

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Akademický rok 2015/2016

ČVUT v Praze

Fakulta strojní

Ústav konstruování a částí
strojů



Anotační list

Jméno autora:	Libor Pospíšil
Název DP:	Konstrukční návrh vidlice zadního kolečka z kompozitních materiálů pro ambulantní transportní techniku
Anglický název	The Design of a Rear Wheel Fork Made of Composite Materials Used in Ambulance Vehicles
Rok:	2016
Studijní program:	N2301 Strojní inženýrství
Obor studia:	2301T047 Dopravní, letadlová a transportní technika
Ústav:	Ústav konstruování a částí strojů
Vedoucí práce:	Ing. Roman Uhlíř Ph.D.
Konzultant:	Ing. Jan Andruš
Bibliografické údaje:	Počet stran: 89 (+6 úvodních) Počet obrázků: 58 Počet tabulek: 8 Počet příloh: 3
Klíčová slova:	Kompozitní materiál, vidlice, dynamické zatěžování
Keywords:	Compozite material, fork, dynamic testing

Anotace

Cílem této práce je návrh konstrukce vidlice pro ambulantní techniku jako náhrada za stávající řešení. Hlavní motivací pro změnu je úspora hmotnosti, proto jsou pro nový návrh uvažované kompozitní materiály. V návrhu jsou zohledněny schopnosti zpracování kompozitních materiálů koncovou firmou a obor použití vidlice. Navržená vidlice byla zkontrolována pomocí MKP analýzy. Pro novou vidlici byl navržen mechanismus uchycení na základní rám konstrukce. Vidlice byla vyrobena a následně otestována na dynamické zatížení pomocí navržené konstrukce.

Abstract

The main aim of this thesis is to design the castor fork for outpatient transport technique as a substitute for existing solution. The main motivation for the change is weight saving, therefore a composite materials are considered for this purpose. New fork design takes into account the processing capabilities of production company and the industrial field of use of the fork. Designed fork was approved by FEM analysis. A new brake attachment mechanism was also designed to fit a new solution. At the end the forks were manufactured and then tested for dynamic loading on special construction designed for this purpose.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího práce. Veškeré použité prameny, z kterých jsem v práci čerpal, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

V Praze dne:

podpis

Poděkování

*Rád bych touto cestou poděkoval **Ing. Janu Andrušovi** za jeho rady a pomoc při vypracování této práce.*

Obsah

Seznam symbolů	4
Úvod	7
Cíle práce	8
1 Rešerše	9
2.1 Pojezdová kola	9
2.1.1 Základní prvky kol	9
2.1.2 Rozdělení kol dle použití	10
2.1.3 Držáky kol	11
2.1.4 Prvky uchycení kola ke konstrukci	12
2.1.5 Materiály používané pro běhouny kol	13
2.1.6 Disky kol	18
2.1.7 Ložiska	18
2.2 Kompozitní materiály	20
2.2.1 Klasifikace kompozitních materiálů	20
2.2.2 Nekonečná vlákna kompozitních materiálů	23
2.2.3 Krátká vlákna	26
2.2.4 Používané typy vláken	27
2.2.5 Polotovary	31
2.2.6 Matrice	32
2.2.7 Vícevrstvé kompozity	35
2.2.8 Druhy porušení vrstveného kompozitu	36
2.2.9 Pevnost vláknových kompozitů	39

2	Konstrukční úloha	42
3.1	Analýza stávajícího provedení vidlice.....	42
3.1.1	Zadní vidlice	43
3.1.2	Hmotnostní analýza	45
3.1.3	Rozbor zatížení.....	46
3.1.4	Zjednodušení geometrie vidlice pro MKP výpočet.....	49
3.1.5	Okrajové podmínky pro MKP výpočet stávající vidlice.....	50
3.1.6	Síť modelu pro pevnostní analýzu	52
3.1.7	Výsledky pevnostní analýzy	54
3.2	Návrh kompozitní vidlice	56
3.2.1	Varianty kompozitní vidlice.....	57
3.2.2	Geometrie vidlice pro MKP výpočet	59
3.2.4	Materiálová data pro MKP výpočet	62
3.2.5	Okrajové podmínky pro MKP výpočet	64
3.2.6	Výsledky analýzy MKP.....	65
3.3	Konstrukce uchycení vidlice na podvozek nosítek	67
3.3.1	Kontrola kluzných ložisek.....	67
3.3.2	Konstrukce uchycení	69
3	Testování vidlice	71
4.1	Výroba vidlice pro test.....	71
4.1.1	Výroba formy	71
4.1.2	Výroba vidlice.....	74
4.2	Dynamická část testovacího standu	76
4.2.1	Výpočet dynamického zatížení	76
4.2.2	Návrh mechanismu pro dynamické zatěžování	78

4.2.3	Řízení krokového motoru.....	81
4.3	Test vidlice na dynamické zatížení.....	82
4.3.1	Výsledky testu vidlice č. 1	82
4.3.2	Výsledky testu Vidlice č. 2.....	83
4	Závěr	85
6	Použitá literatura	87
7	Seznam příloh	89

Seznam symbolů

Označení	Jednotka	Popis
ABS		Akrylonitributandienstyren
PLA		Polylactid acid
UD		Jednosměrná
HMH		Pevnostní hypotéza dle Huber, von Mises, Hencky
τ_{MAX}		Pevnostní hypotéza dle Guestova
A	$[mm^2]$	Celková plocha průřezu elementu
A_f	$[mm^2]$	Plocha průřezu elementu vlákna
A_m	$[mm^2]$	Plocha průřezu elementu matrice
a_n	$[m \cdot s^{-2}]$	Odstředivé zrychlení
E_m	$[N \cdot mm^{-2}]$	Modul pružnosti matrice v tahu
E_f	$[N \cdot mm^{-2}]$	Modul pružnosti vlákna v tahu
$E_{ }$	$[N \cdot mm^{-2}]$	Modul pružnosti elementu v tahu v podélném směru vlákna
ε_m	$[-]$	Mezní prodloužení (tažnost) matrice
ε_f	$[-]$	Mezní prodloužení (tažnost)vlákna
$\varepsilon_{ }$	$[-]$	Mezní prodloužení elementu v podélném směru vlákna
ε_L	$[-]$	Mezní prodloužení lamina ve směru vlákna
ε_T	$[-]$	Mezní prodloužení lamina kolmo na vlákno
σ_{fP}	$[N \cdot mm^{-2}]$	Pevnost vlákna
σ_{mP}	$[N \cdot mm^{-2}]$	Pevnost matrice
σ_L	$[N \cdot mm^{-2}]$	Normálová složka napětí v lamině ve směru vlákna
σ_T	$[N \cdot mm^{-2}]$	Normálová složka napětí v lamině kolmo na vlákno
σ_f	$[N \cdot mm^{-2}]$	Napětí ve vlákně
σ_m	$[N \cdot mm^{-2}]$	Napětí v matrici
$\sigma_{ P}$	$[N \cdot mm^{-2}]$	Pevnost elementu kompozitu v podélném směru vlákna
σ_{red}	$[N \cdot mm^{-2}]$	Redukované napětí
σ_D	$[N \cdot mm^{-2}]$	Dovolené napětí
F	$[N]$	Zatěžující síla nosítek

F_f	$[N]$	Složka síly F působící ve vlákně
F_m	$[N]$	Složka síly F působící v matici
$F_{\varepsilon Lt}$	$[-]$	Mezní tahová deformace v podélném směru
$F_{\varepsilon Lc}$	$[-]$	Mezní tlaková deformace v podélném směru
$F_{\varepsilon Tt}$	$[-]$	Mezní tahová deformace v příčném směru
$F_{\varepsilon Tc}$	$[-]$	Mezní tlaková deformace v příčném směru
$F_{\varepsilon LT}$	$[-]$	Mezní deformace ve smyku (zkos)
F_a	$[N]$	Odstředivá síla
R	$[N]$	Reakce v hřídeli dynamického systému od rotace excentru
R_A	$[N]$	Reakce v ložisko dynamického systému
R_B	$[N]$	Reakce v ložisko dynamického systému
M_o	$[N \cdot m]$	Ohybový moment
M_K	$[N \cdot m]$	Krouticí moment
M_{red}	$[N \cdot m]$	Redukovaný moment
W_o	$[mm^3]$	Kvadratický modul průřezu
V_f	$[mm^3]$	Objem vlákna
V	$[mm^3]$	Celkový objem elementu kompozitu
ω	$[s^{-1}]$	Úhlová rychlost excentru
ω_L	$[s^{-1}]$	Úhlová rychlost axiálního ložiska
l	$[mm]$	Délka vlákna
l_0	$[mm]$	Počáteční délka elementu
l_t	$[mm]$	Kritická délka vlákna
l_L	$[mm]$	Vzdálenost ložisek v dynamickém systému
Δl	$[mm]$	Prodloužení délky elementu vlákna
m	$[kg]$	hmotnost
S	$[mm^2]$	Plocha axiálního ložiska
p	$[Pa]$	Tlak v axiálním ložisku
u	$[mm]$	Posuv ve směru osy x
v	$[mm]$	Posuv ve směru osy y
z	$[mm]$	Posuv ve směru osy z
x	$[mm]$	Vzdálenost zatížení od ložiska v dynamickém systému
ρ	$[g \cdot cm^{-3}]$	Hustota

φ_f	$[-]$	Poměrný objemový obsah vláken
v	$[m \cdot s^{-1}]$	Obvodová rychlost axiálního ložiska
f_L	$[Hz]$	Frekvence rotace axiálního ložiska
γ_{LT}	$[-]$	Poměrný zkos lamina
α	$[^\circ]$	Úhel sklonu reakce
φ	$[^\circ]$	Úhel natočení excentru
δ	$[mm]$	Vzdálenost těžiště excentru od osy rotace
τ_f	$[N \cdot mm^{-2}]$	Smykové napětí vlákna
τ	$[N \cdot mm^{-2}]$	Smykové napětí v lamině

Kapitola 1

Úvod

S rostoucími nároky na komfort lidského života roste i činnost člověka v oblasti konstrukce. Je to právě konstrukce, která usnadňuje člověku žít. V posledních letech je kladen velký důraz na rozvoj transportní techniky. Především tato technika umožňuje přepravu prostředků k další lidské činnosti. Ať už jsou to lidé osobně, či materiální přesun. Je proto velmi důležité inovovat toto strojní odvětví. Ať už se jedná o přesun velkých strojních částí mezi kontinenty, nebo zajištění bezpečného převozu pacienta k lékařské pomoci. Transportní technika musí obstát ve všech těchto případech.

Tato diplomová práce se bude zaměřovat na oblast ambulantní transportní techniky. Je vytvořena ve spolupráci se společností Mediol s.r.o. Tato společnost se specializuje na výrobu transportních prostředků pro pacienty. Byla založena roku 1996.

Cíle práce

Cílem této diplomové práce je nastínění použití kompozitních materiálů pro ambulantní transportní techniku. Konkrétně pak použití kompozitního materiálu pro vidlice kol. Práce se bude věnovat návrhu kompozitové struktury vidlice za stávající řešení použité na produktu Clinic Extero N114-P113. Při návrhu jsou brány v potaz konstrukční i ekonomické možnosti firmy. Hlavní motivací celého projektu je úspora hmotnosti. Práce si klade za cíl seznámit čtenáře se současným stavem trhu kol a koleček. Přiblížení problematiky kompozitních materiálů pomocí stručné rešerše a vypracování konstrukční úlohy.

To vše bude vyloženo v těchto kapitolách.

Kapitola 2

- Rešerše trhu pojezdových kol a koleček
- Stručná rešerše kompozitních materiálů

Kapitola 3

- Stávající stav a jeho analýza
- Návrh kompozitní vidlice

Kapitola 4

- Předběžný návrh a výpočet kompozitní struktury
- Návrh dynamiky zatěžování pro testovací stolicí

Kapitola 5

- Finální návrh zadní vidlice otočného kola

Kapitola 2

Rešerše

2.1 Pojezdová kola

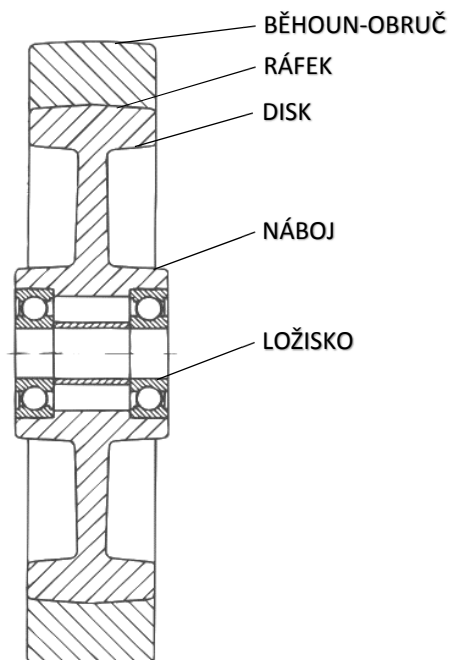
Tato kapitola seznámí čtenáře se základními konstrukčními prvky kol a jejich základním rozdělení dle normy ČSN EN 12526. Dále pak zmíní tradiční výrobce sortimentu pojezdových kol a jejich konstrukční řešení nabízené v katalogu produktů.

2.1.1 Základní prvky kol

Podle základní definice je kolo dle ČSN EN 12526 kruhová konstrukce schopna otáčet se kolem své osy. Je složena z těchto základních prvků. [1] [2]

- Náboj: Střední část kola zajišťující uchycení kola na hřídel či ložiska.
- Ráfek: Vnější část kola.
- Žebro: Spojující prvek mezi nábojem a ráfkem.
- Disk: Část kola zahrnující náboj, žebro, ráfek.
- Obruč: Vnější část kola vyrobená z jiného materiálu než disk.
- Běhoun: Vnější povrch kola, který je v kontaktu se zemí.

- Ložisko: Zajišťuje snadné otáčení kola na hřídeli.



Obr. 1.: Základní prvky kola [2]

2.1.2 Rozdělení kol dle použití

Konstrukce kol se dělí dle cílového uplatnění daného kola. Každý výrobce má jiná kritéria pro dělení svých produktů. Tyto skupiny však nejsou nijak standardizované a nepodléhají žádné normě. Pouze třídí kola daného výrobce dle vlastností. Mezi nejčastější skupiny patří kola přístrojová, transportní, těžkotonážní, kola s pneumatikou a odpružená kola. Každý katalog uvádí jiné typy provedení kol a materiálů pro různé skupiny. Při volbě kola je tedy nutné dbát rad daného výrobce.

Základní dělení kol je popsáno v normách ČSN EN 15 532 a ČSN EN 15 533. Tyto normy třídí kola dle provozních rychlostí, a tedy i dle charakteru jejich provozu.

Pojezdová kola do interiéru

Do této kategorie patří kolečka používaná pro nábytek. Tuto kategorii dále zpracovává norma ČSN EN 12 529. Dle této normy se kola v této kategorii dále dělí na 4 typy [3]:

- **H** - tvrdý běhoun kola
- **W** - pružný běhoun kola
- **C** - Kola elektricky vodivá
- **U** – kola opatřena brzdícím mechanismem

Kola do rychlosti $1,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

Tato skupina je definována v normě ČSN EN 15 532. Jedná se o kola pro aplikace do $1,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (4 km/h). Z této skupiny jsou vyloučené kola definované normou ČSN EN 12 529.

Kola s rychlostí od $1,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ do $4,4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

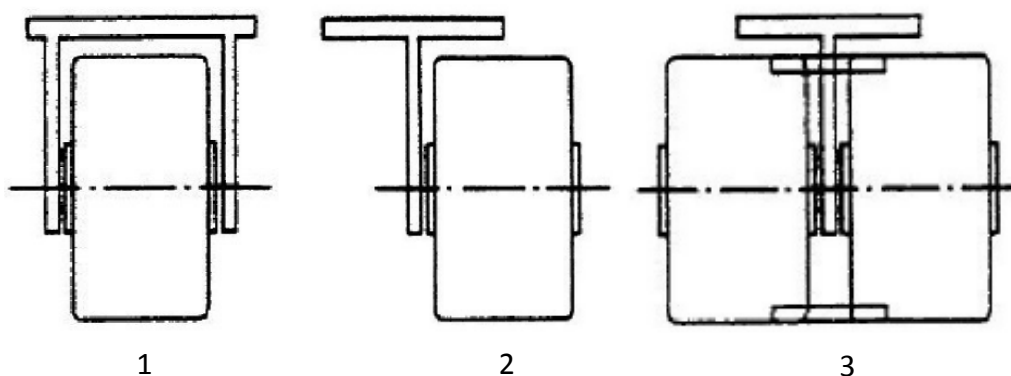
Norma 15 533 stanovuje parametry kol pro rychlosti od $1,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ do $4,4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, s výjimkou kol s pneumatikou. Tato norma dále rozděluje kola do tří skupin A, B, C.

- **A** – kola s rychlostí do $1,7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (6 km/h)
- **B** – kola s rychlostí do $2,8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (10 km/h)
- **C** – kola s rychlostí do $4,4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (16 km/h)

2.1.3 Držáky kol

Norma ČSN EN 12526 definuje tyto možnosti uchycení kola:

- 1 - Vidlicový držák - sestava vidlicového držáku drží hřídel z obou stran
- 2 - Držák čepu - sestava drží hřídel pouze na jedné straně náboje
- 3 - Držák čepu dvojitého kola - sestava drží hřídel pouze mezi koly



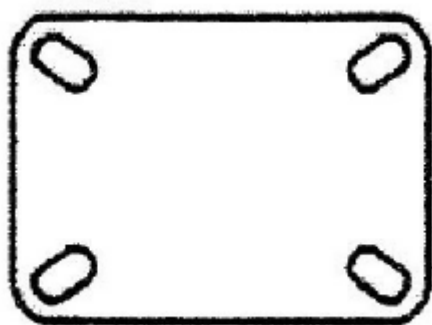
Obr. 2.: Možnosti uspořádání držáků kol [1]

Mezi nejčastěji používanou variantu uchycení kola na konstrukci patří vidlicový držák. Jeho konstrukce umožňuje nejpříznivější rozložení zatížení do hřídele kola a zároveň rozděluje napětí v držáku do dvou větví. Tyto větve poté mohou být navrženy na poloviční zatížení, nežli je tomu u případu držáku čepu pod pozicí 2 na obr. 2. Uspořádání z pozice 3 na obr. 2 je velmi rozšířeno pro použití u nábytků.

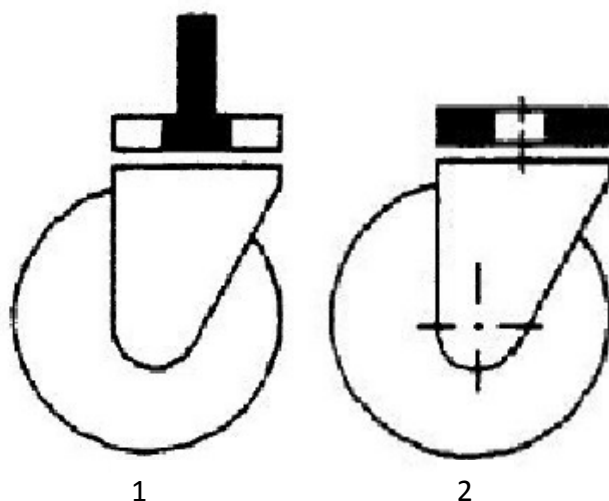
Jelikož se konstrukční část této práce dále zabývá pouze prvním typem držáku (vidlicový držák), bude dále v této práci toto uchycení ke konstrukci označováno pojmem vidlice.

2.1.4 Prvky uchycení kola ke konstrukci

Možnosti uchycení kola ke konstrukci jsou realizovány pomocí čepu (otočná varianta), nebo pomocí montážní desky (Obr.3) se šrouby (neotočná varianta). Konstrukčně složitější a cenově dražší jsou varianty otočné (Obr.4) umožňující rotaci kola kolem svislé osy. Tento typ uchycení musí konstrukčně řešit uložení ložiska a zajištění čepu před vypadnutím z konstrukce.



Obr. 3.: Montážní deska [1]

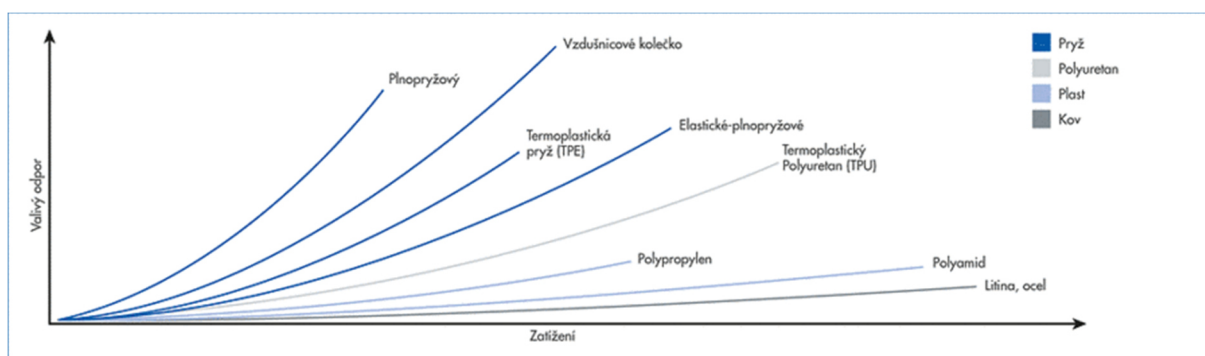


Obr. 4.: Rotační varianty uchycení: 1- Dřík, 2- Díra pro šroub [1]

2.1.5 Materiály používané pro běhouny kol

Volbu kola ovlivňuje především prostředí, v kterém chceme kolo provozovat. Správnou volbou materiálu kola může být předejito provozním problémům. Správně navržené kolo je schopno plnit svou práci spolehlivě s dlouhodobou životností. Je tedy velmi důležité mít při volbě materiálu kola správné informace o teplotě provozního prostředí, chemickém vlivu, drsnosti povrchu či o přepravované hmotnosti.

Srovnání valivých odporů jednotlivých materiálů používaných na běhouny kol jsou porovnány na Obr.5



Obr. 5.: Valivý odpor při rozjezdu rozdílných běhounů [4]

V následujícím bodě bude uvedeno několik používaných materiálů. Budou zde vypsány vlastnosti, které ovlivňují jejich nasazení. [3]

Plnopryžový běhoun

Kola z plnopryže jsou používána především na nerovné či tvrdé povrchy. Díky jejich elastickému běhounu se dokáží přizpůsobit povrchu. Eliminují tak vliv nerovnosti povrchu na transportní stroj. Nevýhodou těchto materiálů je případná difuze barviva do podlahy. Tento problém může být však řešen možností použití více barev pro běhoun. Plnopryžová kola mohou být dodávána v různé tvrdosti běhounu dle Shora.

Hlavní vlastnosti kola s plnopryžovým běhounem jsou:

- Tichý chod
- Robustnost
- Odolnost proti nátěrům
- Tlumení vibrací
- Nízká cena

Teplotní rozsah použití těchto kol se pohybuje od $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+80\text{ }^{\circ}\text{C}$. Je však důležité si uvědomit, že s rostoucí teplotou klesá nosnost kola. Plnopražová kola ztrácí ze své celkové nosnosti od 30°C .

Tvrlosti plnopryžových běhounů se pohybují v rozsahu 65-80° Shore A¹.

Termoplastový běhoun

Termoplast (TPE) je alternativa k plnopryžovým běhounům. Hlavní výhodou oproti plnopryžovým běhounům je jeho zvýšená nosnost. Díky svému zbarvení nezanechává barevné stopy na podkladu, avšak při dlouhodobé nečinnosti pod zatížením může vylučovat olej. Tato vada plyne z charakteru složení materiálu. Tento vyloučený olej pak může zanechávat skvrny na podkladu.

Hlavní vlastnosti kola s termoplastovým běhounem jsou:

- Tichý pojezd
- Nezanechává stopy
- Vyšší nosnost oproti plnopryži
- Nízký valivý odpor

Teplotní rozsahy použití těchto kol se pohybují od -20 °C do +60 °C. Termoplasty také ztrácí část své pevnosti při překročení hranice 30°C.

Tvrдость termoplastového běhounu odpovídá cca 85° Shore A.

Polyuretanový běhoun

Polyuretan (PU) se vyznačuje vysokou nosností při nízkém oděru. Charakteristická je pro tento materiál i vysoká chemická odolnost.

