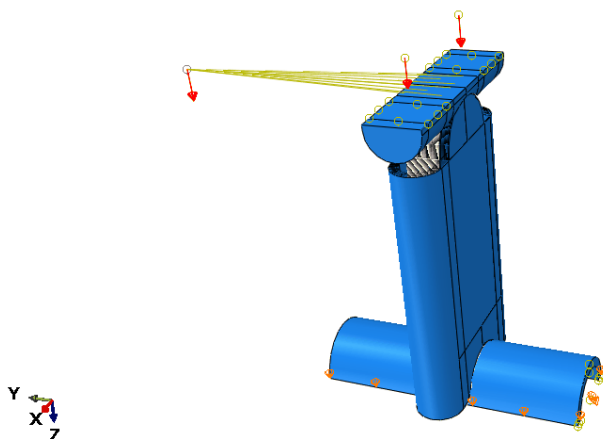


Obrázek 7.3: Orientace vrstev

V modelu použité okrajové podmínky jsou znázorněny v obrázcích 7.4 a 7.5. Řídková tyč je ukotvena zamezením posuvu ve směru osy z v rovině řezu a ve zbývajících dvou směrech v místě upevnění tyče do představce kola.

7.1.1 Varianta zatížení 1

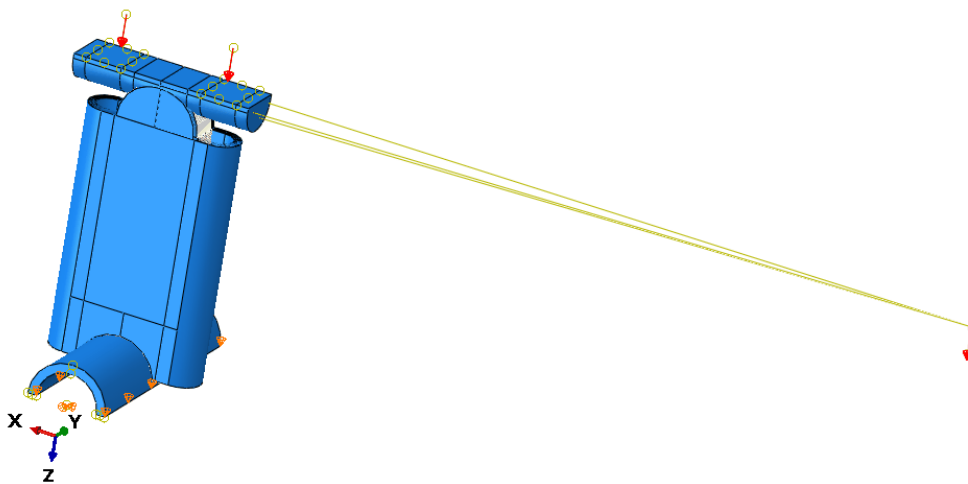
V průběhu výpočtu je nejprve zatížen nástavec silami F_s ve směru osy z , které odpovídají utažení šroubů. Posléze na soustavu působí i síla vyvolaná opřením člověka do podpěrky, jež je reprezentována osamělou silou působící ve stejném směru.



Obrázek 7.4: Model varianty 1

7.1.2 Varianta zatížení 2

Zatížení silami F_s je zachováno i v této variantě. Místo síly vyvolané opřením člověka o lokty působí ve variantě 2 na soustavu síla vyvolaná opřením o dlaně v přední části nástavce. Také tato síla je modelována jako osamělá síla působící ve směru osy z (viz obrázek 7.5).