Hlavní vlastnosti kola s polyuretanovým běhounem jsou:

- Vysoká nosnost
- Nízký oděr
- Odolnost proti nárazům
- Nízký valivý odpor
- Vysoká chemická odolnost
- Odolnost proti proříznutí kovovými třískami

¹ Tvrдость dle Shorea. Jde o dynamicko-elastickou zkoušku odrazem zkušebního tělesa od měřené plochy. Zkoumá se výška odskoku zkušebního tělesa.

Teplotní rozsah použití polyuretanových kol se pohybují od -20 °C do +80 °C. U tohoto materiálu nastává nížení nosnosti při použití v teplotách překračující +30°C.

Tvrlosti polyuretanových běhounů se pohybují v rozsahu 50-98° Shore A.

Nafukovací samostatná kola z pryže

Nafukovací samostatná kola z pryže se nejčastěji uplatňují na hrubých nerovných površích. Jejich hlavní výhodou je možnost velkého valivého poloměru. Tato kola jsou však náchylnější na údržbu. Je nutná pravidelná kontrola tlaku v pneumatikách. Při nedodržení správného tlaku se tato kola rychle ničí.

Hlavní vlastnosti nafukovacích kol jsou:

- Šetrnost k podlaze
- Tlumení vibrací
- Nízký valivý odpor na nerovném podkladu
- K dispozici provedení, které nezanechává stopy

Teplotní rozsahy použití nafukovacích samostatných kol se pohybují od -25 °C do +50 °C.

Polypropylenový běhoun

Polypropylen (PP) je svou nízkou hmotností a schopností neabsorbovat vlhkost alternativou polyamidu. Polypropylen je odolný vůči slané vodě a do určité koncentrace odolává i luhům a kyselinám.

Hlavní vlastnosti kola s polypropylenovým běhounem jsou:

- Vysoká chemická odolnost
- Vysoká nosnost
- Dlouhá životnost
- Odolnost proti zlomení při vysokém zatížení
- Nízký valivý odpor

Teplotní rozsah použití polypropylenových kol se pohybují od -5 °C do +80 °C. U tohoto materiálu nastává nížení nosnosti při použití v teplotách překračující +30°C.

Tvrlosti polypropylenových běhounů se pohybuje okolo 60° Shore D.

Polyamidový běhoun

Polyamid (PA 6) je plast s vysokou nosností. Je odolný proti slané vodě a do určité koncentrace odolává louhům a kyselinám. Polyamid je hygienický a bez zápachu, díky těmto vlastnostem se používá především v potravinářství a farmaceutickém průmyslu.

Hlavní vlastnosti kola s polyamidovým běhounem jsou:

- Vysoká chemická odolnost
- Vysoká nosnost
- Dlouhá životnost
- Lehký chod na hladkých podkladech
- Nízký valivý odpor

Polyamid lze použít v teplotách v rozsahu od -40°C do $+90^{\circ}\text{C}$. Při teplotách nad 30°C se snižuje nosnost.

Tvrdość polyamidového běhounu se pohybuje okolo 70° Shore D. U litého polyamidového běhounu dosahuje tvrdość až 80° Shore D.

Běhouny z šedé litiny

Šedá litina je velmi odolná proti opotřebení. Šedá litina si drží své mechanické vlastnosti v širokém rozsahu teplot téměř beze změny.

Hlavní vlastnosti kola z šedé litiny jsou:

- Vysoká nosnost
- Robustnost
- Extrémní teplotní odolnost
- Vysoká tažnost
- Nízký valivý odpor
- Vysoká chemická odolnost

Teplotní rozsah použití kol z šedé litiny se pohybují od -100°C do $+600^{\circ}\text{C}$.

Tvrdość kol z šedé litiny se pohybuje v rozmezí 180-220 HB. (Tvrdość při vtisku kuličky)

Celoocelová samostatná kola

Ocel vyniká svou vysokou statickou a dynamickou nosností.

Hlavní vlastnosti celoocelových kol jsou:

- Lehký chod na hladkých podkladech
- Vysoká odolnost proti otěru
- Nízký valivý odpor
- Elektrovodivá

Teplotní rozsah použití celoocelových kol se pohybují od $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+600\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Tvrdomosti kol z šedé litiny se pohybuje v rozmezí 190-230 HB. (Tvrdomost při vtisku kuličky)

2.1.6 Disky kol

Disky kol jsou části kol spojující běhoun kola s nábojem. Jedná se o prvek kola přenášející zatížení běhounu na náboj. Disk významně ovlivňuje celkovou nosnost kola. Norma ČSN EN 12 526 rozděluje disky na disky nedělené (vyrobené pouze z jednoho materiálu) a disky složené (smontované z částí). Nejčastější materiály používané na disky jsou ocel, litina, slitiny hliníku, plast (polyamid, polypropylen). Méně častým materiálem je pak dřevo či fenolová pryskyřice. [1] [4]

2.1.7 Ložiska

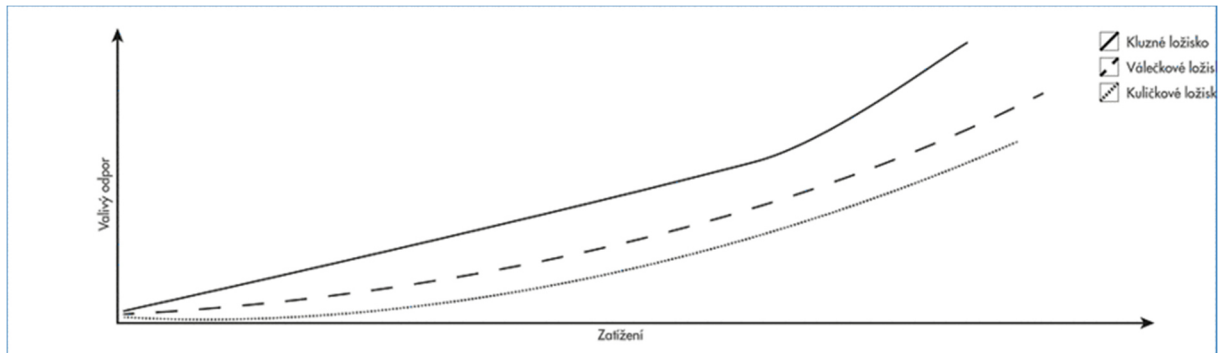
V normě ČSN EN 12 526 je uvedeno pět základních typů ložisek používaných u konstrukcí kol. Jsou to ložiska kluzná, válečková, kuličková, kuličková s kosoúhlým stykem a kuželíková ložiska. Druh ložiska ovlivňuje především velikost nosnosti ložiska. Technický vývoj přináší do aplikací s koly i jiné typy ložisek, které nejsou uvedeny v normě. Jedná se o jehlová ložiska, která mají velmi malý valivý odpor a nevyžadují žádnou údržbu. [1] [3]

Nejčastěji používaná ložiska jsou:

- Kluzná ložiska – jsou to ložiska takřka bezúdržbová a velmi odolná. Kvalita ložiska se liší dle použitého materiálu. Uplatňují se u kol s nízkou rychlostí a krátkými transportními drahami.

- Jehlová ložiska – jsou ložiska s nízkou hmotností používaná pro kola s vysokou nosností. Mají relativně nízký valivý odpor. Používají se pro kola, která se pohybují rychlostí do 4 km/h (rychlost chůze).
- Kuličkové ložiska – jsou to ložiska s relativně nízkým valivým odporem i při vyšším zatížení.

Valivý odpor při rozjezdu základních typů ložisek jsou zobrazeny na Obr.6.



Obr. 6.: Valivý odpor při rozjezdu různých typů ložisek [3]

2.2 Kompozitní materiály

Kompozitní materiály jsou materiály složené ze dvou či více odlišných složek. Jsou to materiály obsahující více fází. Je ovšem nutné, aby tyto fáze měly rozdílné fyzikální vlastnosti. Výsledný materiál je potom svými vlastnostmi zcela odlišný od vlastností jednotlivých složek. Tato odlišnost vzniká samozřejmě kombinací fyzikálních vlastností jednotlivých složek.

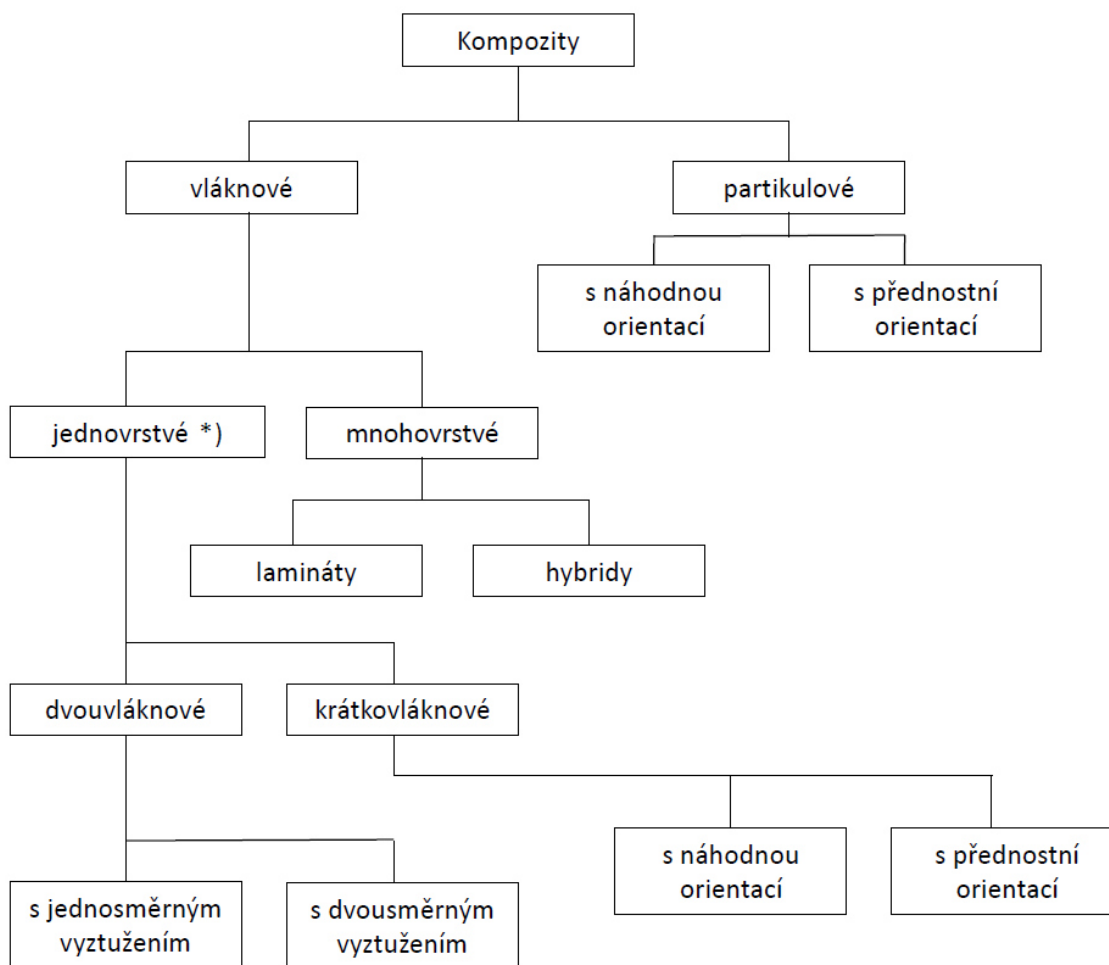
Pro klasifikaci materiálu jakožto kompozitní materiál je tedy velmi důležitá fyzikální odlišnost jednotlivých složek. Například běžné kovy obsahují vždy nežádoucí látky (nečistoty, vady). Jsou to tedy materiály složené z více složek. Tyto nežádoucí látky však mají podobné fyzikální vlastnosti (např. modul pružnosti), a proto nejsou takovéto materiály označovány za kompozitní. Stejně tak některé plasty obsahují další složky, jsou to např. plniva, pohlcovače ultrafialového záření a jiné doplňky. I v tomto případě nemluvíme o takovýchto materiálech jako o kompozitních. Problém s touto definicí nastává například u některých slitin. Proto je jako kompozitní materiál označován takový materiál, který splňuje tyto podmínky:

- Objemový podíl jedné složky je větší než 10% a tato složka je ve vláknové formě
- Materiálové vlastnosti jedné složky jsou výraznější (≥ 5 krát) než druhé

Kompozitním materiálem v této práci bude nazýván materiál sestávající se v makrostruktuře ze dvou nebo více chemicky odlišných složek, které mají oddělující rozhraní. Jsou to vlákna sloužící k přenosu zatížení a matrice, do které se vlákna ukládají. [5]

2.2.1 Klasifikace kompozitních materiálů

Kompozitní materiály jsou vyvíjeny pro zlepšení mechanických vlastností, jako je pevnost, tuhost, tažnost a vysokoteplotní odolnost. Sdružují se tedy do skupin dle jejich mechanismu pevnostního chování. Tento mechanismus je závislý především na geometrii vyztužení. Ta se stala hlavním kritériem pro klasifikaci kompozitních materiálů. Obrázek 7. představuje klasifikační schéma pro kompozitní materiály. [5]



*) Včetně kompozitů se stejnou orientací a vlastnostmi v každé vrstvě

Obr. 7.: Klasifikace kompozitních materiálů [5]

Vláknové kompozity

Pevnost většiny materiálů ovlivňují nedokonalosti a vady v materiálu vzniklé při výrobě. Tyto vady, převážně pak trhliny kolmé ke směru namáhání, ovlivňují výslednou pevnost materiálu. Vláknové kompozity obsahují na rozdíl od velkých materiálových kompakťů úzká a dlouhá vlákna. Tato vlákna zabraňují vzniku velkých vad při výrobě právě svým malým průměrem. Vznik vad není odstraněn, pouze je minimalizován. Průměr vláken je výrazně menší než délka vlákna, což je i charakteristický rys vláken. Jsou-li ve vláknech trhliny, které se vlivem zatížení zvětšují, lom může nastat pouze v tomtéž vlákně a nikdy se tak nedostane do celého průřezu kompozitu. Rostoucí trhlina narazí na fázové rozhraní mezi vláknem a matricí. Přes

toto rozhraní se dále nemůže šířit. Dále pak vláknové kompozity umožňují vyztužení kompozitových součástí ve směru namáhání, tímto spoří velkou část hmotnosti, oproti izotropním materiálům, které mají ve všech směrech stejné vlastnosti.

Vláknové kompozity dále dělíme na jednovrstvé (lamina) a mnohovrstvé. Vlákna používaná v jednovrstvém laminátu mohou být krátká nebo dlouhá vzhledem k jejich průřezovým charakteristikám. Dlouhovláknové kompozity obsahují dlouhá vlákna, jsou to kompozity vyztužené spojitými vlákny po celé své délce. Kompozity s krátkými vlákny se nazývají krátkovláknové, jsou to kompozity vyztužené diskontinuálními vlákny. Jednovrstvé kompozity (lamina) mohou obsahovat i více samostatných vrstev, které mají stejné vlastnosti i orientaci. Tudíž lze celý laminát považovat za jednovrstvý kompozit. V případě kompozitu vyrobeného z netkaných rohoží je orientace konstantní v každé vrstvě a výsledný kompozit lze též považovat za jednovrstvý. Jednovrstvé vláknové kompozity se vyznačují vysokou pevností ve směru vláken a velmi nízkou pevností ve směru kolmém na vlákna.

V konstrukčních aplikacích převládají kompozity vícevrstvé (úhlové vrstvení). Vícevrstvé kompozity se skládají z několika vrstev (lamin). Každá vrstva je jednovrstvý kompozit s jednou orientací vláken. Při kladení vrstev na sebe se orientace střídá dle konstrukčního návrhu. Jednotlivé vrstvy kompozitu jsou velmi tenké, jejich tloušťka je přibližně 0,1 mm. Takto tenké vrstvy nemohou být použity jednotlivě, a proto se skládají v kompozit vícevrstvý. Jsou-li materiály použité v každé vrstvě stejné, nazývají se kompozity *lamináty*. Jsou-li naopak materiály použité ve vrstvách různé, pak se tyto kompozity nazývají *hybridní lamináty*. [5]

Partikulové kompozity (částicové)

Partikulový kompozit obsahuje plnění, jež je klasifikováno jako částicové. Částice je definovaná jako nevláknový útvar, který nemá s výjimkou destiček žádný dlouhý rozměr. Rozměry částic (vyztužení) rozhodují o schopnosti přispívat k vlastnostem kompozitu. Vyztuže s dlouhým rozměrem dokáží brzdit růst počátečních trhlin a tím přispívají k lepší odolnosti matrice vůči lomu. Částice v partikulovém kompozitu eliminují rozvoj a šíření plastických deformací v materiálu matrice. Tento jev eliminují především svou tvrdostí vzhledem k matrici. Částice se též podílejí i na přenosu zatížení, ne však v takové míře jako vlákna. Částice tedy napomáhají k zlepšení tuhosti kompozitu, nikoliv k zvýšení jeho pevnosti. Částice v partikulovém kompozitu mohou být kombinací více materiálů. Mohou to být kombinace kovových i nekovových materiálů. Záleží pouze na požadovaných konečných vlastnostech. [5]

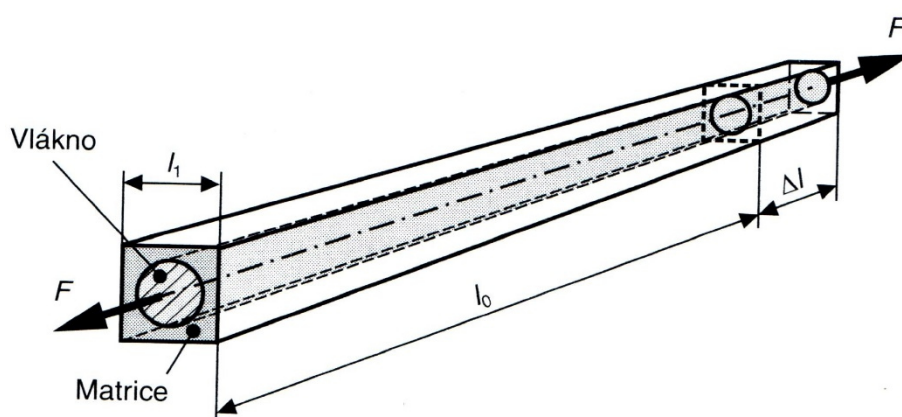
2.2.2 Nekonečná vlákna kompozitních materiálů

Vlákna vyztužují kompozit. Tím se rozumí zvýšení pevnosti a tuhosti. Toho se docílí uložení vláken do základního materiálu (matrice), přičemž musejí být splněny tyto podmínky. Vyztužující vlákna musí být pevnější než matrice (rovnice 1), vlákna musí mít vyšší tuhost nežli matrice (rovnice 2) a prodloužení matrice musí být větší nežli prodloužení vláken (rovnice 3). [5]

$$\sigma_{fP} > \sigma_{mP} \quad (1)$$

$$E_f > E_m \quad (2)$$

$$\varepsilon_{mP} > \varepsilon_{fP} \quad (3)$$



Obr. 8.: Model elementárního vlákna uloženého v matrici [6]

Na Obr. 8 je zobrazen element vláknového kompozitu zatížený silou F . Jedná se o dlouhé vlákno uložené v matrici. Pro tento případ lze odvodit silovou rovnováhu, pomocí které je následně možné odvodit pravidla směsí.

$$F = F_f + F_m \quad (4)$$

$$\sigma_{||} \cdot A = \sigma_f \cdot A_f + \sigma_m \cdot A_m \quad (5)$$

Je-li zajištěna kompatibilita modelu, vlákno-matrice, prodloužení vlákna i matrice musí být stejná. Rovnici 5 lze tedy rozšířit pomocí následujících vztahů.

$$\frac{\Delta l}{l_0} = \varepsilon_{||} = \varepsilon_f = \varepsilon_m \quad (6)$$

Hookeův zákon pro jednoosou napjatost pro vlákno a matrici.

$$\sigma_f = E_f \cdot \varepsilon_f \quad (7)$$

$$\sigma_m = E_m \cdot \varepsilon_m \quad (8)$$

Rovnice rovnováhy s ohledem na Hookeův zákon má následně tvar.

$$\sigma_{||} \cdot A = (E_f \cdot A_f + E_m \cdot A_m) \cdot \varepsilon_{||} \quad (9)$$

Napětí působící ve směru vlákna v elementu vyjádřené za pomoci Hookeova zákona.

$$\sigma_{||} = E_{||} \cdot \varepsilon_{||} \quad (10)$$

Dosazením do rovnováhy sil dostaneme rovnici (11).

$$E_{||} \cdot \varepsilon_{||} \cdot A = (E_f \cdot A_f + E_m \cdot A_m) \cdot \varepsilon_{||} \quad (11)$$

Aby bylo možné vyjádřit pravidlo směsi, je nutné vyjádřit poměrný objemový obsah. Poměrný objemový obsah vláken lze zapsat.

$$\varphi_f = \frac{V_f}{V} = \frac{A_f}{A} \quad (12)$$

Po dosazení poměrných objemových obsahů do rovnice (11) dostáváme výsledná pravidla směsí.

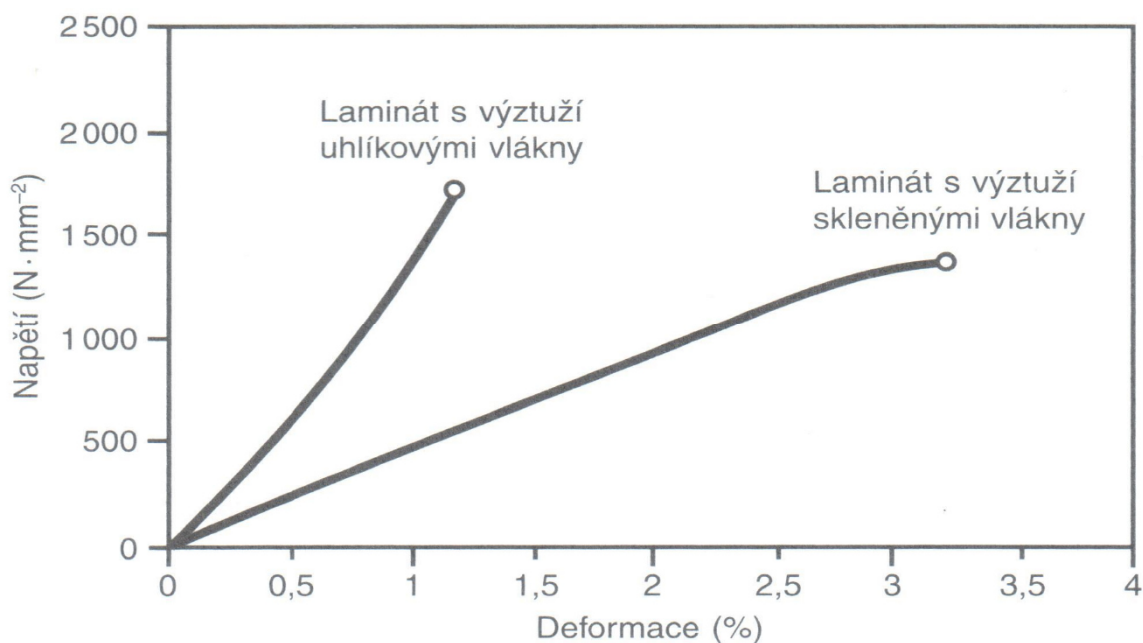
$$E_{||} = \varphi_f \cdot E_f + \varphi_m \cdot E_m \approx \varphi_f \cdot E_f \quad (13)$$

$$\sigma_{||P} = (\varphi_f \cdot \sigma_f + \varphi_m \cdot \sigma_m)_P \approx \varphi_f \cdot \sigma_{fP} \quad (14)$$

Výslednou pevnost a tuhost kompozitu určují především vlákna, proto je možné zastoupení matrice ve výsledných pravidlech směsí zanedbat.

Velký problém nastává při výpočtu únosnosti kompozitu. Únosnost svazku vláken je výrazně nižší nežli součet únosnosti jednotlivých vláken svazku. To je způsobeno pevnostmi jednotlivých vláken. Vlákna nedosahují své maximální pevnosti ve stejný časový úsek. To vede k přerušování slabších vláken, která pak indukují do svého okolí přídatná napětí. Tento proces je zohledněn ve výsledné pevnosti rovingu (svazku vláken).

Křivky závislosti napětí/deformace pro jednosměrně vyztužené lamino zatížené tahem ve směru vláken pro dva nejčastěji používané materiály vláken jsou zobrazeny na obrázku 2.1. [6]



Obr. 9.: Křivky napětí-deformace pro jednosměrně vyztužený laminát při namáhání tahem ve směru vláken [6]

Lom (nekonečných) vláken

Je obecně známo, že pevnost laminátu je vyšší nežli pevnost složek, z nichž je laminát složen. Nastane-li lom vlákna, vznikají smyková napětí, která jsou dále přenášena maticí na sousední vlákna, a kompozit je schopen napětí dále přenášet. Vlákno porušené tahovým

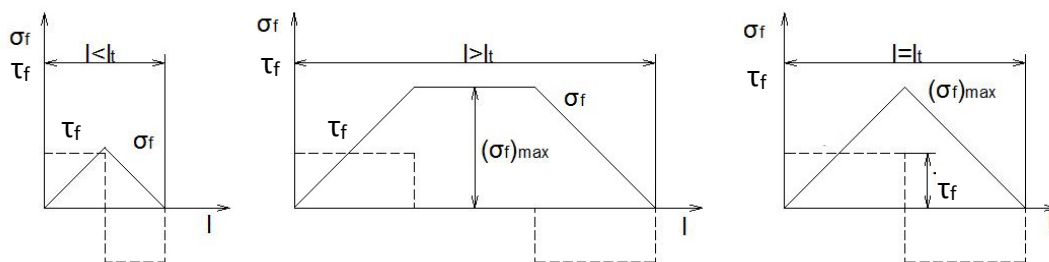
napětím v rovingu (svazek vláken) bez přítomnosti matrice se dále na přenosu napětí nepodílí. Avšak jsou-li vlákna uložena v matrici, přerušené vlákno je schopné po své délce napětí dále přenášet s výjimkou místa lomu. Nastává tak zvaný *Synergický efekt*. O velikosti tohoto efektu rozhoduje pevnost spojení matrice a vlákna (adheze). Velikost smykového napětí na rozhraní vlákno/matrice rozhoduje o dalším chování matrice. Překročí-li smykové napětí na rozhraní určité hodnoty, nastává vznik trhlin. Růst trhliny zastaví až následné vlákno. Trhlina je však velký koncentrátor napětí a při dosáhnutí trhliny vedlejšího vlákna nastává lom i v tomto vlákně. Toto se děje až do úplného porušení kompozitu.

Je tedy zřejmé, že vysoká pevnost adheze (pevnost přilnutí vlákna k matrici) způsobuje vznik trhlin v matrici, které jsou koncentrátoři napětí a negativně se podílí na celkové pevnosti. Velikost mechanické energie pro odtržení vlákna od matrice přesahuje hodnotu, jež je potřeba k vzniku trhlin. Vysoká pevnost matrice tedy nezaručuje vysokou pevnost kompozitu, jak by se mohlo logicky zdát. Pro účely konstrukce je doporučováno používat matrice s tažností 5 až 6 %. [5]

2.2.3 Krátká vlákna

Kompozity vyztužené krátkými vlákny se dají považovat vesměs za izotropní materiál. A mají ve všech směrech stejné vlastnosti. Své uplatnění nachází především tam, kde nejsou vlastnosti vrstvených kompozitů zcela dostačující. I když může být vícevrstvý kompozit složen z vrstev s různou orientací a jako celek mít pevnost ve všech směrech konstantní. Zůstávají okrajové vrstvy, ve kterých lom nejčastěji vzniká, velmi slabé v příčném směru. V aplikacích, kde je zapotřebí odolnost proti korozivnímu prostředí, se uplatňují právě kompozity s krátkými vlákny. Díky formě, v které se zpracovávají, je možné využít technologií vstřikování, nebo vtlačování, což snižuje nároky na ekonomickou stránku výroby. Struktury vzniklé těmito technologiemi jsou do jisté míry ovlivněny tvarem formy, do nichž je směs dopravena. Výsledná orientace vláken je přizpůsobena tečení celého média (vlákna a matrice). Tato skutečnost je v drobném rozporu s předchozím tvrzením o izotropii těchto materiálů. Krátkovláknové kompozity nemají nijak předepsané orientace jednotlivých vláken, avšak nelze tvrdit, že jejich rozmístění zaručí zcela izotropní chování celku. To je nutné brát v úvahu při návrhu. Konečná aplikace prvku z krátkovláknového kompozitu ovlivňuje i potřebu konstruktéra o znalosti detailnější orientace vláken. Lze tedy tento typ kompozitu považovat za izotropní, avšak nelze na tuto skutečnost se vši jistotou spoléhat.

Přenos napětí se v kompozitech s krátkými vlákny neuskutečňuje přímo ve vláknech, nýbrž je zaváděno do matricového materiálu a do vláken, je přenášeno prostřednictvím konců a válcového povrchu vlákna v oblasti konců. Výsledné vlastnosti kompozitu jsou pak dány délkou vlákna. Termín *kritická délka vlákna* (l_t) označuje důležitou vlastnost systému a ovlivňuje mezní vlastnosti kompozitu. Je to maximální hodnota přenosové délky vlákna. Variace napětí vlákna a smykového napětí na rozhraní jsou ukázány na obr. 10 pro různé délky vlákna. [5]



Obr. 10.: Průběhy napětí vlákna a smykového napětí na rozhraní pro různé délky vlákna [5]

2.2.4 Používané typy vláken

Jak už bylo řečeno, hlavním prvkem kompozitních materiálů jsou výstužná vlákna. Tato vlákna mohou být vyrobena z různých druhů materiálů, díky čemuž samozřejmě nabývají jiných vlastností. V této části práce, bude stručně shrnuto, několik základních materiálů používaných pro výrobu vláken.

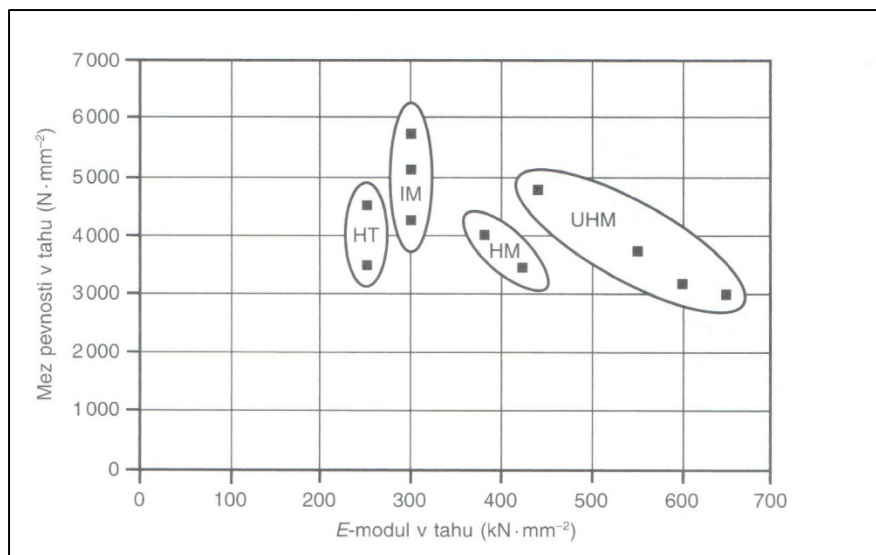
Uhlíková vlákna (Carbon Fiber)

Uhlíková vlákna se vyznačují velkou pevností a křehkostí. V běžných atmosférických podmínkách dokáží mimořádně dobře odolávat oxidaci. Zajišťují dobrý průchod pro záření a neodrážejí tudíž ani radarové vlny. Velmi dobře se snášejí s lidskou tkání, je možné je tedy využívat jako materiál pro implantáty. Dynamické vlastnosti kompozitních materiálů vyztužených těmito vlákny přesahují vlastnosti ostatních materiálů, jako jsou například ocel či hliník.

Uhlíková vlákna se skládají z 90 % uhlíku, < 7 % dusíku, < 1 % kyslíku, < 0,3 % vodíku, zbytek tvoří ostatní prvky. Jejich průměr se pohybuje mezi 5÷10 μm. Teoretické hodnoty mechanických vlastností uhlíkových vláken vycházejí z hodnot kovalentních vazeb grafitového monokrystalu. Tyto hodnoty dosahují až 1 000 000 N·mm⁻² pro Younguv modul pružnosti (*dále*

jen E -modul) a $100\,000\text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$ pro pevnost. Skutečné hodnoty jsou však vlivem reálného složení vláken a výrobních vad sníženy. E -modul ve směru kolmém na vrstvy dosahuje pouze hodnot okolo $4000\text{ [N}\cdot\text{mm}^{-2}]$. To je dáno chybějícími kovalentními vazbami. [6] [7]

Uhlíková vlákna se dělí do skupin dle svých mechanických vlastností. Základní rozdělení je uvedeno na obrázku č. 11.



Obr. 11.: Rozdělení uhlíkových vláken (ve stavu bezprostředně po výrobě) [6]
HT - standardní, IM – středně-, HM – vysoko-, UMH – ultravysokomodulová

Skleněná vlákna (Glass Fiber)

Tato vlákna jsou tažena z roztavené skloviny a používána pro textilní účely. Fyzikální vlastnosti skelných vláken se rozdělují dle chemického složení skloviny na různé (fyzikálními vlastnostmi odlišné) typy vláken.

E-sklovina (for electrical)

Písmenem E jsou označovány bezalkalické skloviny. Vyznačují se vynikající elektrickou izolací a stejně jako je tomu u uhlíkových vláken, jsou i vlákna z E-sklovin dobře propustná pro záření. Tato sklovina je nejčastěji používanou sklovinou pro výrobu skelných vláken.

S-sklovina (for strength)

Ve sklovině typu S je ve zvýšeném obsahu oxid křemičitý, oxid hořečnatý a oxid hlinitý. Díky tomuto složení má sklovina S o 40%-70% vyšší pevnost. Tuto sklovinu můžeme v Evropě nalézt též pod označením R (resistance). Označení S se používá převážně na americkém kontinentu. Vystihuje však nejpřesněji hlavní vlastnost skloviny, a proto jsem volil toto označení jako hlavní. Použití vláken z této skloviny limituje její cena, která je až čtyřikrát vyšší než je tomu pro E-sklovinu.

C-sklovina (for corrosion)

Tato sklovina se vyznačuje vysokou odolností proti kyselinám a proti chemicky agresivním látkám.

D-sklovina (for dielectric)

Tato sklovina je dielektrická. Využívá se především v elektrických aplikacích jako izolant.

A/AR-sklovina (alkaline resistant)

Tato sklovina je alkalicky odolná, proto našla uplatnění především jako povrchová úprava (vrstva) vyznačující se velmi nízkou hmotností. [6] [8]

Důležité vlastnosti skelných vláken jsou uvedeny v tabulce č. 1.

Skelná vlákna					
		E	R/S	C	AR
Hustota	$[g \cdot cm^{-3}]$	2,60	2,53	2,52	2,68
Mez pevnosti v tahu	$[N \cdot mm^{-2}]$	3 400	4 400	2 400	3 000
Younguv modul pružnosti	$[N \cdot mm^{-2}]$	73 000	86 000	70 000	73 000
Poměrné prodloužení	[%]	< 4,8	< 4,6	< 4,8	< 4,4
Souč. teplotní roztažnosti	$[K^{-1}]$	$5,0 \cdot 10^{-6}$	$4,0 \cdot 10^{-6}$	$6,3 \cdot 10^{-6}$	$6,5 \cdot 10^{-6}$
Teplota měknutí	$[^{\circ}C]$	850	980	750	770

Tabulka 1.: Základní vlastnosti skelných vláken [6]

Aramidová vlákna (Aramid Fiber)

Jsou to vlákna s kovalentní vazbou ve směru osy vlákna. To má za důsledek velkou pevnost a tuhost. Aramidová vlákna jsou nejlehčí výtuzná vlákna v důsledku své malé hustoty, která se udává okolo $1,45 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$.

Hlavní nevýhodou těchto vláken je absorbování vody. Toto hydrofilní chování má negativní vliv na pevnost. A to jak na pevnost samotných vláken, tak i na pevnost spoje mezi maticí a vláknem. Tato vlastnost zvyšuje nároky na manipulaci s vlákny před jejich použitím. Pevnost těchto vláken je výrazně ovlivněna i vystavením vlákna UV-záření a snižuje se výrazně i za zvýšených teplot. Limitní teplota kompozitu s aramidovými vlákny se udává okolo $300 \text{ }^\circ\text{C}$. Navzdory závislosti pevnosti na teplotě jsou tato vlákna používána na protipožární aplikace, jelikož nedochází k jejich roztavení.

Aramidové kompozity jsou používány pro konstrukce namáhané převážně tahem, kterému dokážou odolávat lépe nežli ohybu a tlaku. To je dáno mezí pevnosti v tlaku ve směru vláken, která je výrazně nižší než mez pevnosti v tahu. [6]

Mechanické vlastnosti aramidových vláken jsou uvedeny níže v tabulce.

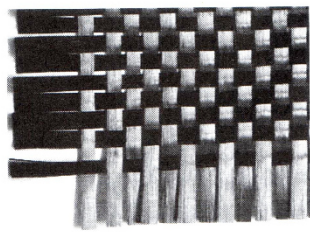
Aramidová vlákna					
Vlastnosti		Ve směru vláken		Kolmo na vlákno	
		Tah	Tlak	Tah	Tlak
Pevnost	$[N \cdot \text{mm}^{-2}]$	1 800	230	8	53
Younguv modul pružnosti	$[N \cdot \text{mm}^{-2}]$	80 000	80 000	6 500	5 100
Tažnost	[%]	2,2	0,5	0,16	1,4
Příčné smrštění	[-]	0,3	0,3	0,025	0,02
Souč. teplotní roztažnosti	$[K^{-1}]$	$[-2 \cdot 10^{-6}]$		$[70 \cdot 10^{-6}]$	
Vodivost	$[S \cdot \text{m}^{-1}]$	$[\sim 2 \cdot 10^{-13}]$		-	

Tabulka 2.: Vlastnosti jednosměrného laminátu vyztuženého vysokomodulovým aramidovým vláknem (obsah výstuže 70%) [6]

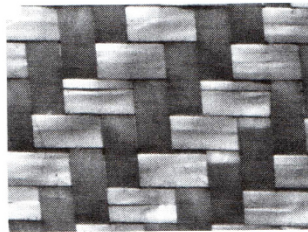
2.2.5 Polotovary

V předchozích částech zmíněné prvky, jako jsou vlákna, mohou být pro výrobu kompozitu zpracována do polotovarů. Používané polotovary jsou: [6]

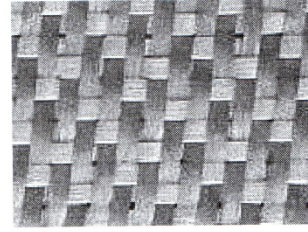
- **Příze** – Je vyrobena spředením jednotlivých vláken do svazku, který je pak následně používán na výrobu tkanin, pásů a pletené výrobky.
- **Nitě** – Jedná se o spletené příze
- **Roving (pramenec)** – Je tvořen z 20-60 konců sdružených z rovnoběžně uložených a nestočených vláken. Dále se zpracovává sekáním nebo tkaním nekonečného pramene.
- **Spředený roving** – Je vyroben stočením vláken kolem podélné osy.
- **Rohože ze sekaných pramenců** – Jsou to netkané plošné výrobky o hmotnosti až $900 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$. Vlákna jsou dlouhá 25-50 mm a jsou nepravidelně uložena do vrstvy. Jsou nastříkaná pojivem a následně vysušena tak, aby bylo možné vzniklé rohože navíjet na cívku.
- **Rohože z kontinuálních vláken** – jedná se nepravidelně uložená nekonečná skleněná vlákna ve smyčkách. Vlákna jsou uložena ve více vrstvách a vzájemně propojena pojivem.
- **Povrchové rohože** – Jsou to netkané rohože z termoplastických nebo skleněných vláken. Kladou se jako povrchové vrstvy, neboť v místě povrchu vzniká velká koncentrace matrice, ve které mohou vznikat zárodky trhlin.
- **Krátká vlákna** – Jsou to velmi krátká vlákna o různé délce 0,1-5 mm. Jedná se o rozptýlená jednotlivá vlákna používaná pro vyztužení termoplastů.
- **Tkaniny** – Jsou to plošné výrobky z pramenců nebo jednotlivých vláken. Pramence jsou na sebe uloženy kolmo. Tkaniny jsou snáze zpracovatelné v porovnání s jednosměrně orientovanou výztuží, avšak zvlnění při proplétání je příčinou ztráty mechanických vlastností.



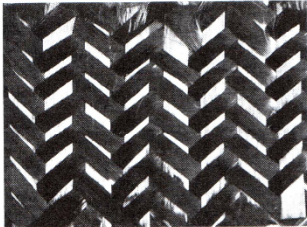
plain



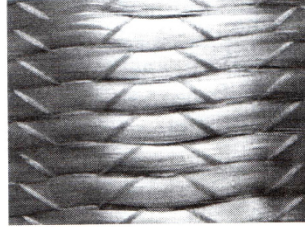
twill



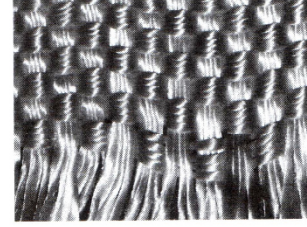
satin



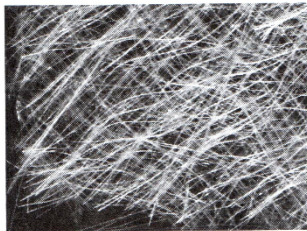
triaxial



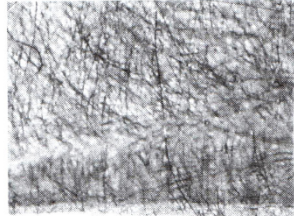
stitched



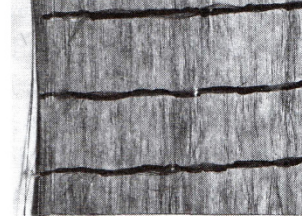
basket



continuous strand mat



veil



stitched

Obr. 12.: Formy uspořádání vláken [7]

2.2.6 Matrice

Matrice je označení pro podpůrnou složku kompozitního materiálu. Obklopuje vyztužující vlákna a po vytvrnutí uchovává trvalý tvar součásti. Matrice plní v kompozitu tyto úlohy: [6]

- Přenáší namáhání na vlákna.
- Distribuuje namáhání z vlákna na vlákno.
- Zajišťuje stálé polohy vláken v součásti.
- Chrání vlákna před vlivy okolí.

Matrice je možné rozdělovat dle materiálů, z kterých jsou vyrobeny na: [9]

- Polymerní
- Kovové
- Uhlíkové
- Skleněné
- Sklokeramické
- Keramické

Matrice by si měla udržovat své vlastnosti i po delším časovém úseku či po prvních poruchách vláknové výztuže. Její měrné podélné prodloužení při tahovém namáhání by mělo vždy být větší, nežli je tomu u vláken výztuže. To neplatí pro matrice keramické, skelné, sklokeramické a uhlíkové. Tyto matrice mají mezní podélné prodloužení při lomu menší než vlákna. Tuto podmínku splňují polymerní a kovové matrice. Nejčastěji se pro výrobu kompozitu používají matrice přivedené v kapalném stavu. Z tohoto důvodu je jednou z hlavních vlastností matrice její povrchová energie, viskozita. Ta ovlivňuje rozsah jejího použití pro různé technologie a zároveň schopnost matrice prosycovat těžko přístupné geometrie součástí. Velmi důležitou vlastností matrice je i její schopnost smáčet výstužná vlákna. Požadavek na matici je tedy takový, aby pro výztuž s vysokou povrchovou energií měla matrice v kapalném stavu co nejmenší povrchovou energii. [9]

Polymerní matrice

Jelikož jsou polymerní matrice v dnešní době nejvíce využívané matrice pro výrobu kompozitních materiálů, bude tato skupina matic dále podrobněji rozebrána.

U polymerních matic rozlišujeme dva druhy materiálu. Jsou to termosety (reaktoplasty) a termoplasty. Z historického hlediska se nejvíce používaly vyztužené nenasycené polyesterové (UP-R) nebo epoxidové (EP-R) pryskyřice. Obě tyto pryskyřice patří do oblasti reaktivních pryskyřic a i v dnešní době mají v průmyslu většinové zastoupení. Termosetické pryskyřice se aplikují společně s katalyzátorem, urychlovačem a často se dodává i teplo. Tímto procesem získá termosetická pryskyřice své konečné vlastnosti. Termosetické pryskyřice dosahují vysokých hodnot pevnosti a tuhosti, avšak jejich tažnost se pohybuje v řádu procent a jsou křehké. Tyto problémy je možné řešit přidáním modifikačních přísad. Jen minimum termoplastických kompozitů dosahuje obdobných hodnot pevnosti a tažnosti, jako je tomu

u termosetů. Termoplastické pryskyřice jsou též méně odolné proti chemickým teplotním vlivům. Avšak termoplastické pryskyřice mají výbornou houževnatost, také při jejich vytvrzovacím procesu nevzniká chemická reakce. Pouze dochází k jejich roztavení a následnému ztuhnutí. Chemická reakce vznikající při vytvrzovacím procesu u reaktoplastických pryskyřic může ovlivňovat jakost výrobku nebo může narušovat životní prostředí. Prosycování termoplastické pryskyřice nastává tedy v její roztavené fázi. Viskozita roztavené fáze je však řádově vyšší, nežli je tomu u prosycování termosetických pryskyřic. Tento fakt klade zvýšené nároky na technologii prosycování termoplastických pryskyřic. Je nutné zajistit rychlé prosycení a to vlivem vnějších sil. Při výrobě kompozitu je na prosycení termoplastickou pryskyřicí nutné vyčlenit nový výrobní proces, což může snížit produktivitu výroby. [6]

Nenasycené polyesterové pryskyřice (UP-R)

Tyto reaktivní pryskyřice při vytvrzování uvolňují teplo a dochází k jejich objemovému smrštění. Je možné je vytvrzovat za pokojových teplot. Po vytvrzení jsou bezbarvé, avšak vlivem působení UV záření žloutnou. Mají nízkou viskozitu, dobře smáčí vlákna a mají nízké vytvrzovací rychlosti. Nízká vytvrzovací rychlost je důsledkem snadné volby objemového zastoupení jednotlivých složek (styren, katalyzátor/urychlovač). Ke zpracování těchto pryskyřic je však zapotřebí styrenu, který klade nároky na životní prostředí. Používají se především pro tvarově stálé velkoplošné dílce a pro aplikace s krátkými vytvrzovacími časy. [6]

Vinylesterové pryskyřice (VE-R)

Tyto pryskyřice se také nazývají *fenakrylátové pryskyřice* (PHA-R) a zpracovávají se stejně jako polyesterové pryskyřice (UP-R). Technologie výroby je stejná jako u polyesterových pryskyřic, tedy stejně jako ony jsou i vinylesterové pryskyřice rozpustné ve styrenu a mezi hlavní výhody patří variabilita při zpracování. Hlavní rozdíl oproti polyesterové pryskyřici je přítomnost esterových vazeb v koncových monokrystalových skupinách. To má za důsledek zvýšení houževnatosti. Tyto pryskyřice je možné použít v aplikacích s korozním prostředím a jejich cena je vyšší nežli u UP-R. [6]

Epoxidové pryskyřice (EP-R)

Tyto termosetické pryskyřice jsou za pokojové teploty kapalné až pevné látky. Používají se pro vysoce kvalitní materiály. Díky svým izolačním vlastnostem našli uplatnění v elektrotechnice, v aplikacích leteckého průmyslu a stále častěji se používají pro výrobu listů větrných elektráren. Viskozita směsi pryskyřice-tvrdidlo je u EP-R vyšší než u UP-R, což zhoršuje schopnost prosycování vláken. Objemové smrštění těchto pryskyřic vzniká v kapalné fázi a je poměrně malé, je tedy velmi dobře kompenzováno přitékající pryskyřicí. Urychlení vytvrzovací reakce pomocí urychlovačů a katalyzátorů je zde možné pouze v omezené míře, proto vytvrzovací časy nedosahují hodnot předchozích pryskyřic. Tyto pryskyřice jsou náchylné na přesný stechiometrický poměr mísení pryskyřice/tvrdidlo. Dosahují dobrých mechanických vlastností při dynamickém namáhání [6]

Fenolické pryskyřice (PF-R)

Tyto reaktivní pryskyřice nesou jen malý podíl na celkové výrobě klasických výstužných kompozitů. Při jejich výrobě se uvolňují nebezpečné těkavé látky a výsledné prvky jsou křehké. Mezi jejich hlavní výhody patří tepelná a chemická odolnost. Mají nízkou hořlavost a jejich hustota kouřových plynů je velmi nízká. Díky těmto vlastnostem našly fenolické pryskyřice uplatnění v interiérech letadel a jiných dopravních prostředků. [6]

2.2.7 Vícevrstvé kompozity

Vrstva laminátového kompozitu se nazývá jednoduše vrstva nebo lamina. Lamina zpravidla obsahuje jedinou výstužnou vrstvu jednosměrnou či vícesměnnou. Samotná lamina je svou tloušťkou nevhodná pro samostatné použití v technické aplikaci, proto se lamina vrství na sebe a vytváří se tak nová struktura nazývaná laminát. V laminátu je orientace jednotlivých vrstev volena vždy tak, aby byl výsledný laminát co nejvíce odolný vůči jeho zatížení. Je tedy bezpodmínečně nutné znát přesné rozložení zatížení v jednotlivých vrstvách. Čím více je známo o přesné napjatosti vrstev, tím lépe může být navržena orientace a složení vrstev. [5]

Vícevrstvé kompozity dosahují v dnešní době podobných pevností jako běžně používané kovové materiály. Rozdíl nastává v tuhosti těchto materiálů. Lamináty jakožto izotropní materiály dosahují výrazně nižších tuhostí, nežli je tomu u ortotropních materiálů. To se projevuje výrazným přetvořením při stejném zatížení. Tomuto faktu je třeba přizpůsobit i konstrukci výsledného prvku. Velmi nepříznivé je namáhání tlakem. V tomto případě hrozí

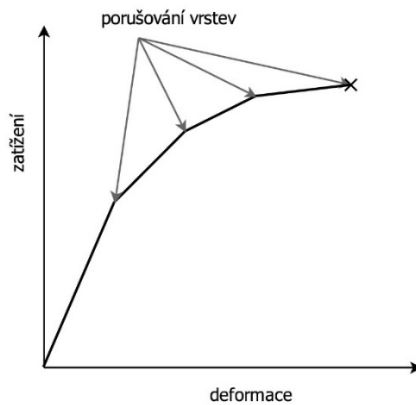
ztráta stability konstrukce. Z těchto vlastností laminátu vyplývá i rozsah jeho použití v technické praxi. Lamináty se používají pro tenkostěnné prvky zatížené především membránovým stavem napjatosti. Ztrátě stability je u těchto prvků zamezeno vhodným tvarem (uzavřený profil, skořepina, sendvičové konstrukce). K analýze napětí a přetvoření laminátového dílu ve většině případů stačí použít dvourozměrnou teorii pružnosti. [6]

K návrhu dílů z vícevrstvého kompozitního materiálu se používají dvě základní teorie: [6]

- **Síťová teorie** - pracuje rozdílně s matricí a vlákny. Vlákna jsou v této teorii brána jako prvek nosný přenášející zatížení a to pouze ve svém podélném směru. Matrice nepřináší do pevnosti kompozitu žádný podíl.
- **Teorie kontinua** – zohledňuje miktotrhlíčky vznikající na fázovém rozhraní vlákno/matrice. Tyto trhliny vedou k porušení laminátu dříve nežli je vyčerpána pevnost samotných vláken. Složky matrice a vlákna jsou brány jako kontinuum se směrově závislými (anizotropními) vlastnostmi. Teorie kontinua nám dává komplexnější analýzu o chování materiálu.