Obrázek 7.5: Model varianty 2

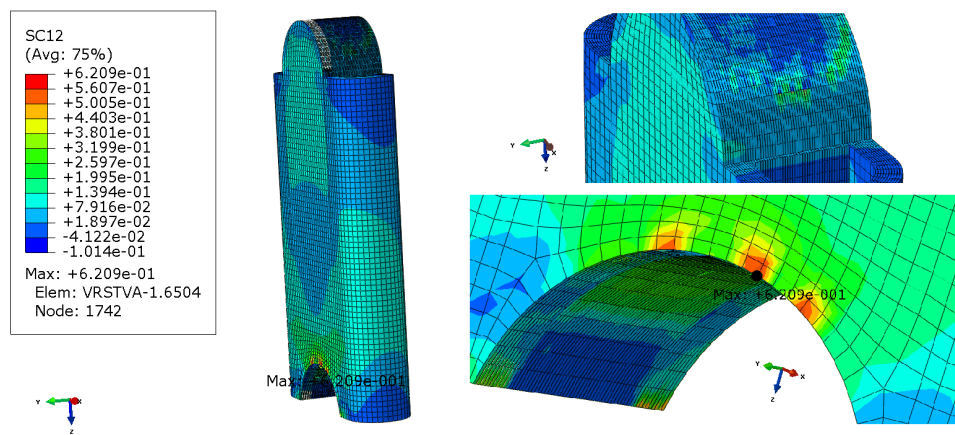
Kapitola 8

Dimenzování

Dimenzování navrhované součásti je provedeno pomocí pevnostního vyhodnocení výsledků získaných konečnoprvkovou analýzou dříve popsaného modelu zvyšovátka. Pevnostních kritérií existuje pro kompozitní materiály několik, ale žádné z nich není univerzální. Vhodnou pevnostní podmínku je třeba zvolit podle druhu materiálu a typu namáhání. Pevnost součásti je v této práci posouzena dvěma různými dříve uvedenými kritérii: kritériem maximálního napětí a Tsai-Wu kritériem.

8.1 Dimenzování průřezu součásti

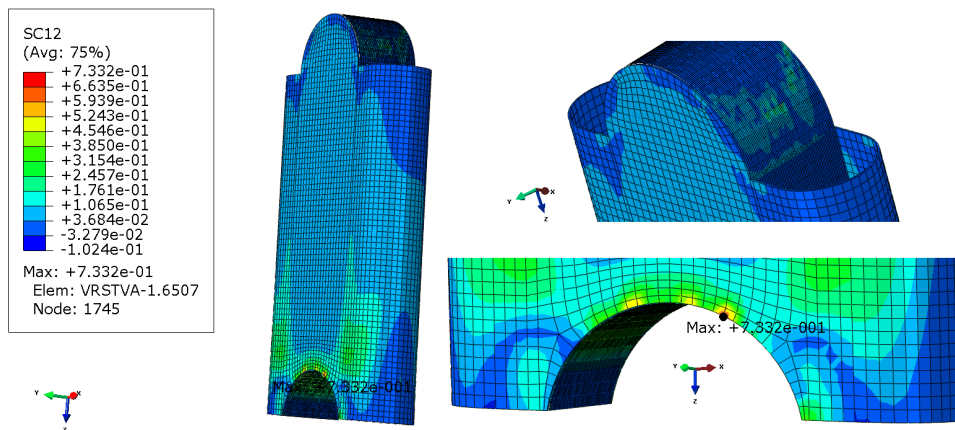
Nejprve byl proveden výpočet pro vyrobenou součást. Po provedení výpočtu bylo zjištěno, že napětí na součásti je vždy největší při první variantě zatížení součásti. Nejpřísnějším kritériem pro model vyrobené součásti je kritérium maximálního smykového napětí v rovině 12, jehož výsledky jsou znázorněny na obrázku 8.1.



Obrázek 8.1: Výsledky z modelu vyrobené součásti zpracované pomocí kritéria maximálního smykového napětí v rovině 12

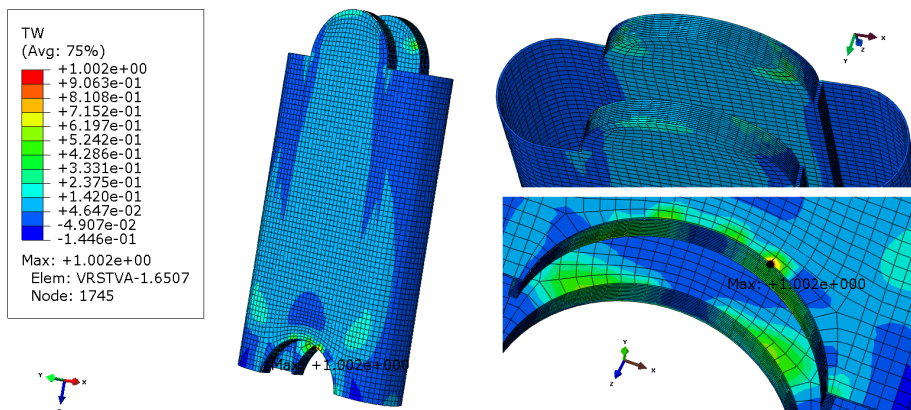
Hodnota maximálního smykového napětí v rovině 12 poděleného mezním smykovým napětím S_{12} je 0,62 (extrapolovaná a zprůměrovaná), což je výrazně menší než jedna. Z toho důvodu by k porušení nemělo podle výpočtů dojít, dokonce je možné odebrat některé vrstvy.