2.2.8 Druhy porušení vrstveného kompozitu

Pevnost vrstvy je funkcí její orientace. Lze tedy předpokládat, že porušování jednotlivých vrstev bude nastávat postupně. Jednotlivé vrstvy se budou porušovat pod rostoucím zatížením ve směru rovnoběžném s vlákny dané vrstvy. Jak už bylo řečeno, příčná pevnost jednosměrných vrstev nedosahuje zdaleka pevnosti podélné. Vrstvy orientované kolmo na směr zatížení budou porušeny jako první. Takto poškozený laminát ztrácí svou původní tuhost, je však stále schopen přenášet napětí. Pouze je toto napětí doprovázeno větší tvarovou změnou laminátu, nežli je tomu u neporušeného dílu.



Obr. 13.: Deformační chování hypotetického laminátu [5]

Problematika porušení nekonečně dlouhých vláken vlivem vzniku trhlin je podrobněji rozebrána v kapitole 2.2.2, proto se nebude práce v této kapitole k tomuto problému nadále vracet. Na problematiku porušení zde bude nahlíženo z hlediska druhu namáhání, které porušení kompozitu způsobuje. [5]

Porušení vlivem podélných tahových zatížení

V jednosměrných vrstvách kompozitních materiálů se vlivem podélného tahového zatížení porušení zahajuje přetržením vlákna v jeho nejslabším místě. S rostoucím zatížením roste i počet přetržených vláken. Jakmile počet přetržených vláken překročí kritickou hodnotu, oslabí se průřez kompozitu natolik, že dojde k porušení kompozitu. [5]

Porušování podélným tlakovým zatížením

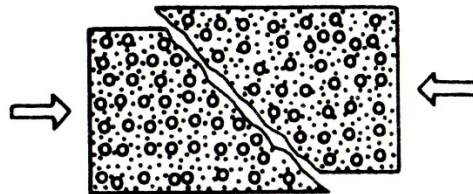
Tlakové zatížení je u kompozitů nežádoucí. Nastane-li, pak mají dlouhá vlákna snahu k vybočování. Vybočování vede k vzniku mikrotrhlin na rozhraní vlákno/matrice, které následně vede k ztrátě stability kompozitu. [5]

Porušení příčným tahovým namáháním

Zatížení působící kolmo na směr vláken vytváří koncentrace napětí na rozhraní matrice/vlákno. K porušení dochází v tomto případě buďto v matrici, nebo již na zmíněném rozhraní matrice/vlákno. Pevnost kompozitu v kolmém směru na vlákna se blíží pouze pevnosti matrice. Konstrukcí se snažíme tomuto smyslu zatížení předcházet. [5]

Porušení příčným tlakovým namáháním

Jednosměrné kompozity vystavené tomuto namáhání selhávají vlivem smykového porušení matrice, které je doprovázeno drcením vláken a oddělením jednotlivých složek. [5]

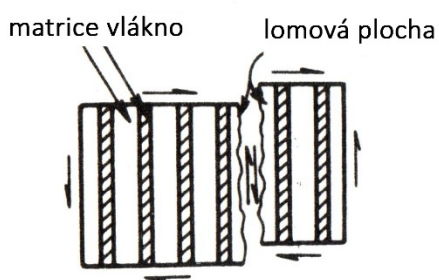


Obr. 14.: Smykové porušení jednosměrných kompozitů namáhaných příčným tlakovým zatížením [5]

Porušení namáháním působícím ve smykové rovině

Při tomto druhu namáhání dochází ke smykovému porušení matrice, oddělení jednotlivých složek či kombinaci obou těchto způsobů porušení. Porušení tedy může nastat: [5]

- Porušením matrice vlivem smyku
- Porušením matrice vlivem smyku a oddělením složek
- Porušením oddělením složek



Obr. 15.: Porušení namáháním působícím ve smykové rovině [5]

2.2.9 Pevnost vláknových kompozitů

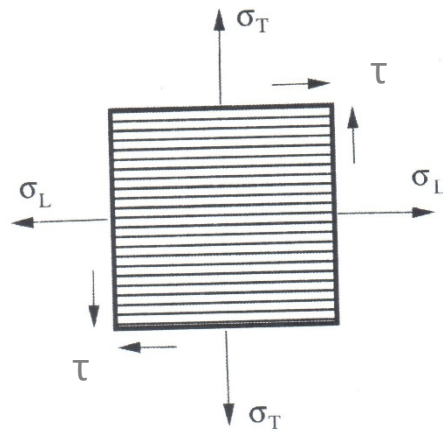
Stanovení pevnosti kompozitních materiálů výrazně komplikuje jejich heterogenost. Pevnost má u těchto materiálů stochastický charakter a lom je lokální proces, jehož chování je zmíněno v předchozích kapitolách. Také jsou tyto materiály díky nutnosti spojení dvou chemicky odlišných fází mnohem náchylnější k vadám ve výsledné struktuře. V důsledku těchto faktů není možné uplatnit pro zjišťování pevnosti kritéria používaná pro homogenní materiály [10].

Izotropní materiály jsou popsány normálovou a smykovou pevností. Lomová kritéria izotropních materiálů spočívají v hledání maximálních složek normálových a smykových hlavních napětí. Lom materiálu nastává, překročí-li stanovené hodnoty napětí hodnoty kritické. Tyto metody slouží jako základ kritérií porušení kompozitních materiálů. Hlavní kritéria jsou [11]:

- Kritérium maximálního napětí
- Kritérium maximální deformace
- Hillovo kritérium pevnosti
- Kritérium Tsai-Hill
- Kritérium Tsai-Wu
- Puckovo kritérium pevnosti

Kritérium maximálního napětí

Toto kritérium rozkládá v daném bodě laminy celkové napětí na složky normálového a smykového napětí. Následně jsou tyto hodnoty složek porovnány s hodnotami limitní pevnosti laminy. K porušení dojde při překročení limitních hodnot pevnosti laminy. Orientace složek napětí v lamině jsou zobrazeny na Obr. 16. [11]



Obr. 16.: Zobrazení působení složek napětí v lamině [11]

Jsou-li tyto rovnice splněny, nedojde k porušení lamina.

$$-F_{Lc} < \sigma_L < F_{Lt} \quad (15)$$

$$-F_{Tc} < \sigma_T < F_{Tt} \quad (16)$$

$$-F_{LT} < \tau < F_{LT} \quad (17)$$

Kritérium maximální deformace

Ve většině kompozitních lamin existuje lineární vztah mezi napětím a deformací až do bodu lomu. Kritérium maximální deformace lze tedy snadno získat z napětového kritéria pouhým upravením vztahů. Princip kritéria je tedy obdobný. Porušení lamina nastane v okamžiku překročení některé z hodnot složek deformace limitní hodnoty. Kritérium maximální deformace lze vyjádřit rovnicemi [11]:

$$-F_{\varepsilon Lc} < \varepsilon_L < F_{\varepsilon Lt} \quad (18)$$

$$-F_{\varepsilon Tc} < \varepsilon_T < F_{\varepsilon Tt} \quad (19)$$

$$-F_{\varepsilon LT} < \gamma_{LT} < F_{\varepsilon LT} \quad (20)$$

Kritérium Tsai-Wu

Toto kritérium vzniklo z Baltramiho teorie celkové energie napjatosti pevného tělesa pro homogenní materiály. Tsai a Wu aplikovali tuto teorii pro izotropní materiály na laminu ve stavu rovinné napjatosti. Výsledkem bylo lomové kritérium ve tvaru [11]:

$$H_1\sigma_1 + H_2\sigma_2 + H_6\tau_{12} + H_{11}\sigma_1^2 + H_{22}\sigma_2^2 + H_{66}\tau_{12}^2 + 2H_{12}\sigma_1\sigma_2 \geq 1 \quad (21)$$

Tento popis na rozdíl od modelu Tsai-Hill je obecnější a umožňuje tak rozlišit typ lomu. Koeficienty H_i a H_{ij} lze vyjádřit pomocí materiálových parametrů laminy [11]:

$$H_1 = \frac{1}{(\sigma_1^T)_{ult}} - \frac{1}{(\sigma_1^C)_{ult}} \quad (22)$$

$$H_{11} = \frac{1}{(\sigma_1^T)_{ult} \cdot (\sigma_1^C)_{ult}} \quad (23)$$

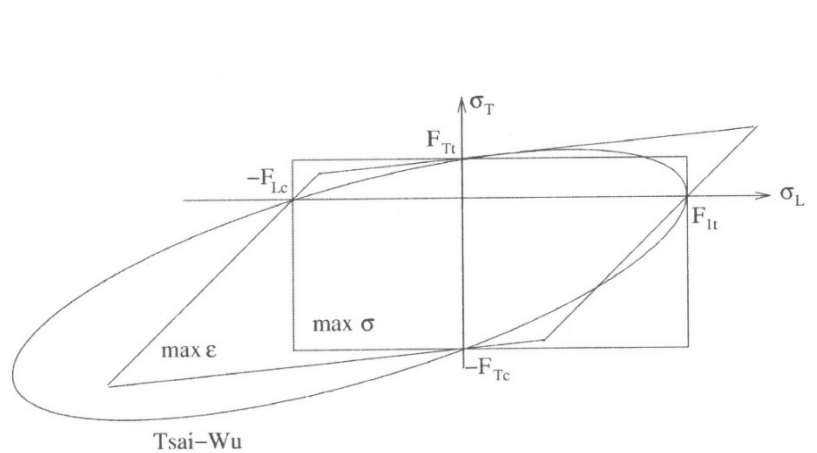
$$H_2 = \frac{1}{(\sigma_2^T)_{ult}} - \frac{1}{(\sigma_2^C)_{ult}} \quad (24)$$

$$H_{22} = \frac{1}{(\sigma_2^T)_{ult} \cdot (\sigma_2^C)_{ult}} \quad (25)$$

$$H_{66} = \frac{1}{(\tau_{12})_{ult}^2}, \quad H_6 = 0 \quad (26)$$

Konstanta H_{12} je funkcí ostatních konstant H_i a H_{ij} :

$$H_{12} = \frac{2}{\sigma^2} - \frac{(H_1 + H_2)}{\sigma} - \frac{1}{2}(H_{11} + H_{22} + H_{66}) \quad (27)$$



Obr. 17.: Zobrazení mezních křivek kritérií maximálního napětí, deformace a teorie Tsai-Wu [11]

Kapitola 3

Konstrukční úloha

3.1 Analýza stávajícího provedení vidlice

Stávající provedení nosítek EXTERO N114-P113 (Obr. 18) (dále jen EXTERO) umožňuje nastavení nosítka do sedmi výškových pozic. Ovládání předních kol umožňuje jejich ovládání či zajištění v přímé poloze. Zadní kola jsou opatřena brzdou pro zabrzdění nosítek. Velkou výhodou jsou kola o velkém průměru, která zajišťují snadnou manipulaci i v těžším terénu. Rám nosítek je vyroben z lehké hliníkové konstrukce. Volba materiálů a propracovanost konstrukce nosítka přispívá k nízké hmotnosti celé sestavy, ta je pro aktuální stav 50 kg.

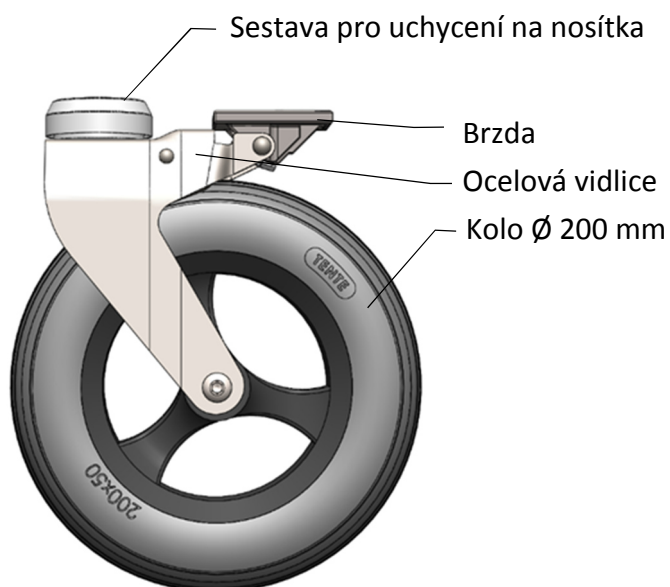
Jeden z hlavních parametrů ovlivňující úspěch nosítka EXTERO na trhu je právě hmotnost. Ta je volbou materiálů i konstrukcí prvků vyráběných společnostmi Mediol z dlouhodobého hlediska na svém minimu. Proto bylo nutné zaměřit se na hmotnost nakupovaných komponent.



Obr. 18.: Clinic EXTERO N114-P113

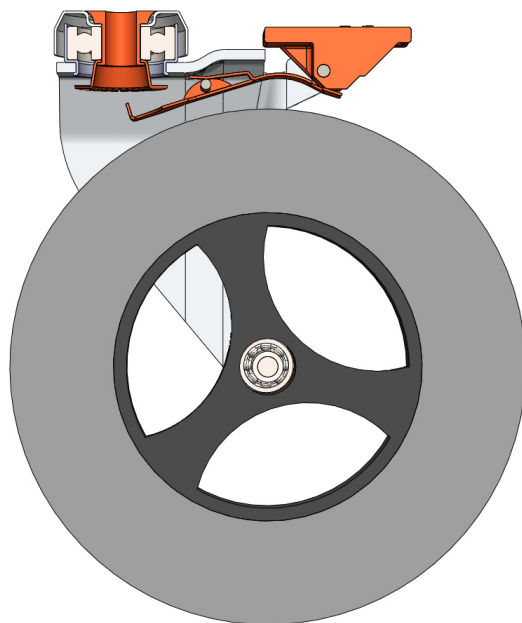
3.1.1 Zadní vidlice

Zadní vidlice se skládá z kola o průměru 200 mm, mechanismu brzdy a sestavy pro uchycení vidlice na nosítka (Obr. 19).



Obr. 19.: 3D model zadní vidlice

V řezu sestavy kola (Obr. 20) je zvýrazněna sestava brzdy a aretace rotace okolo svislé osy. Při zabrzdění kola přes sešlápnutí pryžové brzdy dojde zároveň k zasunutí profilovaného plechu do drážkovaného kotouče uchyceného na vnitřní kroužek radiálního kuličkového ložiska. Tímto je celá vidlice zabrzděna.

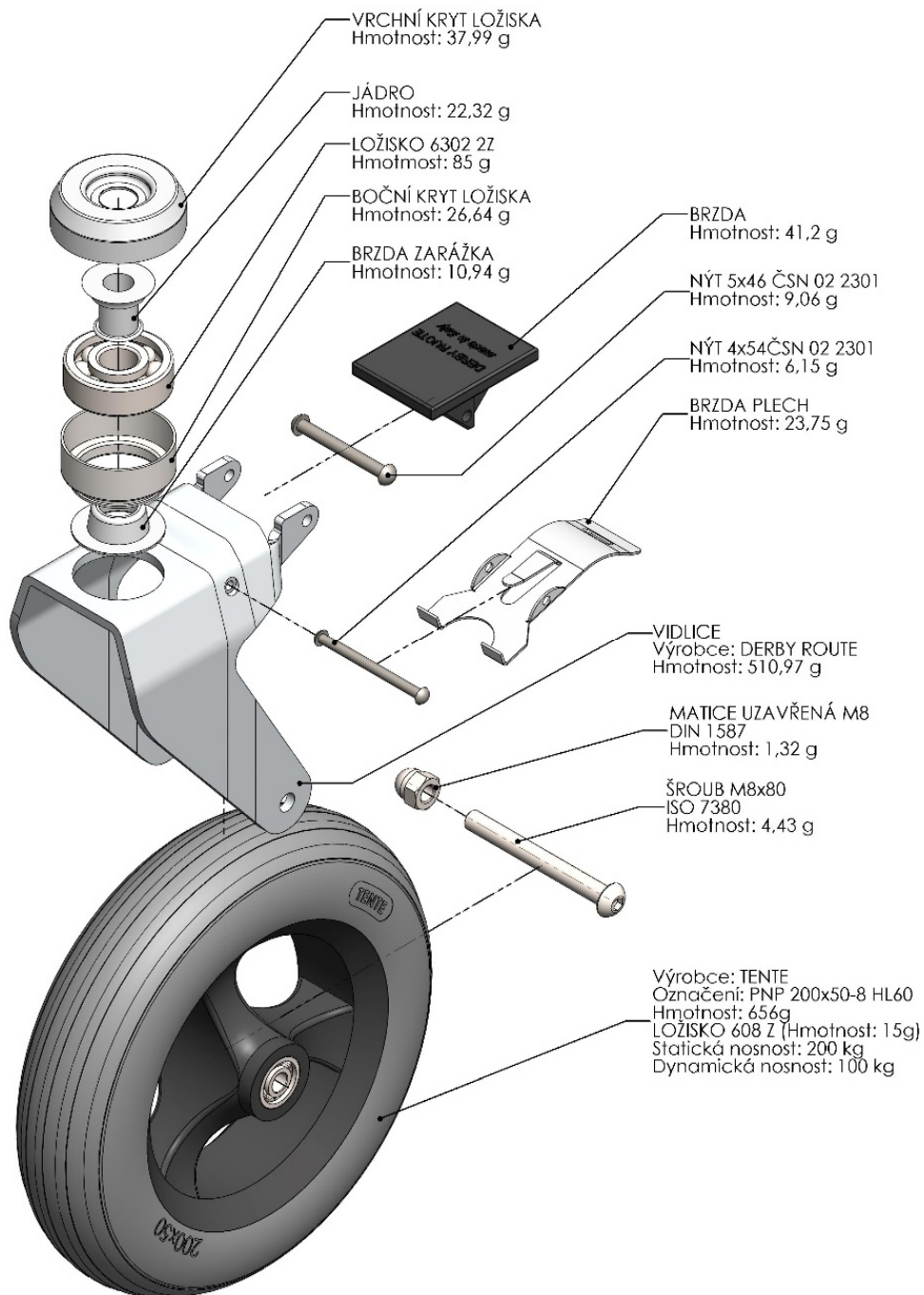


Obr. 20.: Řez sestavou zadní (brzděné) vidlice.

Pro rotaci vidlice okolo svislé osy je použito radiální kuličkové ložisko CFC 6302Z. Ložisko takto umístěno v konstrukci vidlice je namáháno převážně axiální silou vzniklou od zatížení nosítka. Jak známo, radiální ložisko je schopno přenést i složku axiálních sil, primárně je však navrženo pro přenos radiálních sil. Ložisko je tedy předimenzováno tak, aby složka axiální síly byla ložiskem přenesená.

3.1.2 Hmotnostní analýza

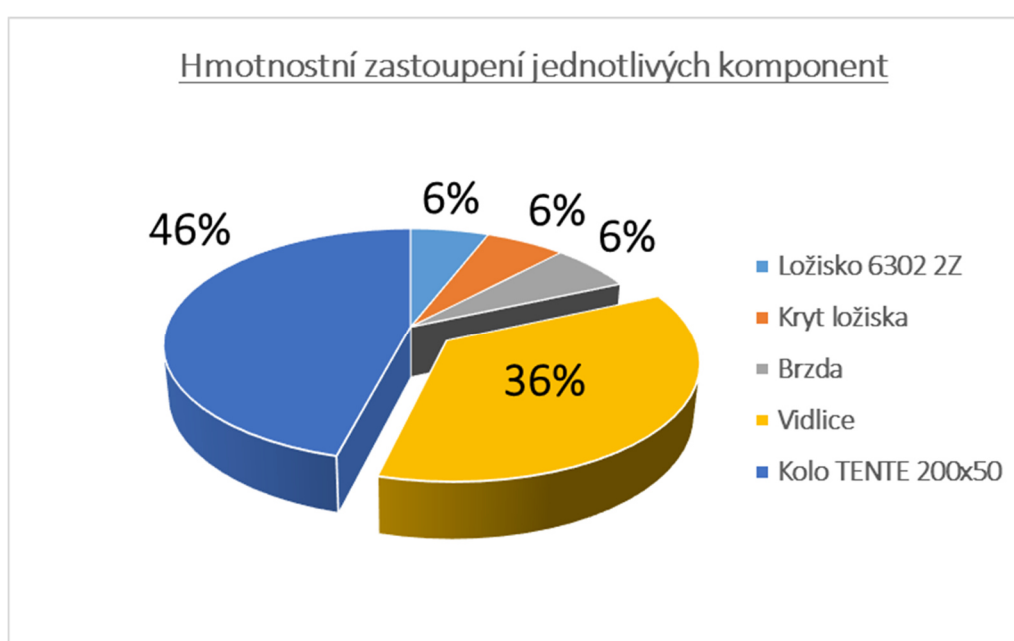
Pro pochopení správné funkce sestavy vidlice a hmotnostní zastoupení jednotlivých komponent byla provedena hmotnostní analýza (Obr. 21).