Při prvním pokusu o dimenzování zvyšovátka byla z modelu vyrobené součásti ponechána jen jedna vrstva obalu. Také pro tento model je nejpřísnější pevnostní podmínkou kritérium maximálního smykového napětí v rovině 12. Hodnota podílu vypočítaného a mezního napětí je 0,73 (extrapolovaná a zprůměrovaná), což není oproti předchozímu modelu příliš velký rozdíl, jelikož nebyly odebrány nosné vrstvy.



Obrázek 8.2: Výsledky z modelu součásti s jednou vrstvou v obalu zpracované pomocí kritéria maximálního smykového napětí v rovině 12

Následně byly z modelu odebrány vrstvy výstuže, dokud nebyla nalezena varianta, kdy některá z používaných podmínek pevnosti přesáhne hodnotu 1. Tento mezní stav nastal při vyhodnocování výsledků pomocí kritéria Tsai-Wu, kdy z výstuže bylo odebráno 34 vrstev, nebo-li když je tloušťka zvyšovátka v nejširším místě 3,9 [mm]. Zmíněná tloušťka zvyšovátka přibližně odpovídá analytickému výpočtu, jelikož odebráním další vrstvy by tloušťka klesla na 3,6 [mm], což je méně než analyticky vypočítaná minimální hodnota.

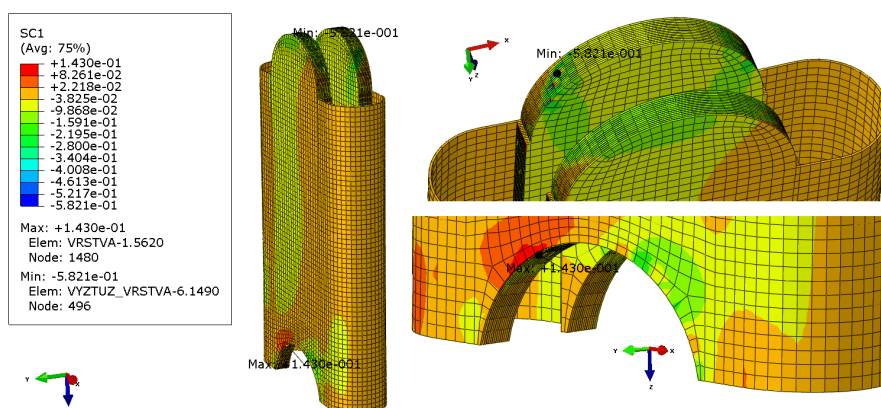


Obrázek 8.3: Výsledky z modelu součásti s jednou vrstvou v obalu a odebranými 34 vrstvami výstuže zpracované pomocí kritéria Tsai-Wu

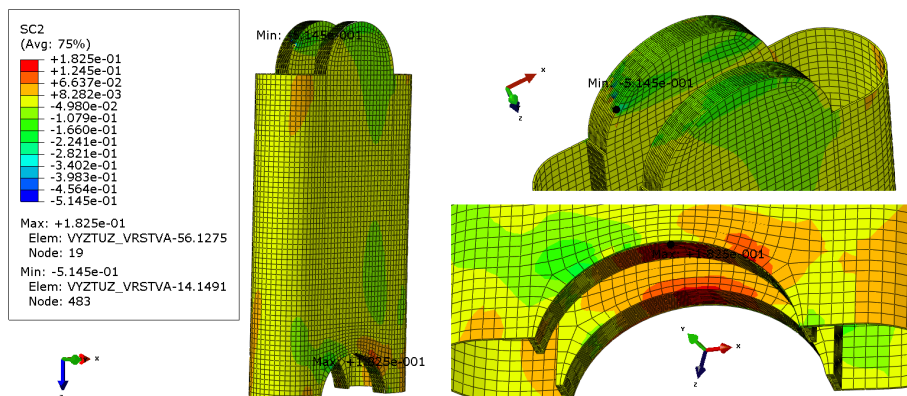
Maximální hodnota Tsai-Wu kritéria 1,00 uvedená v obrázku 8.3 není maximální hodnotou vypočítanou v některém z integračních bodů modelu, ale hodnotou upravenou s ohledem na

hodnoty v ostatních integračních bodech prvku a v okolních prvcích (extrapolace a průměrování). Největší hodnota, vypočítaná v integračním bodě jednoho z prvků nacházejícího se v okolí míst s největšími hodnotami znázorněnými v obrázku 8.3 teplými barvami, je 0,81.

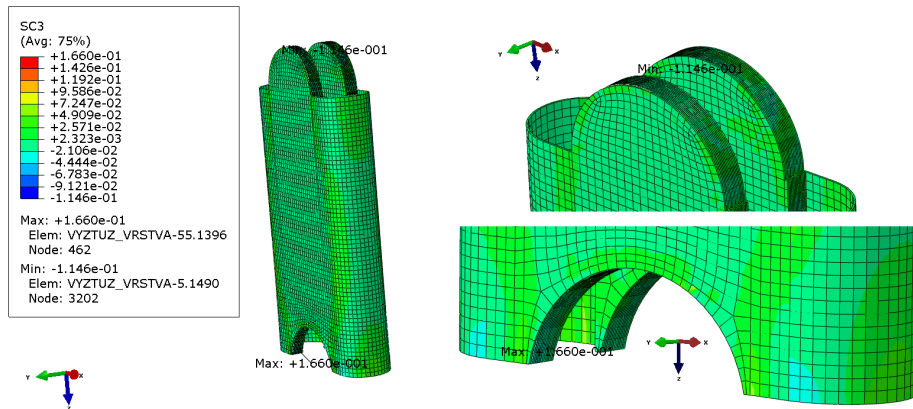
Za model optimální součásti je z opatrnosti zvolen model, kde je odebráno jen 30 vrstev výstuže, jelikož ani jedno z použitých kritérií, stejně jako celý model, není ideální. Výsledky získané pro takto upravenou součást při první variantě zatížení jsou znázorněny na obrázcích 8.4 – 8.10. Vybrané výsledky pro druhou variantu zatížení jsou znázorněny na obrázcích 8.11 a 8.12. Hmotnost takto upraveného zvyšovátka je pak 50 [g], což je méně než polovina z hmotnosti vyrobeného prototypu.



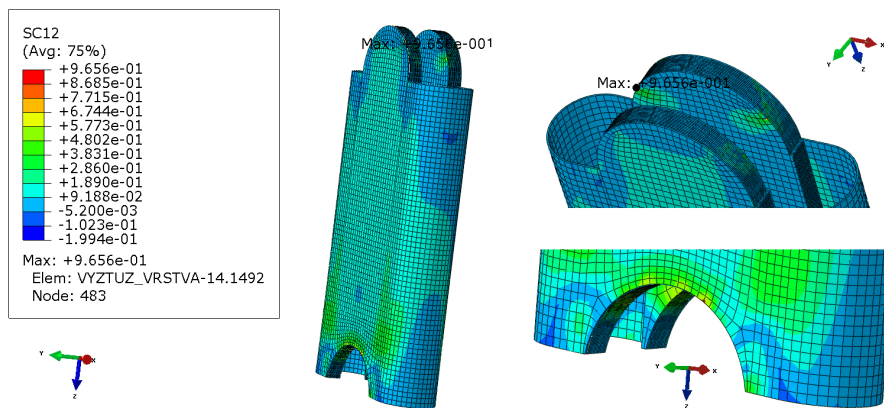
Obrázek 8.4: Výsledky z modelu optimální součásti zpracované pomocí kritéria maximálního normálového napětí ve směru 1



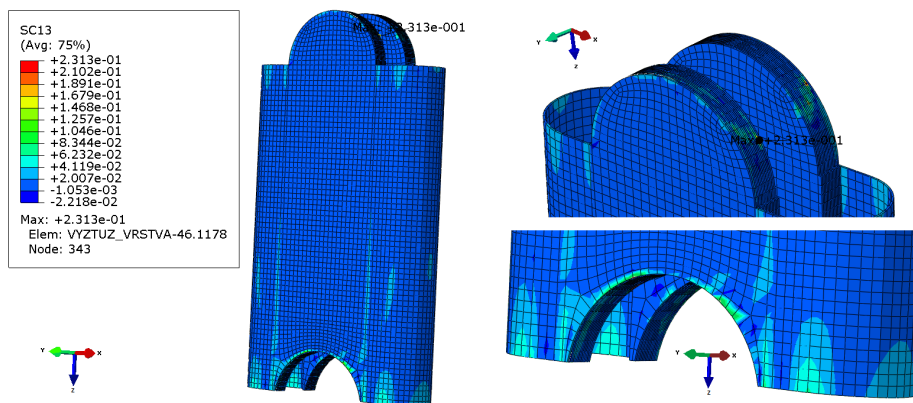
Obrázek 8.5: Výsledky z modelu optimální součásti zpracované pomocí kritéria maximálního normálového napětí ve směru 2