Obr. 21.: Hmotnostní analýza stávajícího řešení

Z hmotnostní analýzy sestavy vidlice (Obr. 22) je patrná možná hmotnostní úspora při změně materiálu vidlice. Největší podíl hmotnosti má kolo, to je však pro tuto sestavu dodáváno externím dodavatelem. Při snížení váhy kola záměnou za jiný katalogový produkt snížíme maximální únosnost kola a jeho průměr. Průměr kola je však důležitým parametrem celé sestavy nosítek a ovlivňuje pohyb nosítek v těžkém terénu. Hmotnostní úspora na kole je tedy možná pouze vývojem vlastního kola s požadovaným průměrem a nosností.

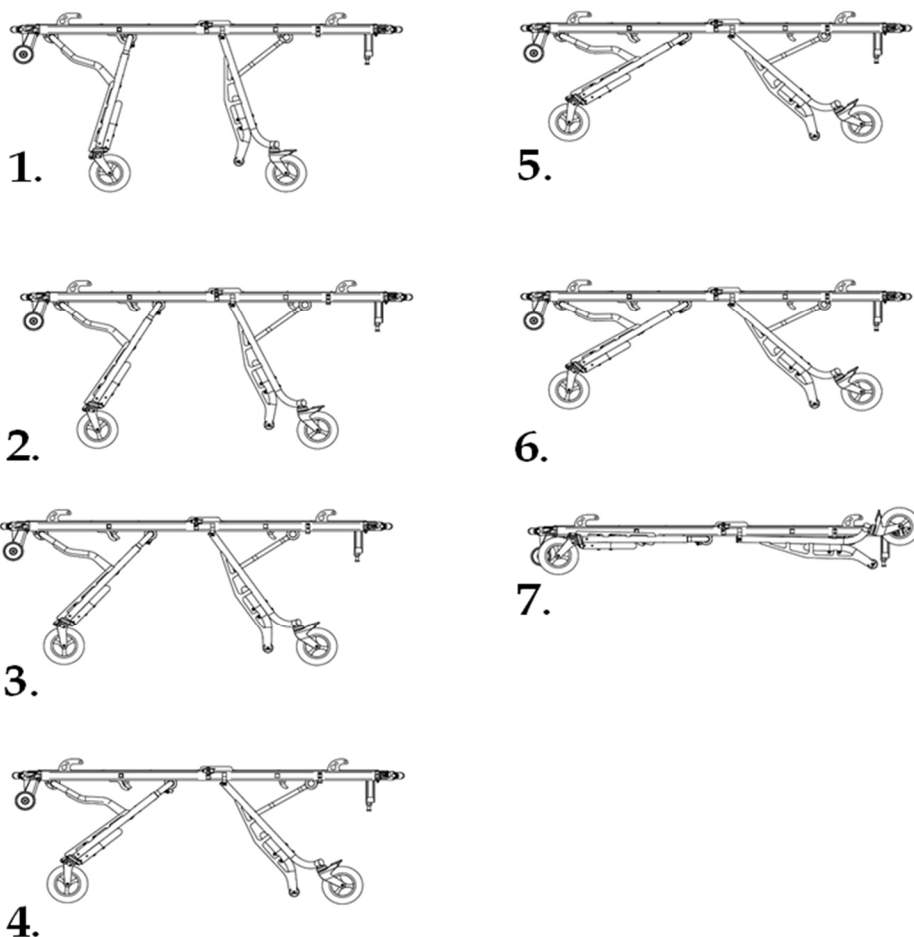
Značné úspory hmotnosti na sestavě vidlice lze tedy dosáhnout pouze vhodnou konstrukcí vidlice, brzdy a návrhem vhodných materiálů.



Obr. 22.: Hmotnostní zastoupení jednotlivých komponent

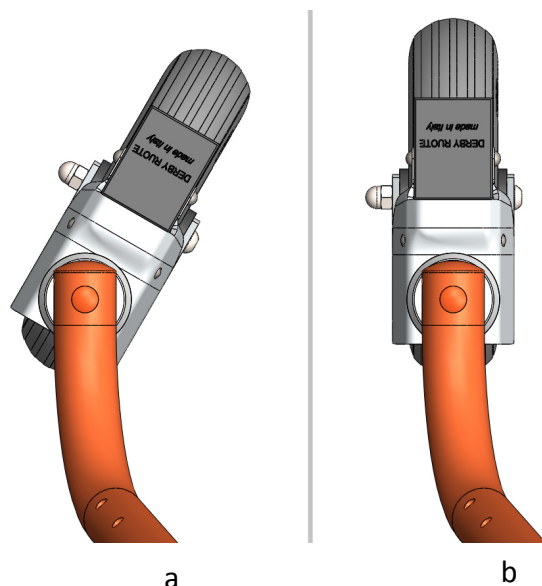
3.1.3 Rozbor zatížení

Výpočtové zatížení bylo stanoveno z pracovních poloh nosítek EXTERO (Obr. 23). Pro jednotlivé polohy byl vypočten směr a velikost zatížení na vidlici. Hlavní zatěžující silou je gravitační síla plně naložených nosítek přepočtena na jednu vidlici. Uvažuje se s jejím významným přetížením v důsledku dynamických rázů. Takto stanovené zatížení vidlice je na straně bezpečnosti a simuluje i možné krátkodobé přetížení vidlice v provozu. Výpočtové zatížení na jednu vidlici nosítka je stanoveno jako ekvivalent 150 kg.



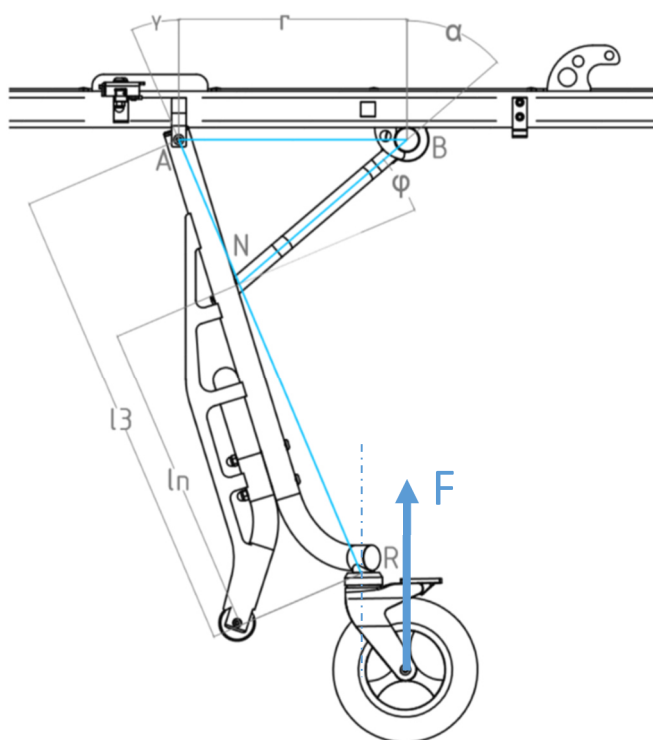
Obr. 23.: Schéma pracovních pozic nosítek EXTERON114-P113

Při zabrzdění kola nastává současně i blokáce rotace kola okolo svislé osy. Jestliže polohování nosítka je podmíněno zabrzděním kol, pak tento princip brždění umožňuje zabrzdění kola a jeho axiální aretaci v poloze nevyhovující korektnímu polohování (Obr. 24), neboť umožňuje axiální aretaci v rozsahu 360°. Je tedy pouze na obsluze, zda kolo zajistí v požadované poloze. Nedodržení zásady zabrzdění kola ve správné poloze má za následek přetížení vidlice, respektive změnu směru výsledné síly působící na vidlici od zatížení nosítka. Ocelová konstrukce vidlice stávajícího řešení je silně předimenzována, proto k destrukci vidlice tímto způsobem dochází jen v ojedinělých případech. Pro návrh kompozitové vidlice je tento problém zásadní. Vidlice je tedy počítána pro všechny polohy (Obr. 23) při správné orientaci zatěžující síly F , což je důsledek správného zabrzdění (Obr. 24). Orientace působení zatěžující síly F je dobře patrná z obrázku 28, kde je síla F zobrazena při aplikaci v MKP výpočtu. Tato orientace se shoduje s reálným zatížením.



Obr. 24.: Možné pozice kola při polohování (a - špatná poloha, b - správná poloha)

Úhel odklonu zatěžující síly pro jednotlivé polohy byl stanoven pomocí schématu na obrázku 25. Vypočtené úhly sklonu jsou uvedeny v tabulce 3. Sklon zatěžující síly F je brán jako odklon síly od osy hlavního ložiska vidlice. Pro polohu 6. přechází zatížení na pomocná kola, proto není třeba počítat kola pro tuto polohu. Do pozice 7. se nosítka skládají při transportu ambulantní technikou a zatížení přenáší taktéž pomocná kola.



Obr. 25.: Schéma výpočtu sklonu zátěžné síly zadní vidlice pro polohu č. 1 (zatěžující síla je pouze v této poloze rovnoběžná s osou hlavního ložiska vidlice. Sklon síly je pro tuto polohu nulový)

Poloha	Sklon síly [°]
č. 1	0
č. 2	9
č. 3	18
č. 4	25
č. 5	31
č. 6	-
č. 7	-

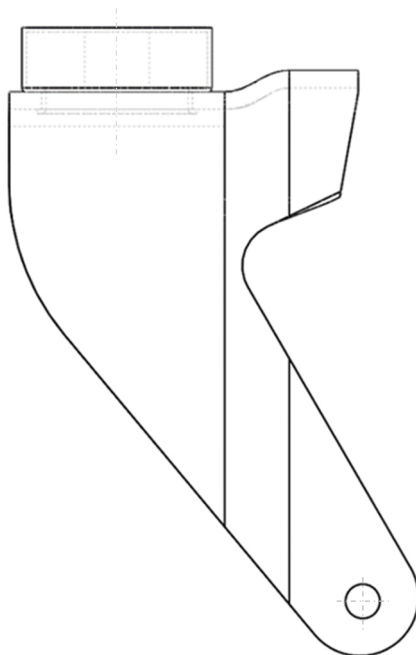
Tabulka 3.: Tabulka sklonu zatěžující síly pro polohy lehátka

3.1.4 Zjednodušení geometrie vidlice pro MKP výpočet

Pro výpočet stávajícího řešení vidlice bylo použito zjednodušení geometrie vidlice. Geometrie pro uchycení brzdy se nepodílí na přenosu hlavního zatížení, proto je z výpočtové geometrie odstraněna.

Pro aplikaci okrajových podmínek je k vidlici připojena i sestava plechu s ložiskem sloužící k upnutí k nosítku. Ložisko je modelováno zjednodušeně bez prokreslení elementů pro usnadnění vysíťování ložiska.

Upravená geometrie vidlice s díly pro aplikování okrajových podmínek je zobrazena na obrázku 26.

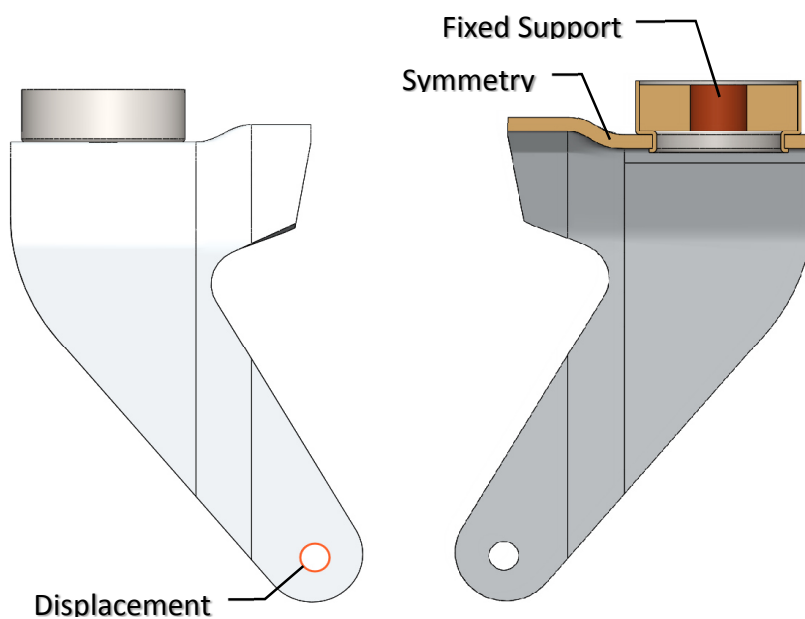


Obr. 26.: Zjednodušená sestava vidlice použitá pro výpočet

3.1.5 Okrajové podmínky pro MKP výpočet stávající vidlice

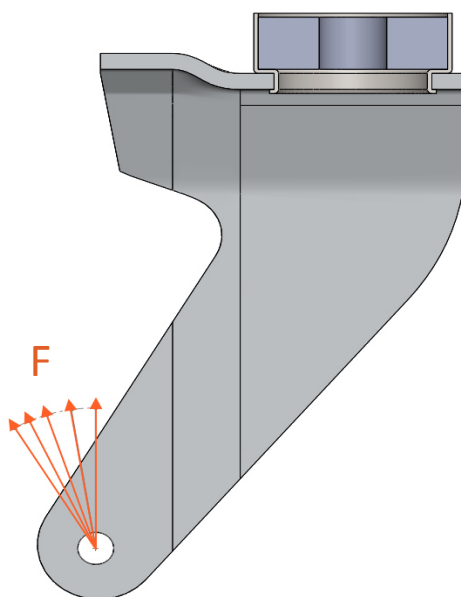
Snaha přiblížit výpočet reálnému stavu vidlice vedla k zavedení těchto okrajových podmínek:

- **Fixed Support:** Nahrazuje uložení vnitřního ložiskového kroužku do čepu nosítek. Ploše, na níž je funkce aplikována, zakáže pohyb v předepsaných směrech. V této aplikaci je zakázán pohyb ve všech směrech.
- **Displacement:** Nahrazuje funkci čepu kola. Čep zabraňuje zvětšení rozteče vidlice (otevření vidlice) pod tíhou zatížení. Funkce Displacement zakazuje pohyb v předepsaných osách. V této aplikaci je zakázán pohyb ve směru osy kola.
- **Symmetry:** Zjednodušuje výpočet pouze na polovinu modelu pro zkrácení výpočtového času.
- **Bonded:** Kontakty objemů v sestavě jsou řešeny pomocí funkce Bonded. Tato funkce spojí definované plochy pevně k sobě. Elementům sítě zakáže vzájemný posuv.



Obr. 27.: Aplikace okrajových podmínek

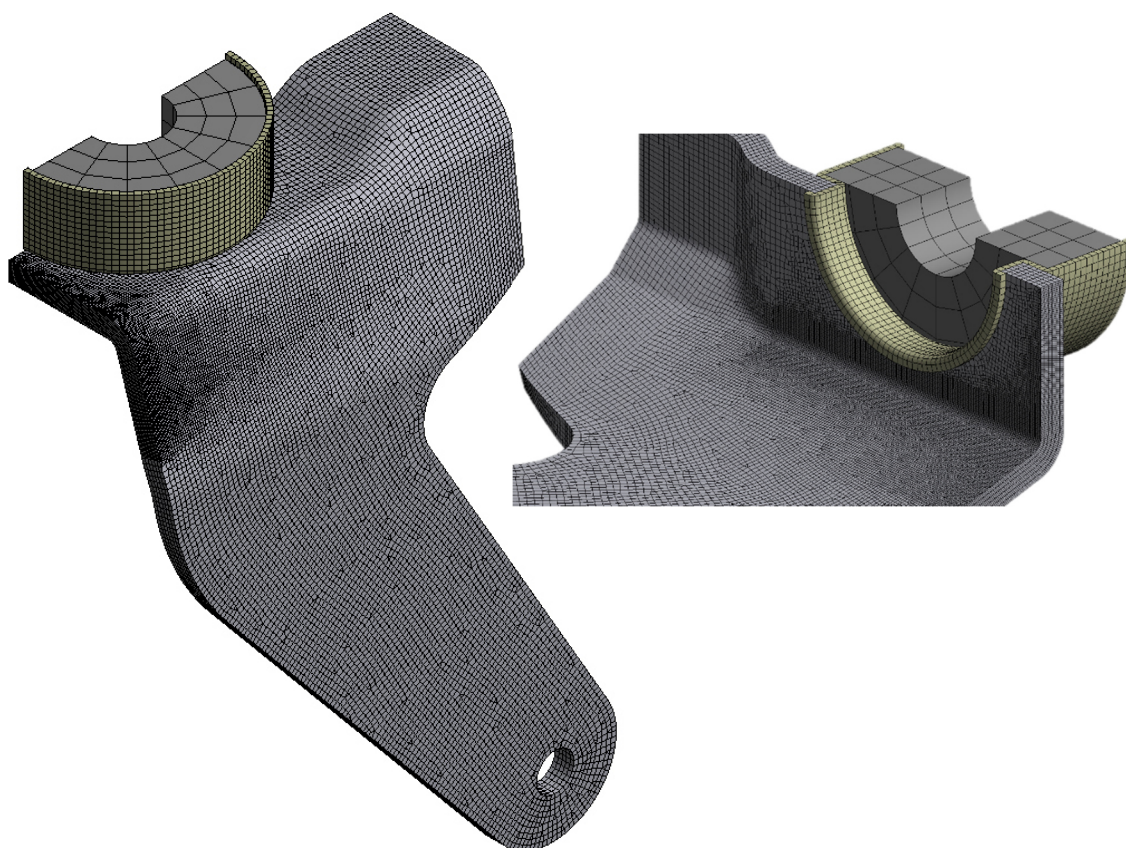
Zatížení silou je realizováno pomocí funkce Remote Force, která zajistí rozložení síly na plochu, na níž je aplikována. Síla je pro každou polohu nosítek odkloněna od svislice o úhel uvedený v tabulce 3.



Obr. 28.: Umístění zatížení s ukázkou orientace sil při výpočtu

3.1.6 Síť modelu pro pevnostní analýzu

Síť modelu je vytvořena s velikostí elementů 1 mm. Zjemnění sítě je provedeno v místě s očekávaným maximem napětí. Zjemnění sítě v této oblasti je na velikost elementu 0,25 mm. Ložisko slouží ve výpočtu pouze pro aplikaci okrajových podmínek, proto je síť v jeho objemu hrubá. Velikost elementu v objemu ložiska je nastavena na hodnotu 5 mm.



Obr. 29.: Síť modelu pro MKP analýzu

Parametry sítě jsou uvedeny v tabulce 4.

	Počet uzlů	Počet elementů
Vidlice	633 711	173 044
Ložisko	488	72
Sedlo	11 414	1 620
Celkové hodnoty	645 613	174 736

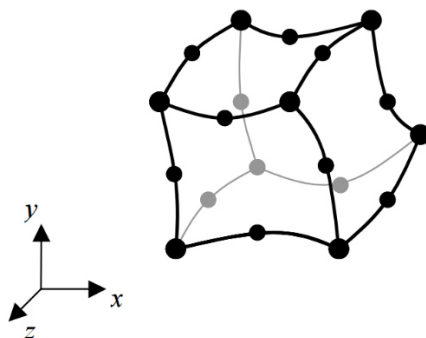
Tabulka 4.: Parametry sítě

Materiál pro výpočet byl brán z knihovny softwaru ANSYS Workbench. Jedná se o konstrukční ocel. Parametry zvoleného materiálu jsou uvedeny v tabulce 5.

Konstrukční ocel - Structural Steel				
Mez kluzu	Mez pevnosti	Younguv modul pružnosti	Poissonovo číslo	Hustota
[N·mm ⁻²]	[N·mm ⁻²]	[N·mm ⁻²]	[-]	[N·mm ⁻²]
240	460	200000	0,3	7850

Tabulka 5.: Materiálové charakteristiky konstrukční oceli

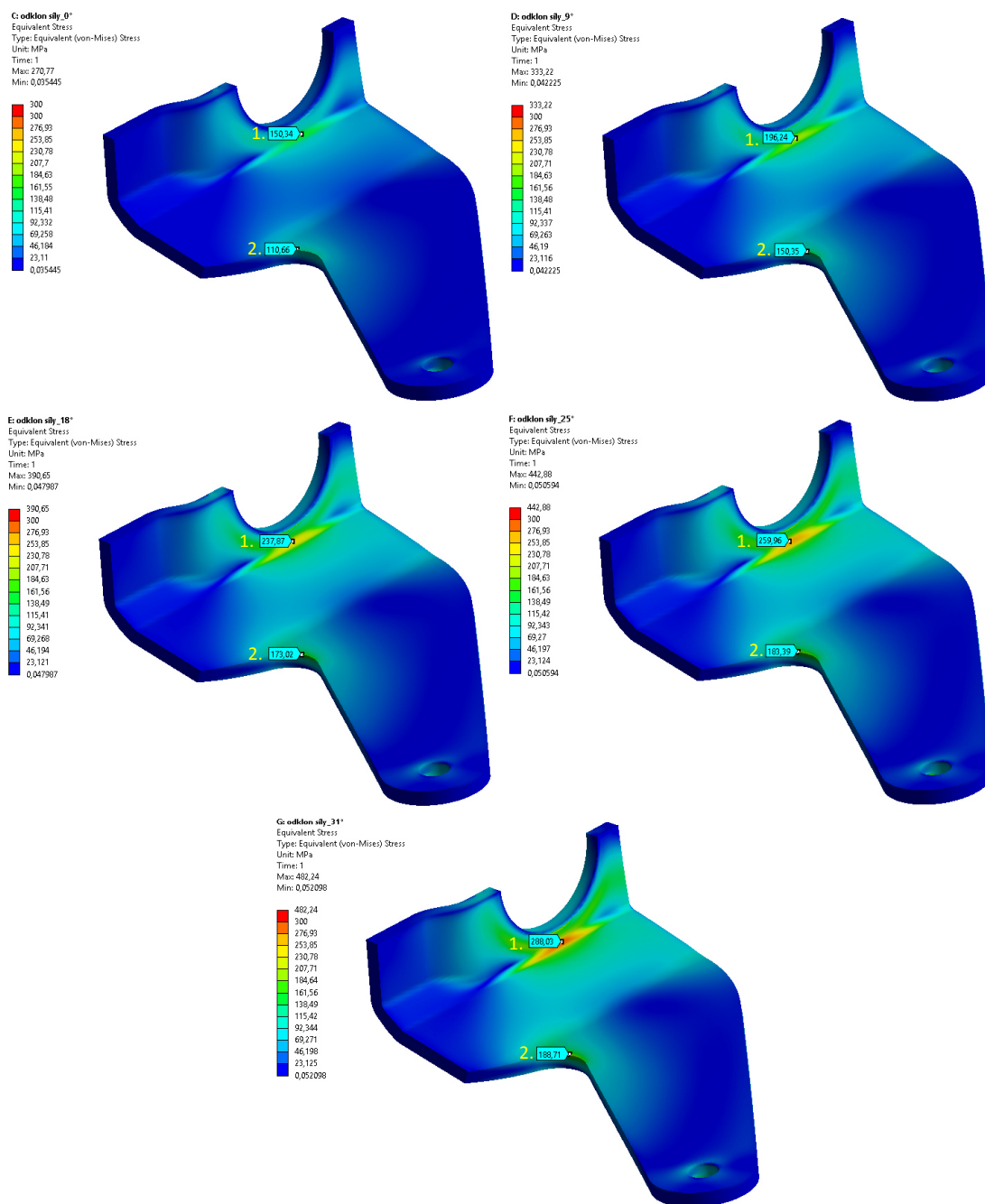
Síť je tvořena klasickými elementy programu ANSYS pro objemové tělesa SOLID186. Tento element tvoří dvacetiužlový šestistěn. Uzly těchto elementů mají povoleny posuvy u , v , w . [12]



Obr. 30.: Dvacetiužlový šestistěn SOLID186 [12]

3.1.7 Výsledky pevnostní analýzy

Výsledky jsou uvedeny pro všechny zatěžující polohy a zobrazují pole redukovaného napětí získaného pomocí HMM metody. Analýza nezkoumá sedlo ani ložisko, proto jsou tyto prvky ve výsledku analýzy skryty.



Obř. 31.: Výřledky MKP analýzy stávající vidlice

Na vidlici se ve všech polohách objevují dvě místa se zvýšenou koncentrací napětí. Tato místa jsou zřetelně patrná z výsledků pevností analýzy (Obr. 30) a jsou zde vyznačena modrými praporky. Pro přehled nárůstu napětí se zvyšujícím se odklonem síly jsou hodnoty v těchto kritických místech uvedeny v tabulce 6.