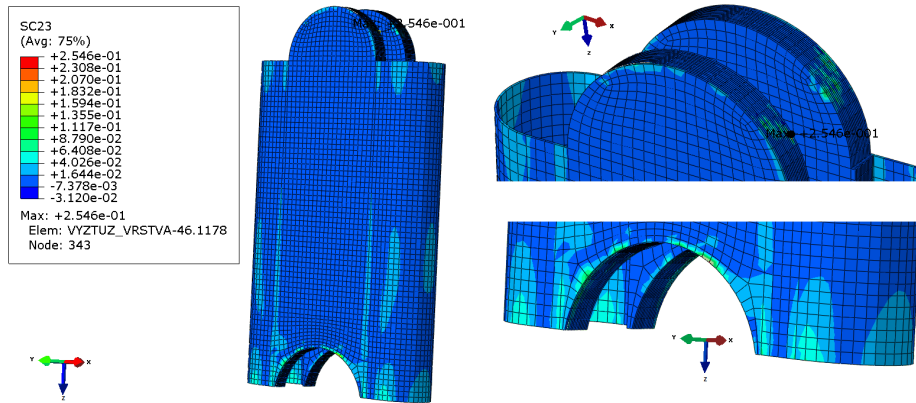
Obrázek 8.6: Výsledky z modelu optimální součásti zpracované pomocí kritéria maximálního normálového napětí ve směru 3



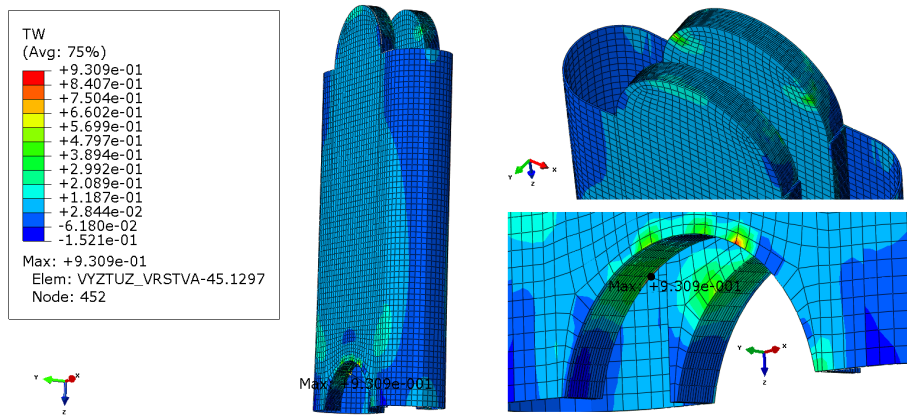
Obrázek 8.7: Výsledky z modelu optimální součásti zpracované pomocí kritéria maximálního smykového napětí v rovině 12



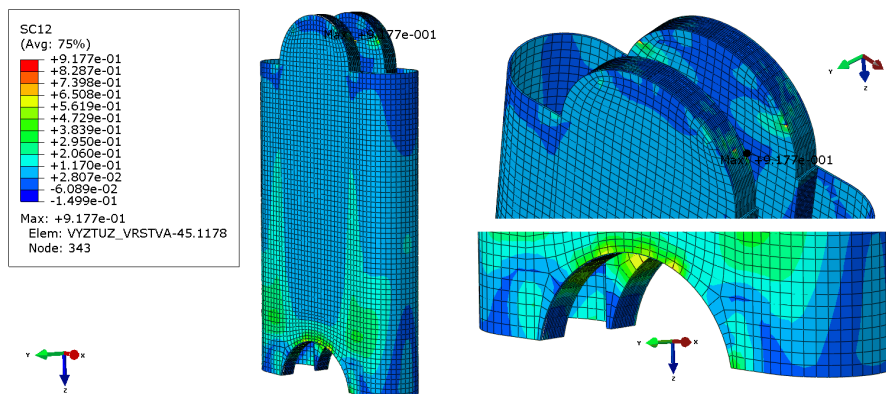
Obrázek 8.8: Výsledky z modelu optimální součásti zpracované pomocí kritéria maximálního smykového napětí v rovině 13



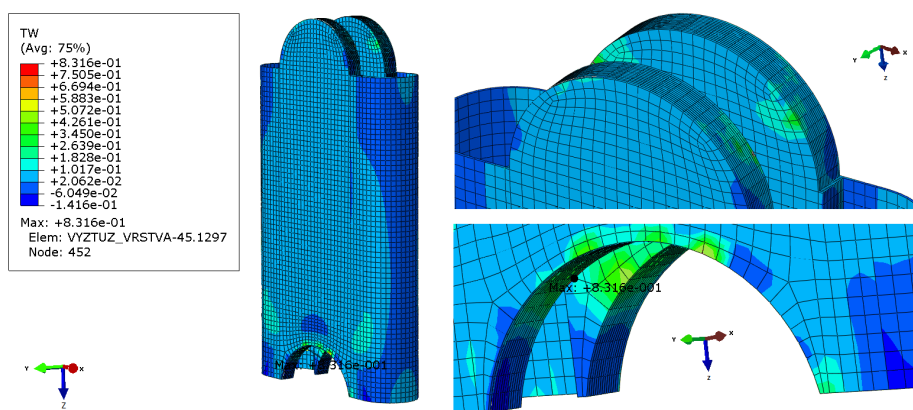
Obrázek 8.9: Výsledky z modelu optimální součásti zpracované pomocí kritéria maximálního smykového napětí v rovině 23



Obrázek 8.10: Výsledky z modelu optimální součásti zpracované pomocí kritéria Tsai-Wu



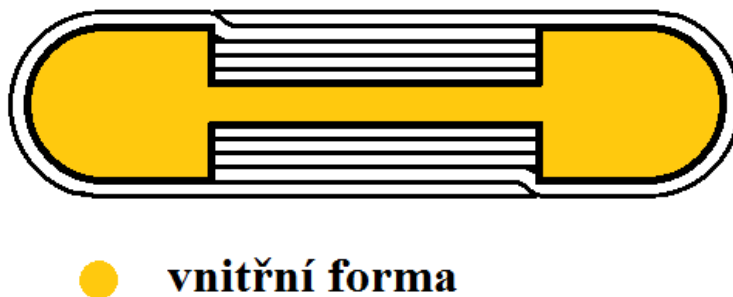
Obrázek 8.11: Výsledky z modelu optimální součásti při variantě zatížení 2 zpracované pomocí kritéria maximálního smykového napětí v rovině 12



Obrázek 8.12: Výsledky z modelu optimální součásti při variantě zatížení 2 zpracované pomocí kritéria Tsai-Wu

8.2 Navržení postupu výroby optimální součásti

Upravené zvyšovátko, vyhodnocené jako optimální, lze vyrobit následujícím způsobem. Místo ocelových trubek, okolo nichž byly navíjeny jednotlivé vrstvy obalu, je možné vyrobit vnitřní formu, na niž by se kladly jednotlivé vrstvy výztuže i obalu (viz. obrázek 8.13). Aby nebyla cena vnitřní formy příliš vysoká, bylo by možné ji vyrobit např. z polystyrenu.



● **vnitřní forma**

Obrázek 8.13: Vrstvení prepregu při výrobě optimalizované součásti

Jinou možností je zvyšovátko vyrobit pultruzí, což by bylo vhodné při sériové výrobě. Před zavedením sériové výroby by bylo zapotřebí ověřit, zda je jedna obalová vrstva dostatečná, aby nedošlo k jejímu poškození na příklad stisknutím zvyšovátko v ruce.

Závěr

Tato práce se zabývá návržením součásti, sloužící k vertikální korekci triatlonových řídítek. Zájem závodníků o takovou součást dokládá fakt, že dva měsíce před odevzáním práce se na trhu objevila tzv. redukce výšky od renomovaného výrobce. Jedná se o hliníkový nástavec, mající stejnou funkci jako navrhovaná součást.

Před návržením prototypu byla provedena rešerše v oblasti triatlonových řídítek. Bylo zjištěno jaká řídítka se v současné době vyrábějí a jaké normy by měla splňovat. Dále bylo stanoveno namáhání navrhované součásti, ke kterému dochází v průběhu jízdy na kole. S využitím těchto znalostí byla provedena analytická rozvaha, z níž byl stanoven tvar průřezu součásti použitý při výrobě. Prototyp byl namontován na kolo a otestován při jízdě, která proběhla bez obtíží.