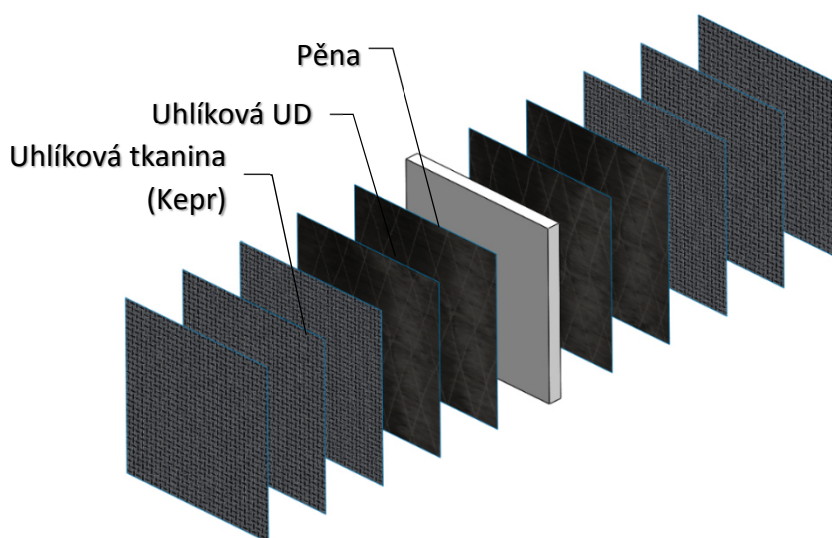
Poloha	Sklon síly	Pozice na vidlici	
		1 [$N \cdot mm^{-2}$]	2 [$N \cdot mm^{-2}$]
č. 1	0°	150	110
č. 2	9°	196	150
č. 3	18°	237	173
č. 4	25°	260	183
č. 5	31°	288	188

Tabulka 6.: Maximální napětí (von-Mises) v určených místech vidlice

3.2 Návrh kompozitní vidlice

Kompozitní vidlice je navržena pro rozměry kola stávající vidlice, je tedy možná záměna kola u vidlic. Připojovací rozměry na nosítko jsou zachovány. Kompozitní vidlice je koncept budoucnosti nosítek, proto se v tomto řešení počítá s centrálním brzděním nosítek. Mechanismus brzdy, jak je znám z aktuálního řešení, proto odpadá. Pro zavedení centrální brzdy je třeba ponechat ve středové části vidlice dostatečný prostor. Dále z analýzy stávajícího stavu vyplynula kritická místa, která vyžadují zvýšenou pozornost při návrhu kompozitní vidlice. Návrhy kompozitních vidlic tyto požadavky zohledňují.

Skladba vidlice byla uvažovaná pro všechny varianty stejná. Jedná se o sendvičové složení s použitím pěny ke zlepšení průřezových charakteristik vidlice. Kompozit je symetrický k pěně a skladba je znázorněna na Obr. 32.



Obr. 32.: Skladba kompozitní vidlice

K distribuci napětí ve vidlici slouží unidirekcionální (jednosměrná) vlákna (dále jen UD vlákna). Ve skladbě vidlice jsou tato UD vlákna celkem ve čtyřech vrstvách. Nad těmito vrstvami jsou tři vrstvy tkaniny z uhlíkových vláken pootočené vůči sobě o 45° pro zachycení smykových napětí. Jako poslední vrstva byla zvažována tkanina z aramidových vláken. Ta má chránit vidlici proti nárazům a dynamickým zatížením. Jelikož je poslední vrstva pohledová, jsou na tuto vrstvu kladeny vysoké designové nároky. Tyto nároky aramidová vrstva nesplňuje,

a proto byla ze skladby po testech vyloučena. Ochrana vidlice proti rázům bude řešena jiným způsobem.

3.2.1 Varianty kompozitní vidlice

Varianta č. 1

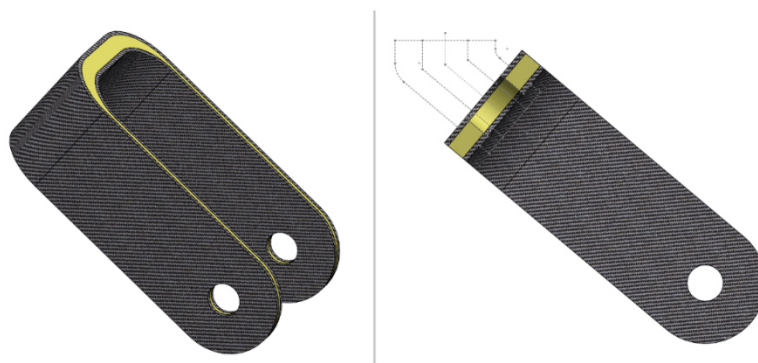


Obr. 33.: 3D model varianty č. 1

Návrh geometrie první varianty se snaží zachovat UD vlákna neporušená. Orientace těchto vláken je naznačena na Obr. 33 modrou šipkou. Tvar vidlice je tedy velmi jednoduchý a přichycení k nosítku je v této variantě realizováno pomocí hliníkového insertu.

Tato vidlice má vynikající předpoklady pro přenos zatížení, avšak uchycení k nosítku představuje problém. Do tohoto provedení není možné zabudovat centrální brzdu a insert sloužící k uchycení je tvarově složitá součást, v které lze po zatížení předpokládat napětí za hranicí únosnosti použitého materiálu.

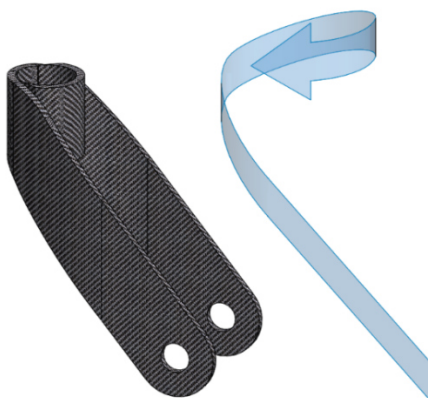
Varianta č. 2



Obr. 34.: 3D model varianty č. 2

Tato varianta řeší problém složitého insertu předchozí varianty. Také umožňuje dále zabudování centrální brzdy. Orientace UD vláken je stejná jako v předchozí variantě, pouze střední vlákna jsou rozdělena vrtáním. Možná realizace uchycení na nosítka je naznačena na Obr. 34 v pohledu s řezem vidlicí.

Varianta č. 3

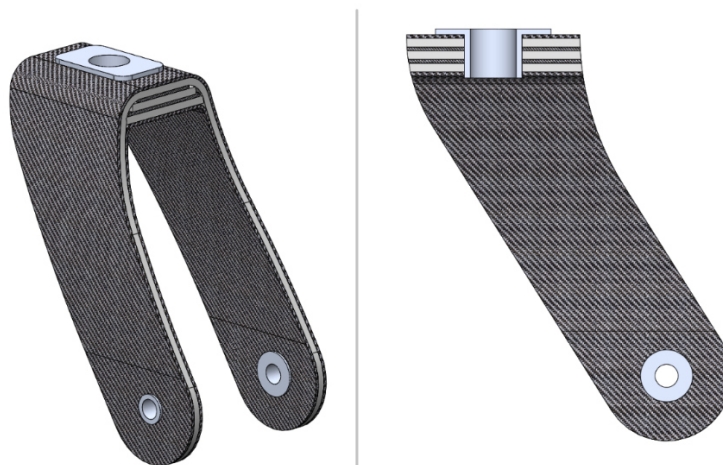


Obr. 35.: 3D model varianty č. 3

Tato varianta zachovává UD vlákna neporušená, stejně jako je tomu ve variantě č. 1. Je zde vyřešen problém se zabudováním centrální brzdy. Řešením je obtočení UD vláken v horní části vidlice, jak je znázorněno na Obr. 35 modrou šipkou. V této variantě nejsou UD vlákna přesušena, což má za následek zvýšení únosnosti vidlic.

Problém této varianty spočívá v různých délkách vláken na spodní a horní straně boku vidlice. Tento jev má za následek posunutí UD vláken ve vrstvě, která se dodává od výrobce prošitá, a posunutí vláken znamená narušení celistvosti vrstvy. Výroba této vidlice by byla velmi náročná, s tím je spojené i množství výrobních vad, které by výrobek obsahoval.

Varianta č. 4



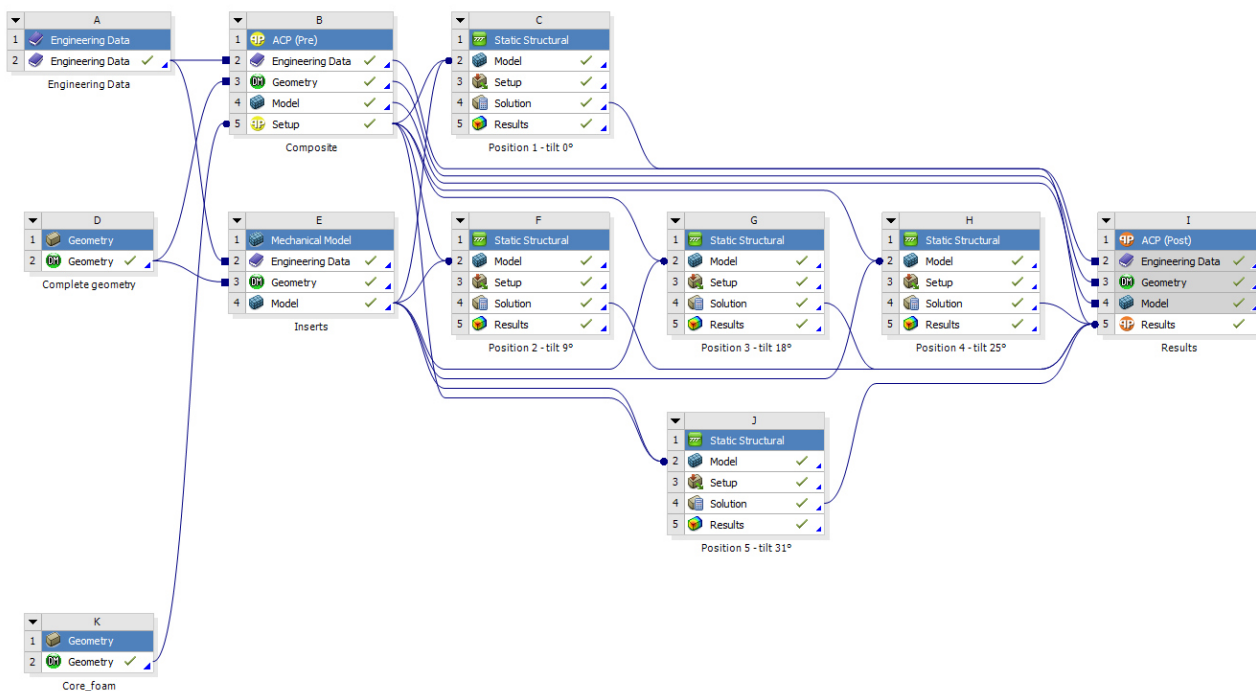
Obr. 36.: 3D model varianty č. 4

Tato varianta počítá s přerušením UD vláken. Pro snadné upevnění na nosítka a zabudování mechanismu brzdy je středová část vidlice vodorovná. Přerušením UD vláken se únosnost vidlice snižuje, tento jev se snaží kompenzovat proměnná tloušťka. Středová část vidlice je tak vyztužena a umožňuje i snadné zabudování insertu pro přichycení na nosítka. Geometrie vidlice je jednoduchá a při výrobě ruční laminací se tak eliminují možné výrobní vady.

Tato varianta byla vybrána pro finální řešení.

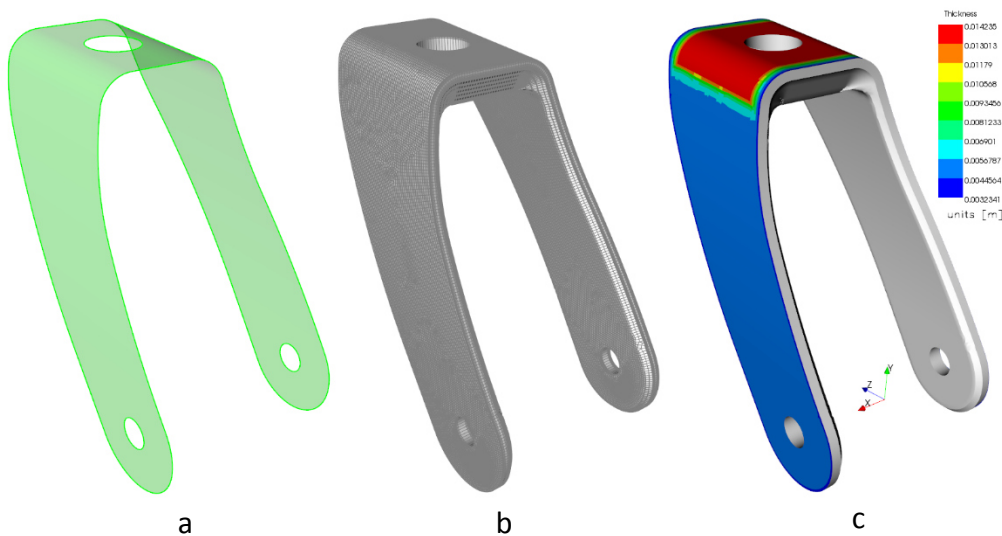
3.2.2 Geometrie vidlice pro MKP výpočet

Kompletní model se sestává z kompozitové vidlice a hliníkových insertů. Tato celková geometrie byla ve výpočtu rozdělena na kompozitní prvky a homogenní prvky. Vysíťování a definice materiálů proběhla taktéž odděleně. Pro výpočet kompozitové struktury byl použit přídatný modul ACP(Pre) a následné vyhodnocení výsledků proběhlo v modulu ACP(Post). Homogenní materiály byly připraveny standardně používaným komponentem Mechanical Model. Takto připravená geometrie byla následně spojena v komponentu Static Structural, kde byly za definovány okrajové podmínky a zatížení. Posledně zmiňovaný komponent (Static Structural) byl definován nový pro každý sklon síly (tabulka 3). Následně byly výsledky z jednotlivých pozic sil svedeny do komponentu pro vyhodnocení ACP(Post).



Obr. 37.: Schéma výpočtu v programu ANSYS 15.

Pro výpočet kompozitní vidlice byla použita vnější plocha 3D modelu, od které byly definovány jednotlivé vrstvy směrem dovnitř vidlice. Pěna v modelu byla přidána přes předem připravenou geometrii, tímto postupem bylo docíleno rozdílné tloušťky v horní části vidlice. Pro přesnější vystihnutí reálného modelu byla kontura pěny sražena o 60° . Tímto krokem byly jednotlivé vrstvy ležící z obou stran pěny spojeny.

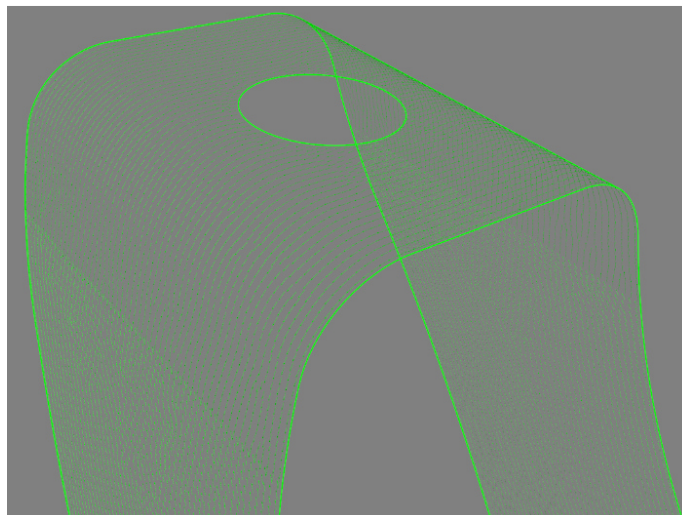


Obr. 38.: Výpočtová geometrie vidlice (a - definiční plocha pro výpočet, b - 3D model sítě, c - tloušťka modelu)

Parametry síť			
Oblast		Vidlice	Inserty
Velikost elementu	[mm]	1	2
Počet uzlů	[-]	17 809	7 009
Počet elementů	[-]	17 375	1 493




Tabulka 7.: Parametry síť kompozitové vidlice

Pro správnou definici směru vláken byla vidlice rozdělena na dvě části (boční část, vrchní část). Pro tyto dvě oblasti byly zdefinovány dva souřadné systémy, pro které osy x směřují vždy ve směru vláken. Orientace směru vláken je zobrazena na Obr. 39.

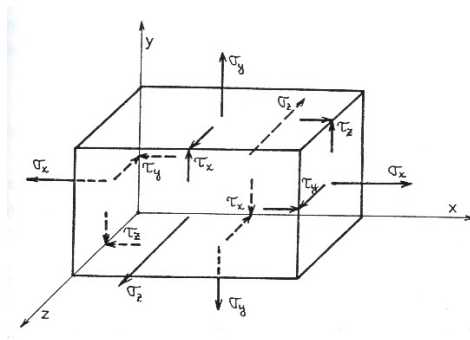


Obr. 39.: Orientace vláken

3.2.4 Materiálová data pro MKP výpočet

Materiál		Airex C70.55 2450	Uhlíková tkanina	Jednosměrná uhlíková vlákna
Vazba				
			Kepr	Jednosměrná vlákna
družení ¹⁾	[-]	-	3K	-
gramáž	[g·m ⁻²]	-	200	250
t	[mm]	3	0,35	0,30
ρ	[kg·m ⁻³]	60	1 760	1 800
E1	[N·mm ⁻²]	70	61 340	121 000
E2	[N·mm ⁻²]		61 340	8 600
E3	[N·mm ⁻²]		8 900	8 600
G12	[N·mm ⁻²]	-	3 500	4 700
G23	[N·mm ⁻²]		2 700	3 100
G13	[N·mm ⁻²]		2 700	4 700
σ _{1t}	[N·mm ⁻²]	1,5	805	1 231
σ _{1c}	[N·mm ⁻²]	1,5	509	1 082
σ _{2t}	[N·mm ⁻²]	1,5	805	39
σ _{2c}	[N·mm ⁻²]	1,5	509	130
σ _{3t}	[N·mm ⁻²]	0,95	50	39
σ _{3c}	[N·mm ⁻²]	0,95	170	130
τ ₁₂	[N·mm ⁻²]	0,93	125	60
τ ₂₃	[N·mm ⁻²]	0,93	65	32
τ ₁₃	[N·mm ⁻²]	0,93	65	60
ν ₁₂	[-]	0,3	0,05	0,27
ν ₂₃	[-]		0,30	0,40
ν ₁₃	[-]		0,30	0,27
ν _f	[-]		0,38	0,38
¹⁾ Družení udává jemnost v počtu monovláken v pramenci např. 3K=3000 vláken v pramenci				

Tabulka 8.: Materiálové charakteristiky použitých materiálů pro MKP analýzu



Obr. 40.: Směry napětí ve vyjmutém elementu [13]

$$\sigma_x = \sigma_1$$

$$\sigma_y = \sigma_2 \tag{28}$$

$$\sigma_z = \sigma_3$$

$$\tau_x = \tau_{23}$$

$$\tau_y = \tau_{13} \tag{29}$$

$$\tau_z = \tau_{12}$$

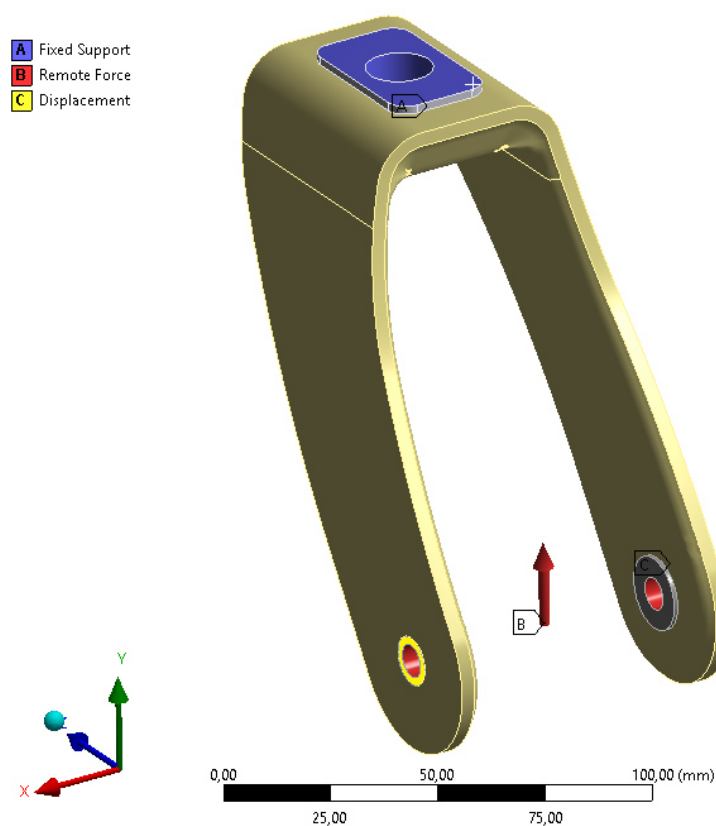
Rovnice (28, 29) vyjadřují vztahy mezi parametry materiálových charakteristik zvolených materiálů pro MKP analýzu a zvoleným souřadným systémem v programu ANSYS 15.

3.2.5 Okrajové podmínky pro MKP výpočet

Okrajové podmínky výpočtu se snaží co nejreálněji vystihnout reálný stav vidlice. Okrajové podmínky i jejich význam jsou stejné jako v kapitole 3.1.5, proto budou v této části pouze vypsány použité podmínky. Použité okrajové podmínky jsou:

- Fixed Support
- Remote Force
- Displacement

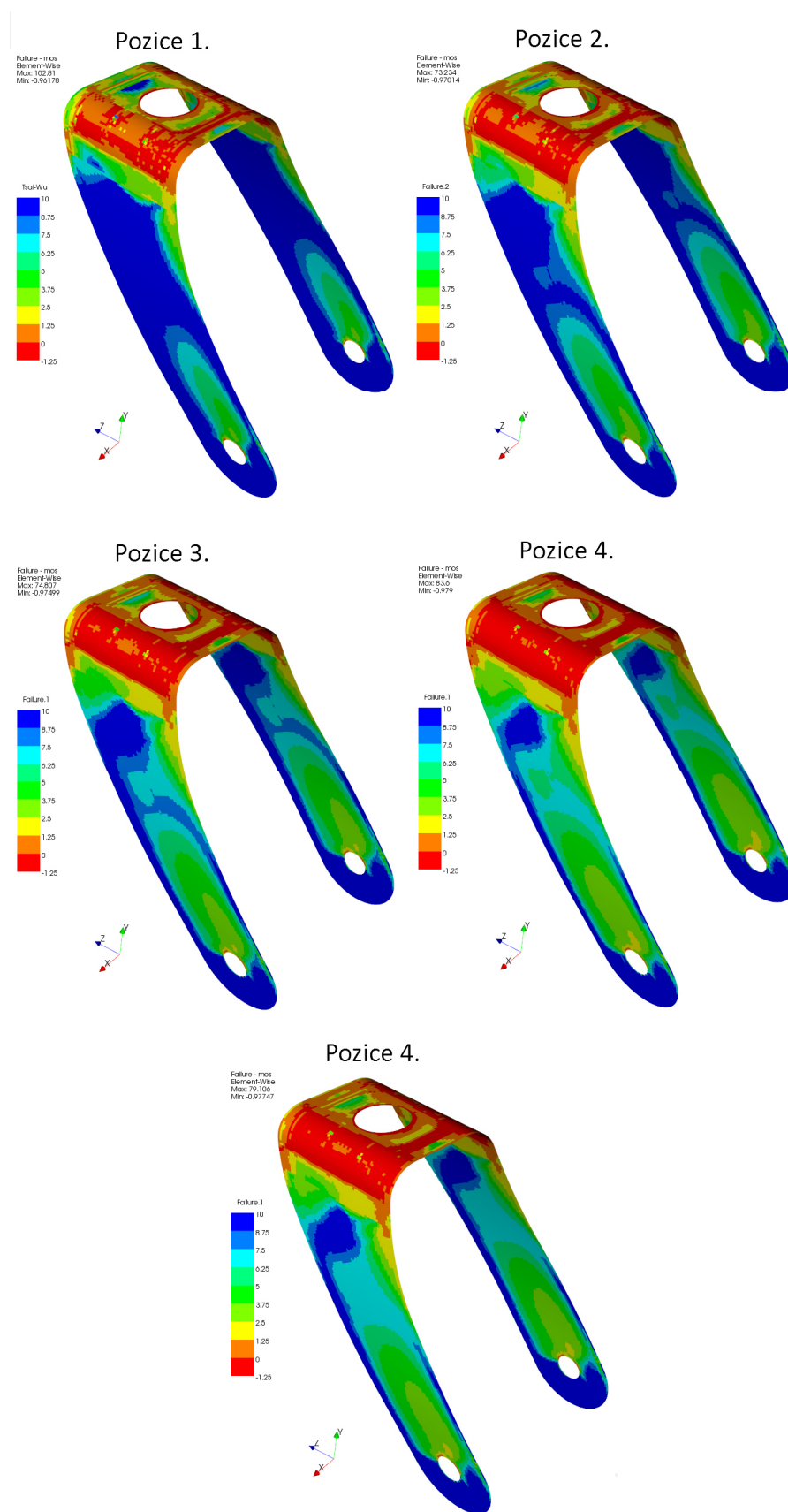
Plochy, na níž byly funkce aplikovány, jsou zobrazeny na Obr.41.