Společně s prototypem byly ze stejného kompozitního materiálu vyrobeny i materiálové vzorky, které byly použity ke stanovení materiálových parametrů. Ty byly identifikovány z výsledků z tahové zkoušky a konečnoprvkové analýzy modelu tohoto testu. Důvodem jejich hledání byla potřeba vstupních parametrů do konečnoprvkového modelu součásti sloužícího k nalezení optimálního počtu vrstev prepregu, z nichž by měla být součást vyrobena. Všechny konečnoprvkové modely byly sestaveny s využitím softwarů Python a Simulia ABAQUS.

Optimální součást, stanovená pomocí pevnostních kritérií maximálního napětí a Tsai-Wu, obsahuje jednu obalovou vrstvu a čtrnáct vyztužovacích vrstev na každé straně. Model použitý při hledání optimálního řešení není ideální. K jeho zlepšení by přispělo provedení dalších experimentů, jejichž výsledkem by bylo např. zpřesnění používaných materiálových parametrů, zjištění parametrů potřebných k začlenění delaminace mezi jednotlivé vrstvy do modelu, na což je model připraven. Model je také připraven na změnu materiálu či změnu skladby a tloušťky vrstev. Na závěr byl navržen postup jak by bylo možné součást, vyhodnocenou pomocí použitých kritérií za optimální, vyrobit.

Literatura

- [1] Cervélo, Cervélo P5X Personal Best, 2016.
<https://p5x.cervelo.com/>
- [2] Triatlet shop, PROFILE DESIGN Volna.
<http://www.competitionsport.cz/PROFILE-DESIGN-Volna-d597.htm>
- [3] Tomáš Mika, Triatlonová rídítka, aneb jaký typ zvolit?, 2015.
<http://www.tomasmika.com/triatlonova-riditka-aneb-jaky-tyt-zvolit/>
- [4] Triatlet shop, PROFILE DESIGN Aeria.
<http://www.competitionsport.cz/PROFILE-DESIGN-Aeria-d596.htm?tab=description>
- [5] Norma: ČSN EN ISO 4210-2, Jízdní kola - Bezpečnostní požadavky na jízdní kola - Část 2: Požadavky na městská a trekkingová kola, na kola pro mladé lidi, na horská a závodní kola - část 4.7.1, 2015
- [6] Norma: ČSN EN ISO 4210-2, Jízdní kola - Bezpečnostní požadavky na jízdní kola - Část 2: Požadavky na městská a trekkingová kola, na kola pro mladé lidi, na horská a závodní kola - část 4.7.5, 2015
- [7] Norma: ČSN EN ISO 4210-5, Jízdní kola - Bezpečnostní požadavky na jízdní kola - Část 5: Zkušební metody pro řízení - část 4.8, 2015
- [8] Patobiomechanika a patokinesiologie KOMPEDIUM, Biomechanika – geometrie hmotností lidského těla.
<http://biomech.ftvs.cuni.cz/pbpk/kompedium/biomechanika/images/BT12-1.gif>
- [9] Jan Válek a Petr Sládek, Fyzik cyklista, 2013.
<http://vnuf.cz/sbornik/prispevky/18-29-Valek.html>
- [10] IKOS – znalecká kancelář, Metodická pomůcka k řešení nehody s účastí cyklistů.
<http://www.crash.cz/ke-stazeni>
- [11] E-konstrukter, Praktické informace, 2014.
<http://e-konstrukter.cz/prakticka-informace>
- [12] Technické výpočty, Utahovací moment šroubu – analytické výpočty, 2015.
www.technickevypocty.cz/index.php?option=com_content&view=article&id=5:utahovaci-moment-roubu&catid=1:analyticke-vypoty&Itemid=7
- [13] Jiří Podešva, Základy mechaniky – studijní materiály, Technická univerzita Ostrava.
http://www.elearn.vsb.cz/archivcd/FS/ZMech/CD_Zaklady_mechaniky/text/ZM07_treni.pdf

- [14] Valdislav Laš, Mechanika kompozitních materiálů, Západočeská Univerzita, Plzeň 2008
- [15] Wikipedia, Tsai–Wu failure criterion, 2016.
https://en.wikipedia.org/wiki/Tsai%E2%80%93Wu_failure_criterion