Obr. 41.: Aplikace okrajových podmínek

Na Obr. 41 jsou zobrazeny okrajové podmínky pro polohu č.1. Pro zbylé polohy se liší pouze odklon zatěžující síly ve funkci Remote Force. Oblast aplikace funkce Displacement je vyobrazena na Obr. 41 žlutou barvou. Touto funkcí je označena i odlehlá plocha druhého spodního insertu. Tato plocha na vyobrazení není viditelná z důvodu polohy vidlice.

3.2.6 Výsledky analýzy MKP



Obr. 42.: Výsledky MKP analýzy dle metody Tsai-Wu

Z výsledku MKP analýzy je patrné maximální zatížení vidlice v poloze č. 4, kdy odklon síly od svislice činí 25°. Výsledky byly vyhodnoceny pomocí metody Tsai-Wu, která, jak již bylo řečeno, predikuje možné porušení struktury skrze bezpečnostní koeficient. Nejpříznivější oblasti vidlice jsou její bočnice. Koeficient bezpečnosti v těchto oblastech dosahuje maximálních hodnot a porušení zde nehrozí. Inserty distribuují napětí z osy kola do vidlice dle očekávání a hodnoty koeficientu bezpečnosti okolo vstupu napětí do vidlice jsou příznivé (na Obr. 42 jsou tyto oblasti zobrazeny světle zelenou barvou). Kritické oblasti, pro něž je tento koeficient dokonce pod hodnotou 1, jsou zobrazeny červenou barvou (Obr. 42). V těchto oblastech hrozí ztráta stability vidlice. Tyto oblasti byly kritické již při návrhu. Zesílení tloušťky v horní části vidlice mělo tento problém eliminovat. V průřezu zesílení jsou vrstvy tří milimetrové pěny prokládány vrstvami vláken. Tyto vlákna však nejsou ve výpočtu zohledněna. Zadefinování těchto vrstev do modelu narušovalo konvergenci výpočtu z důvodu nehomogenity výpočtového modelu. Rozšířená část byla vyplněna pouze geometrií pěny, a to za účelem zachování průřezových charakteristik. Při zohlednění vláken v rozšířené části se dá předpokládat zvýšení koeficientu bezpečnosti v těchto oblastech. I přes tuto skutečnost lze brát konstrukci vidlice v horní části za poddimenzovanou. Prokáže-li test poddimenzovanost vidlice, bude nutno pro zajištění správné funkce vidlice zesílit skladbu navýšením počtu vrstev.

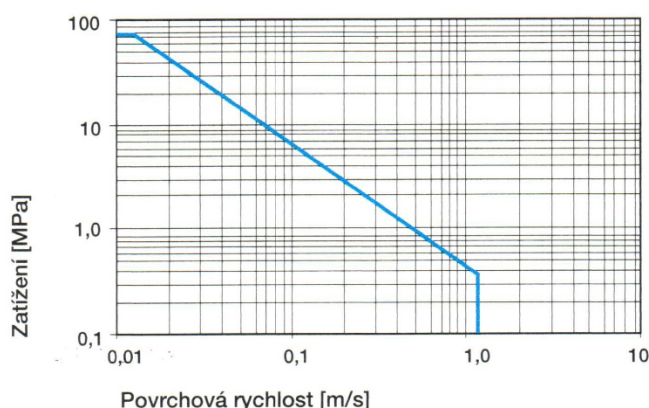
3.3 Konstrukce uchycení vidlice na podvozek nosítek

Při návrhu konstrukce uchycení vidlice na lehátko byl rovněž kladen velký důraz na snížení hmotnosti. Stávající řešení uchycení pomocí radiálního kuličkového ložiska bylo nepřijatelné. Proto bylo navrženo řešení pomocí kluzných ložisek. Dle druhu zatížení bylo navrženo axiální ložisko v kombinaci s radiálním. Při návrhu bylo zohledněno pracovní prostředí ložiska a vlivy okolí, jež na ložisko působí.

Kluzná ložiska byla vybrána z katalogové řady společnosti Hennlich. Divize této firmy Igus poskytovala nejširší výběr řad ložisek s širokou škálou vlastností kluzných pouzder. Zvolená ložiska jsou katalogové řady G. Ložiska této řady vynikají bezúdržbovým provozem za sucha, jsou odolné vůči nečistotám a jsou odolná proti opotřebení. Používají se pro nižší a střední rychlosti při velkém zatížení. Použité axiální ložisko nese katalogové označení GTM-0713-005. Radiální ložisko je v katalogu označeno jako GSM-0709-12. [14]

3.3.1 Kontrola kluzných ložisek

Navržená kluzná ložiska byla zkontrolována, zda vyhoví provozním parametrům. Hlavním parametrem při návrhu ložisek jsou otáčky. Ty se v tomto případě stanovují velmi obtížně, neboť zátěžný cyklus ložiska není periodicky se opakující náběh do otáček, jako je tomu u běžných aplikací těchto produktů. Proto bylo nejprve pro axiální ložisko vypočteno maximální tlakové zatížení, z kterého byla stanovena maximální povolená povrchová rychlost (Obr. 43). [14]



Obr. 43.: Povolené hodnoty $p \times v$ při chodu nasucho s ocelovým hřídelem při 20 °C [14]

Pro výpočet maximálního tlaku byla brána maximální možná axiální síla. Tedy síla ve stavu nosítek v poloze 1. Axiální síla je pro tuto polohu rovna ekvivalentu 150 kg.

$$S = \frac{\pi}{4} \cdot (D_1^2 - d_1^2) \quad (30)$$

$$S = \frac{\pi}{4} \cdot (18^2 - 10^2)$$

$$S = 175,93 \text{ [mm]}$$

$$p = \frac{F}{S} \quad (31)$$

$$p = \frac{1471,5}{175,93}$$

$$p = 8,36 \text{ [MPa]}$$

Pro materiál, z kterého jsou ložiska typu G vyrobená, je maximální dovolený tlak stanoven na hodnotu $78 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$. Ložisko tedy na dovolený tlak vyhovuje.

Z grafu na Obr. 43 pro povolené rychlosti ložiska odečteme maximální možnou povrchovou rychlost ložiska pro zatížení tlakem $8,36 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$. Odečtená maximální povolená rychlost ložiska je $0,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

Přepočtem této rychlosti na frekvenci otáčení dostáváme lepší obraz o stavu rychlosti otáčení ložiska.

$$\omega_L = \frac{v}{\frac{D_1}{2}} \quad (32)$$

$$\omega_L = \frac{0,1}{0,009} = 11,1 \text{ [s}^{-1}\text{]}$$

$$f_L = \frac{\omega}{2\pi} \quad (33)$$

$$f_L = \frac{11,1}{2\pi}$$

$$f_L = 1,76 \text{ [Hz]}$$

Pro použití ložiska v této aplikaci se nepředpokládá frekvence otáčení 1,76 Hz. Ložisko je tedy bráno jako vyhovující podmínce maximální rychlosti.

Radiální ložisko a kontroly ložisek na oteplení byly vypočteny pomocí kalkulátoru umístěného na webových stránkách společnosti Hennlich. Maximální radiální síla v ložisku je pro polohu 5. Radiální síla, na kterou bylo ložisko kontrolováno, je $F_r=758$ N. Tento druh výpočtu vyžaduje podrobnou znalost provozního cyklu ložiska. Jak už bylo řečeno v úvodu návrhu, pracovní cyklus vidlice je velmi obtížně stanovitelný. Výsledek z výpočtu na oteplení byl tedy brán jako velmi orientační. Důraz byl kladen pouze na maximální tlak v ložisku. [15]

3.3.2 Konstrukce uchycení

Uchycení vidlice na podvozek nosítek je navrženo pomocí hliníkového insertu, který je součástí podsestavy pro uchycení. Konstrukce sestavy byla navržena s ohledem na zajištění těchto parametrů:

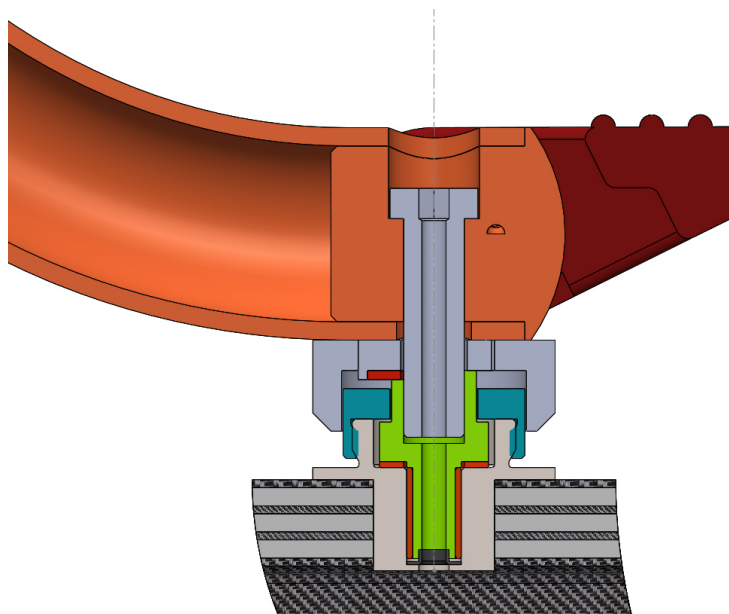
- Zachování prostoru pro zabudování mechanismu centrální brzdy
- Schopnost aretace otáčení vidlice kolem svislé osy
- Jednoduchost konstrukce pro montáž a opravy

Kompozitní vidlice je řešením budoucnosti a nepředpokládá se pro toto řešení brzdění pomocí pryžového klínu jako je tomu ve stávající variantě. Sofistikovanějším způsobem brzdění je brzdění pomocí centrální brzdy. Takovýto mechanismus je centrálně ovládán z uživatelsky přívětivého místa a zajišťuje brzdění obou vidlic. Konstrukce brzdy tak musí splňovat parametry pro zabudování tohoto mechanismu. Navržená konstrukce nechává prostor pro zabudování centrální brzdy ve středové části.

Jako druhý požadavek na konstrukci uchycení byla schopnost zajistit vidlici proti rotaci okolo svislé osy. Problematika špatné polohy vidlice při polohování a její důsledky jsou rozebrány v kapitole 3.1.3.

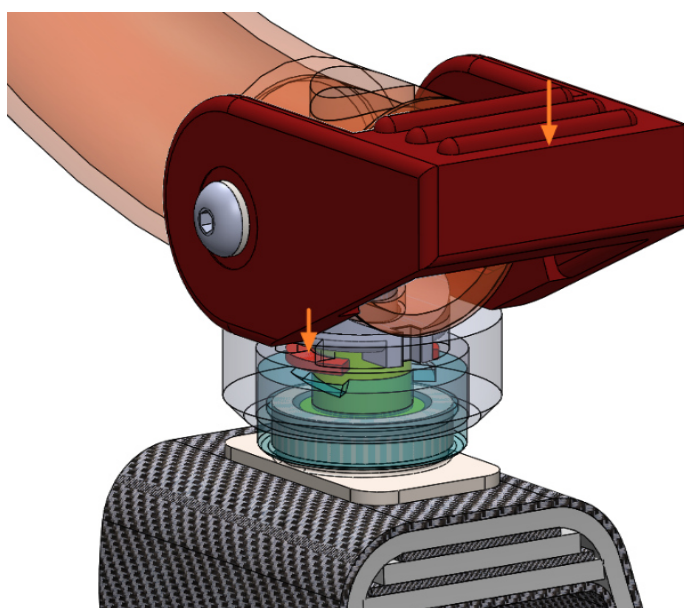
Jednoduchost konstrukce pro snadnou montáž a případný servis je v této aplikaci nutností. Nebylo žádoucí ušetřenou hmotnost na vidlici přidat do sestavy v podobě robustní konstrukce uchycení. Proto bylo při návrhu zohledněno i hmotnostní hledisko

Na Obr. 44 je zobrazen řez sestavou uchycení vidlice. Návrhový výkres je přiložen k práci jako příloha č. 2. Zde je též podrobnější popis jednotlivých dílů.



Obr. 44.: Řez sestavou uchycení vidlice na podvozek nosítek

Aretace rotace vidlice kolem svislé osy je zajištěna pomocí pružného kroužku, z kterého je vyříznuta výseč. Takto vzniklé hrany jsou při sešlápnutí excentru přitlačeny na kontaktní díl s drážkami orientovanými dle požadované polohy aretace. Při správné poloze vidlice drážky na pružném kroužku zaskočí do drážek v protilehlém díle, což vidlici zajistí. Náhled pro bližší pochopení funkce aretace je na Obr. 45.



Obr. 45.: Princip funkce aretace otáčení vidlice

Kapitola 4

Testování vidlice

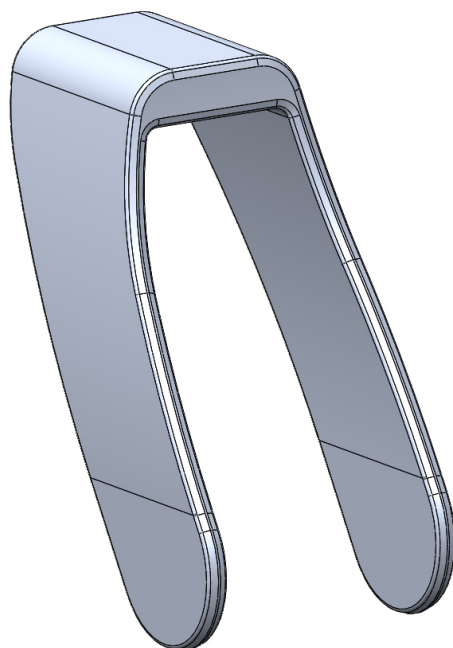
4.1 Výroba vidlice pro test

Základním prvkem pro výrobu vidlice byl 3D model vidlice. Ten byl vymodelován s přihlédnutím na pozdější požadavky při výrobě. Hlavním požadavkem byla možnost získat z modelu 2D skici nástřihů pro jednotlivé vrstvy tkanin. Model vidlice lze tedy rozložit na jednotlivé vrstvy. Geometrie nástřihů je přiložena v příloze č.1.

4.1.1 Výroba formy

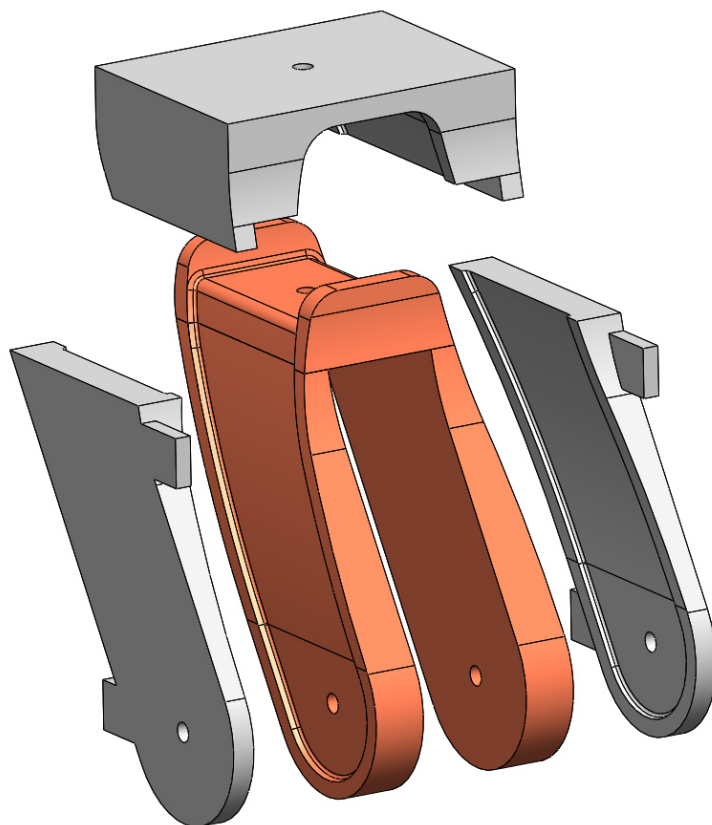
Geometrie 3D modelu vidlice byla vzata jako výchozí pro tvorbu formy k laminování. Model sestávající se z jednotlivých vrstev byl homogenizován. Okolo takto vzniklé geometrie byla vymodelována forma, která byla rozdělena do šesti částí pro snadnou manipulaci a výrobu. Z dostupných technologií pro výrobu kompozitní vidlice byla vybrána technologie laminace do formy. Forma byla rozdělena na vnitřní a vnější část. Vnitřní část tvořila oporu pro kladení jednotlivých vrstev laminátu. Na takto uspořádaný stav byla přiložena vnější část formy a následně byla tato část za pomoci šroubů přitlačena k vnitřní části. Tímto postupem bylo z laminátu odstraněno přebytečné množství pryskyřice. Jelikož nebylo možné využít

průmyslově používaných technologií laminace jako je laminace vakuem či laminace za zvýšených teplot a tlaků v autoklávu, byl zvolen právě tento druh laminace. Zvolená technologie odpovídala technické a časové náročnosti práce. S ohledem na tuto výrobní technologii je třeba brát výsledný výrobek s pevnostní i vizuální rezervou. Především pevnost takto vzniklého výrobku nebude dosahovat pevností získaných profesionální metodou laminace.



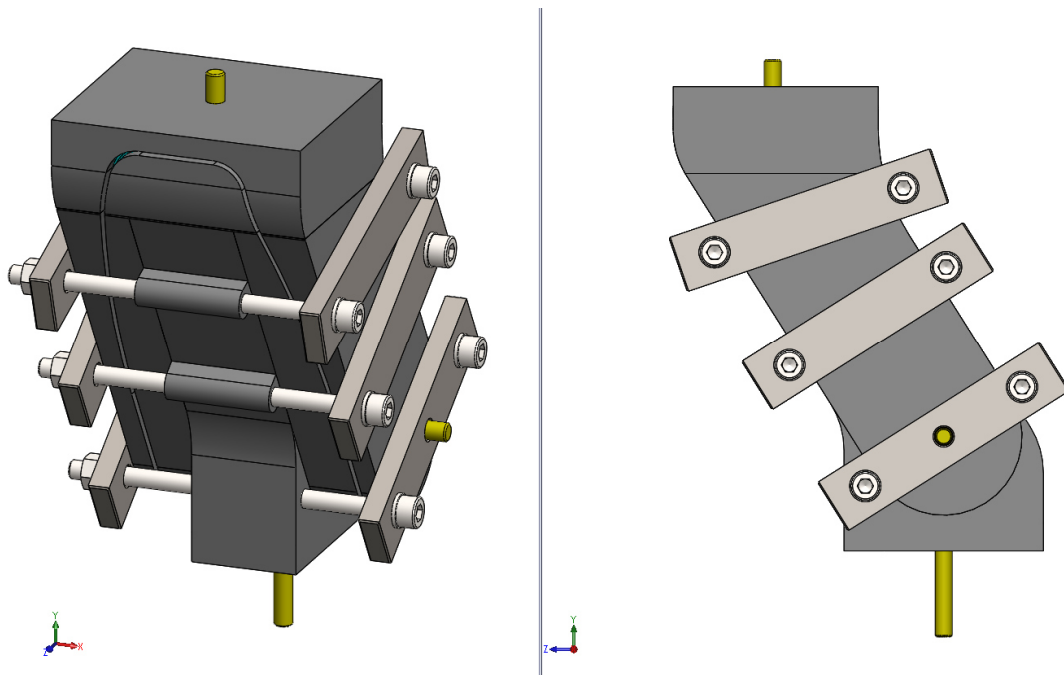
Obr. 46.: Homogenizovaný model vidlice pro výrobu formy

Forma pro výrobu vidlice byla vyrobena technologií 3D tisku. Pro vyrobené vidlice byly zhotoveny odlišné formy. Hlavním rozdílem byl materiál. Pro první formu byl použit materiál označen jako ABS (Akrylonitributandienstyren). Hlavní výhodou tohoto materiálu je jeho teplotní odolnost pohybující se okolo hranice 100°. Pro druhou formu byl použit materiál PLA (Polylactid acid), který vyniká vlastnostmi při zpracování na úkor jeho teplotní odolnosti, která se pohybuje okolo 60°. Jelikož však pro technologii laminace nebylo zvoleno vytvrzování za zvýšených teplot a teplota vzniklá vytvrzením pryskyřice nedosahovala takto vysokých teplot, byl pro druhou formu zvolen právě tento materiál. Geometrie formy je zobrazena na Obr. 46.



Obr. 47.: Sestava formy zhotovená 3D tiskem

Tloušťka vrstvy při 3D tisku byla 0,2 mm, proto bylo třeba model po vytištění vyhladit. Především na tvarově složitých plochách byla zjevná trajektorie extruderu 3D tiskárny. Model byl zabroušen a následně přetřen pryskyřicí, již byla použita i pro model vidlice. Pryskyřice byla po vytvrzení opět zabroušena. Tímto postupem se docílilo hladké struktury formy. Na Obr. 47 je možné si povšimnout děr ve spodní a horní části formy. Ty sloužily k vycentrování jednotlivých vrstev při kladení, dále zajišťovaly správnou polohu vnějších a vnitřních částí formy, následně po vytvrzení a vrtání vidlice sloužily k středění vrtáku. Model kompletního uspořádání formy s vidlicí a systémem stažení je zobrazen na Obr. 48.



Obr. 48.: Kompletní sestava formy pro laminaci vidlice

4.1.2 Výroba vidlice

Výrobu vidlice lze pro snazší pochopení rozdělit do tří fází:

- Příprava formy k laminaci
- Příprava nástřihů
- Laminace

V první fázi byla vnější část formy slepena a zabroušena do finální podoby. Při lepení částí vnější formy byl kladen velký důraz na napojení částí forem. S nepřesným slepením vzniká v kritickém místě vidlice nežádoucí vrub, který by mohl vést až ke snížení celkové únosnosti vidlice.

Součástí první fáze bylo i nanesení separačního vosku na kontaktní díly formy. Vosk zabraňuje přilnutí formy na laminovaný díl. Tento postup byl opakován pro nanesení dostačující vrstvy vosku.

Ve druhé fázi byly připraveny jednotlivé nástřihy. Jako šablona pro zhotovení nástřihů sloužila vystřihnutá papírová kontura rozvinutého 3D modelu vidlice. Kontury byly rozděleny

na vnitřní a vnější část (myšleno od střední pěny). UD vlákna nebyla vystřihnuta dle připravených kontur. Nastřihány byly pouze proužky o šířce boků vidlice.

Laminace probíhala na dvou pracovištích. Na prvním pracovišti byla na připravené tkaniny nanášena pryskyřice. Na druhém pracovišti byla tato pryskyřičí nasycená vrstva kladena do formy. Skladba je zobrazena na Obr. 32. Klazení pěny v horní části vidlice je patrné z přílohy obsahující kontury pro nástřihy.

Použita byla epoxidová pryskyřice s výrobním označením LH210, která byla smíchána s tužidlem H10 v poměru 100:45. Výrobce předpokládá operační dobu s takto namíchaným roztokem byla 30 min. V tomto časovém intervalu proběhla kompletní laminace.

Jak bylo zmíněno v předchozích kapitolách, materiál forem byl pro každou vidlici odlišný. Proto průběh vytvrzení probíhal u každé vidlice odlišně. Forma vytisknutá z materiálu ABS byla po laminaci vložena do pece, kde probíhalo vytvrzování pryskyřice za zvýšené teploty 80°C po dobu dvou hodin. Vidlice laminovaná do formy vytištěné materiálem PLA byla vytvrzena za pokojové teploty a čas vytvrzení se pohyboval okolo 24 hodin.

Zalaminované vidlice se zabroušenými konturami a obroušeným povrchem jsou zobrazeny na Obr. 49.



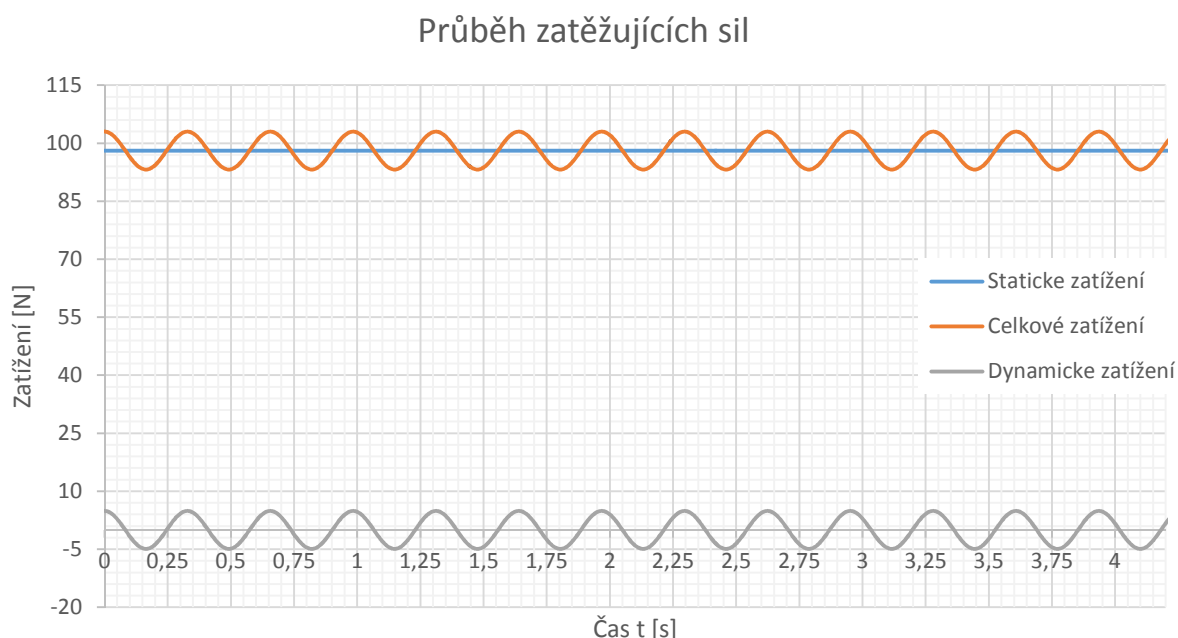
Obr. 49.: Zalaminovaná vidlice s obroušenými konturami (vlevo bez insertů a vrtání, vpravo s inserty)

4.2 Dynamická část testovacího standu

Testovací stand byl převzat z předchozího projektu. Na tento stand byla vytvořena nástavba sloužící k dynamickému zatížení vidlice. Princip testu i postup návrhu budou vysvětleny v následujících kapitolách.

4.2.1 Výpočet dynamického zatížení

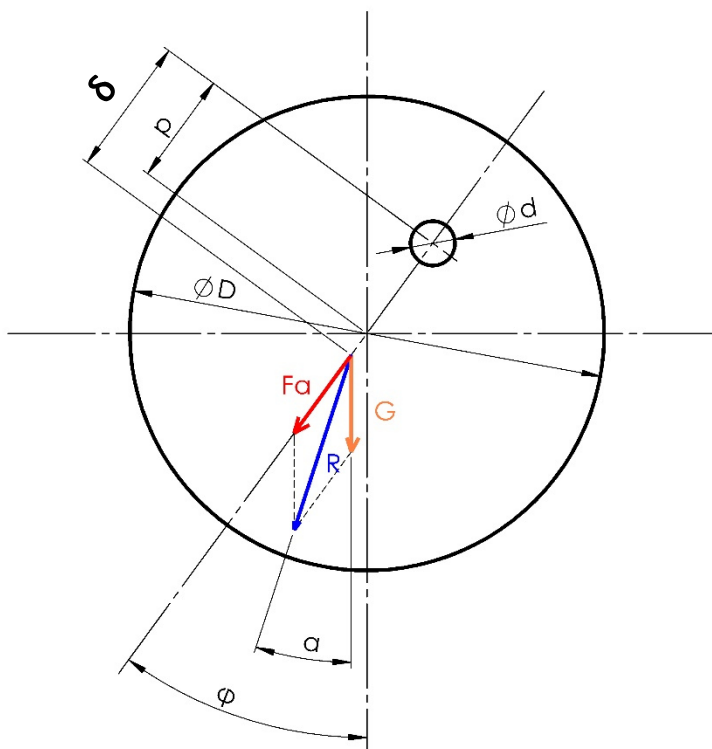
Zatížení pro test vidlice bylo stanové na ekvivalent 100 kg. Nárůst zatížení od dynamické části bylo stanoveno na 5% statického zatížení. Amplituda dynamického účinku je tedy 10% z celkového zatížení vidlice. Průběh a velikost sil je zobrazen v grafu na Obr. 51. Soubor s výpočtem sil dle požadovaného zatížení v programu Exel 360 je přiložen v příloze č. 3.



Obr. 50.: Průběh zatěžujících sil

Dynamického účinku bylo docíleno rotací excentricky uchyceného kotouče. Excentrickým uchycením vzniká odstředivá síla závislá na hmotnosti kotouče, vzdálenosti těžiště od osy rotace a na úhlové rychlosti kotouče. Parametry kotouče byly na začátku výpočtu zvoleny. Při volbě byl kladen důraz na síly vznikající v hřídeli, na kterém je kotouč uložen. Po vyšetření průběhů sil vyvolaných rotací kotouče v hřídeli byla dopočtena frekvence rotace kotouče pro požadovaný silový odstředivý účinek. Tento účinek musí odpovídat požadovaným 5% z celkového zatížení.

Schéma excentru a vzorce sloužící pro výpočet požadované frekvence rotace kotouče jsou uvedeny níže.



Obr. 51.: Schéma excentru

$$F_a = a_n \cdot m \quad (34)$$

$$F_a = \delta \cdot \omega^2 \cdot m$$

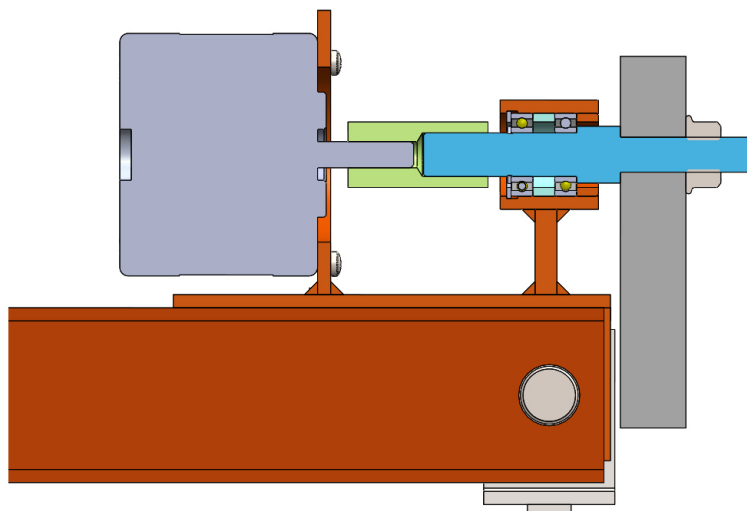
$$\omega = \sqrt{\frac{F_a}{m \cdot \delta}} \quad [s^{-1}]$$

Tímto postupem byla stanovena frekvence otáček krokového motoru k vyvození dynamického účinku. Jako další krok bylo nutné zkontrolovat navržený mechanismus s ohledem na sílu vzniklou při rotaci. Tento postup bude ukázán v následující kapitole, kdy bude čtenář seznámen se schématem dynamického mechanismu.

4.2.2 Návrh mechanismu pro dynamické zatěžování

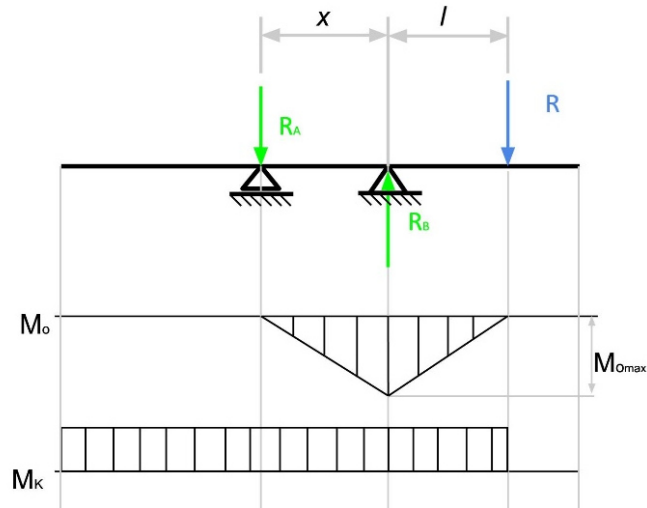
Po vypočtení rozměrů a frekvence rotace excentrického kotouče bylo navrženo konstrukční řešení pro dynamický test. Jako zdroj krouticího momentu a otáček byl zvolen krokový motor MICROCON s katalogovým označením SX23-1414. Krokový motor je snadno říditelný a poskytuje dostatečný rozsah dosažitelných frekvencí otáčení. Dále je schopen vyvinout dostatečný krouticí moment.

Krokový motor byl uchycen na konstrukci standu pomocí svařence rámu. Tento rám obsahuje ložiskový domek pro dvě ložiska SKF řady 61800. Krouticí moment je z motoru veden přes pevnou spojku na hřídel uloženou v ložiskách. Konec hřídele je opatřen závitem M8 pro stažení excentru pomocí matice. Princip mechanismu je zobrazen v řezu na Obr. 52. Celý mechanismus je na základní stand přichycen pomocí šroubu M12.



Obr. 52.: Schéma mechanismu pro dynamické zatěžování

Reakce R pro kontrolu hřídele a návrh ložisek byla stanovena dle schématu na obr. 51 jako součet složek odstředivé a tíhové síly. Následně byl vypočten maximální ohybový moment od síly R , který byl spolu s krouticím momentem vložen do vzorce pro redukované napětí. Redukované napětí bylo stanoveno metodou τ_{MAX} . Velikosti zatěžujících momentů v závislosti na poloze kotouče (natočení) jsou zobrazeny v grafu na Obr. 54.



Obr. 53.: Schéma průběhu momentů na hřídeli

Maximální hodnota reakce $R_{MAX}=11,401 [N]$

Rozměry hřídele pro výpočet maximálního ohybového momentu dle Obr. 53 jsou:

$$x = 0,01 [m]$$

$$l_L = 0,02 [m]$$

Velikost vypočtených reakcí v ložiskách:

$$R_A = 22,803 [N]$$

$$R_B = 34,205 [N]$$

Pro každou polohu kotouče byl stanoven směr a velikost reakce R . Dle směru bylo vypočteno rameno, přes které reakce R působí krouticím momentem na osu hřídele. Takto získaný krouticí moment byl vynesena do grafu na Obr. 55.

Redukovaný moment M_{red} byl vypočten pomocí rovnice 35, metodou τ_{MAX} . Pro tuto metodu je koeficient $\alpha = 2$. [13]

$$M_{red} = \sqrt{M_o^2 + \left(\frac{\alpha \cdot M_K}{2}\right)^2} \quad (35)$$

$$M_{redMAX} = 0,2379 \text{ [Nm]}$$

Průřezový modul pro ohyb W_o byl vypočten jako:

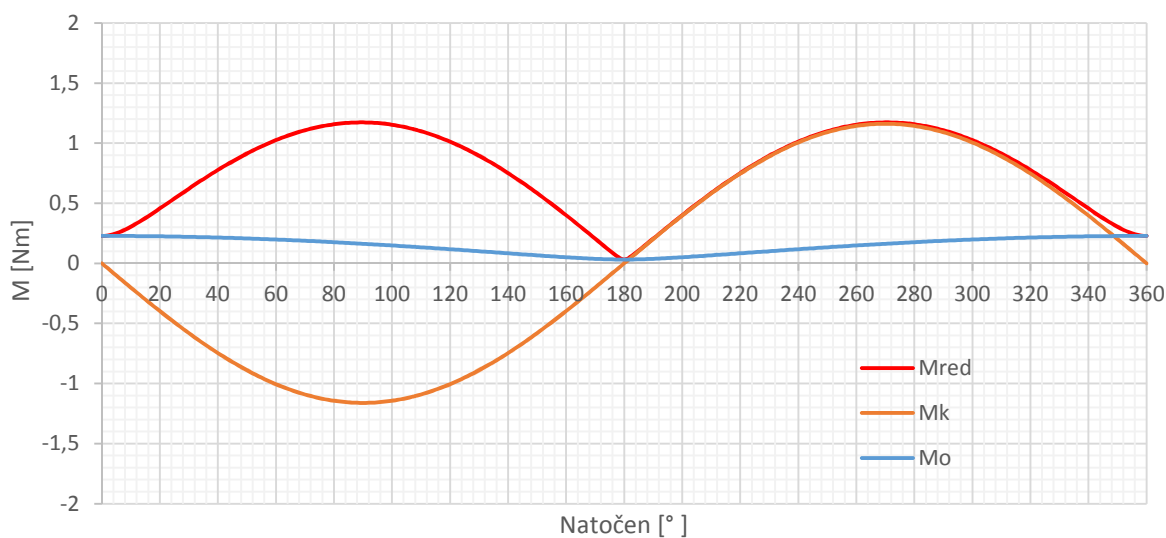
$$W_o = \frac{\pi \cdot d^3}{32} \quad (36)$$

Výsledné redukované napětí bylo vypočteno dle vzorce:

$$\sigma_{red} = \frac{M_{red}}{W_o} \leq \sigma_D \quad (37)$$

$$\sigma_{red} = 23,32 \text{ [MPa]}$$

Průběh M_{red} a jeho složek



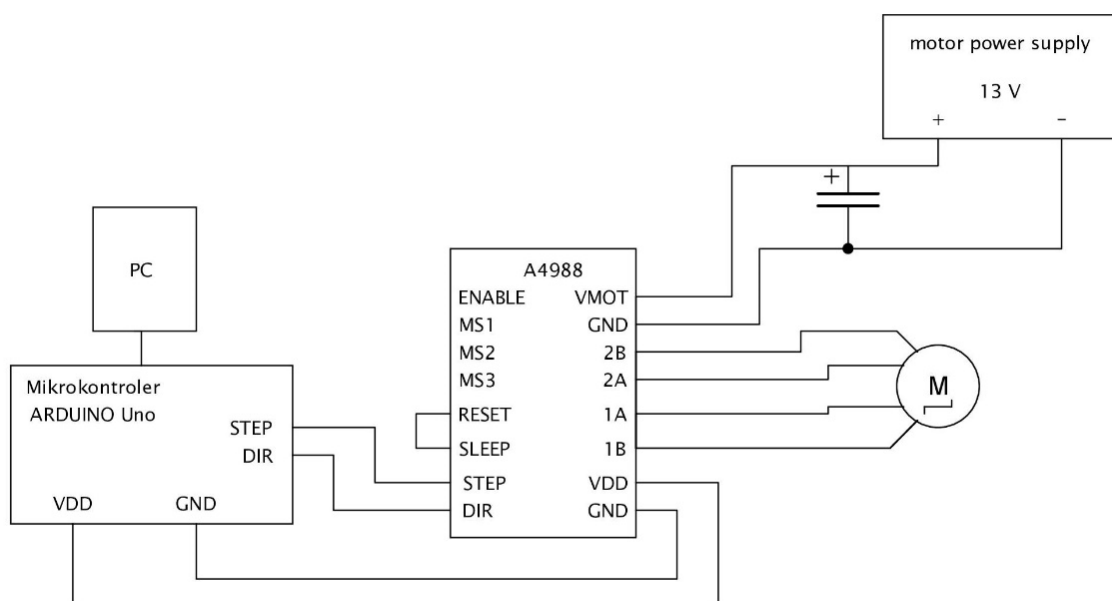
Obr. 54.: Velikosti momentů v závislosti na natočení kotouče

Hodnota napětí v hřídeli vyvolaná rotací a hmotností kotouče nedosahuje hodnot, které by způsobovaly destrukci hřídele z konstrukční oceli. Tento výsledek byl předpokládán, avšak bylo třeba zmapovat rozložení sil vzniklých rotací kotouče pro důkladnou znalost chování systému.

Ložiska byla navržena dle velikostí reakcí vypočtených v místech uložení hřídele. Jelikož se jedná o standardní výpočet s velmi nízkým zatížením, výpočet ložiska zde nebude uveden.

4.2.3 Řízení krokového motoru

Krokový motor byl vybrán pro svou dobrou schopnost řízení rychlosti otáčení. Frekvence rotace motoru byla řízena pomocí platformy Arduino a přídatného driveru Pololu A4988. Ve vývojovém prostředí Arduino byl sepsán kód umožňující změnu maximální rychlosti rotace, náběh do maximálních otáček po rampě s říditelným zrychlením a záznam času pro stanovení počtu cyklu, jenž testovaná vidlice absorbovala. Program byl sestaven pro spuštění a zastavení motoru pomocí PC. Schéma zapojení řídicího okruhu je zobrazeno na Obr. 55.



Obr. 55.: Schéma zapojení řídicího okruhu

4.3 Test vidlice na dynamické zatížení

Test vidlice proběhl na dvou vyrobených kusech vidlice se zatížením dle kapitoly 4.2.1. Vidlice byly testovány s inserty, které zajišťují rovnoměrné distribuování zatížení do vidlice. Výsledkem testu je čas, který je vidlice schopna odolat dynamickému zatížení. Celkový počet cyklů, který vidlice pohltila, byl získán vynásobením frekvence rotace excentru a celkového času testu. Od tohoto času byla odečtena doba rozběhu na požadované otáčky. Vidlice byla testována v poloze č. 1 (Obr. 23), neboť pouze v této poloze je možné s nosítky popojíždět.



Obr. 56.: Pohled na sestavu pro testování kompozitní vidlice

4.3.1 Výsledky testu vidlice č. 1

Vidlice č. 1. byla navržena dle MKP výpočtu a respektuje složení skladby z předchozích kapitol. Vidlice byla zatížena ekvivalentem 100 kg s dynamickou složkou, která měla amplitudu sil 10% z celkové zátěže. Takto zatížená vidlice odolávala zatížení bez jakýchkoliv pozorovatelných změn. Proto bylo překročeno k navýšení statického zatížení o jednu třetinu. Statické zatížení na straně vidlice tak činilo ekvivalent 150 kg. S tímto zatížením vidlice i nadále odolávala bez známek destrukce v její geometrii. Proto bylo po překročení 9000 cyklů bez známky závady překročeno k přetížení vidlice pro stanovení oblasti destrukce vidlice. Oblasti destrukce jsou zobrazeny na Obr. 58.

4.3.2 Výsledky testu Vidlice č. 2

Vidlice č. 2 byla vyrobena, aby bylo možné porovnat výsledky s první zkouškou. Vzájemným porovnáním testů obou vidlic bylo možné eliminovat zkreslení výsledku testu vlivem výrobní chyby či vady materiálu.

Průběh testu probíhal se stejnými parametry jako test první vidlice. Ani u této vidlice nebylo v první fázi testu pozorováno jakékoliv zdeformování vidlice. I zde bylo přikročeno ke stejnému navýšení statického zatížení.

Po tomto zvýšení zatížení na maximální provozní hodnotu u vidlice nastala viditelná deformace přibližně po 3488 cyklech.

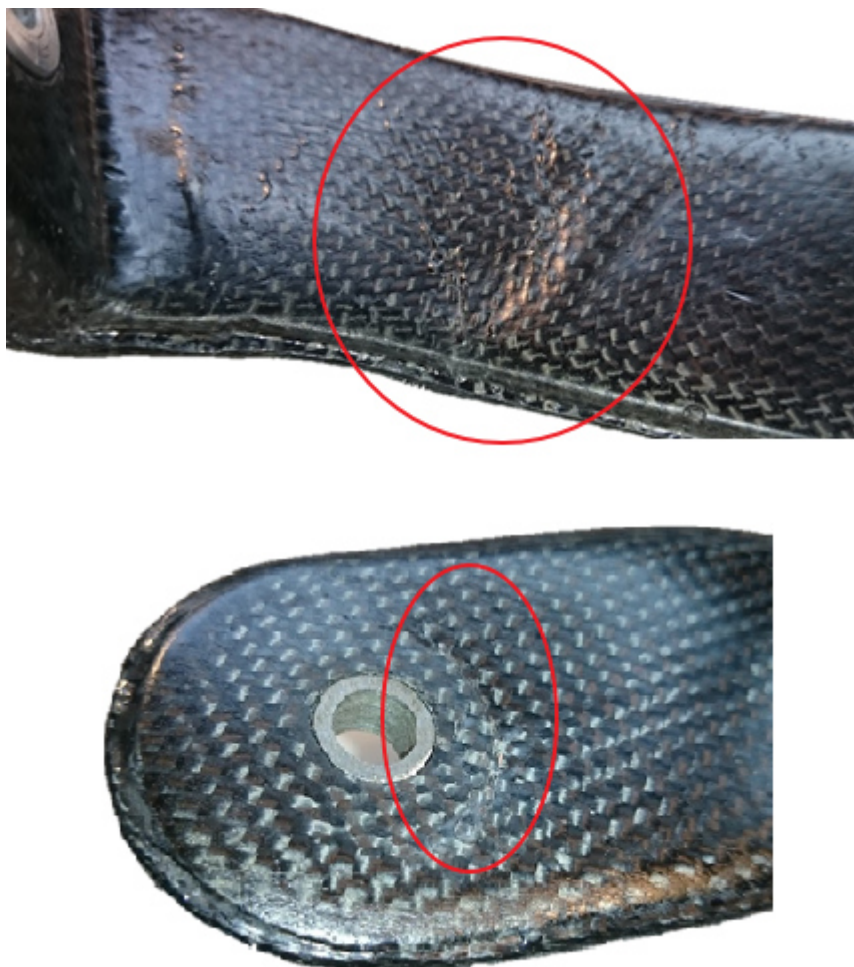


Obr. 57.: Deformace vidlice upnuté v testovacím standu při zatížení

Na vidlici došlo vlivem změny geometrie pod zatížením, k vylomení spodních insertů. Ve střední části boků vidlice vznikly průhyby, které vedly k poškození vláken na vnitřní straně vidlice. Na zadní straně vidlice, kde dochází ke spojení vnitřních a vnějších vrstev, došlo

k roztrhnutí této společné vazby a odhalení pěny. Po odlehčení zátěže měla vidlice snahu vrátit se do původní polohy.

Deformace vidlice nastává v místech, které výpočet pomocí MKP analýzy nepředpovídal. Tento jev je přisuzován především zpevnění vidlice v horní části, které výpočet, z důvodu výpočtové náročnosti, zanedbal. Deformace vidlice je zobrazena na Obr. 58.



Obr. 58.: Deformace vidlice č.2

Kapitola 5

Závěr

V závěru této práce bych rád připomněl motivaci práce, její přínos a vyhodnocení.

Práce vznikla s cílem získat přehled o použitelnosti kompozitního materiálu pro konstrukci vidlice ambulantní techniky především z pevnostního hlediska, a to jakožto reakce na trend snižování celkové hmotnosti ambulantních zařízení. Cílem práce bylo navrhnout a otestovat možné konstrukční řešení vidlice použité pro zadní kolo nosítek EXTERO.

Během práce byla provedena rešerše kompozitních materiálů k získání přehledu pro návrh skladby vidlice. Takto vzniklá vidlice byla podrobena MKP analýze a následně modifikována dle výsledku této analýzy. V práci je publikována pouze poslední verze výpočtu pro finální strukturu vidlice. Pro výrobu vidlic byly zhotoveny formy pomocí 3D tisku. Po výrobě vidlic a jejich insertů bylo navrženo uchycení vidlice na nosítka s důrazem na

zachování funkčních prvků vidlice. Dále byl navrhnout mechanismus pro testování vyrobených vidlic na dynamické zatížení. Také byly stanoveny parametry zatěžování i vyhodnocení testu.

Po shrnutí úlohy a zohlednění veškerých zjištěných faktů je třeba konstatovat, že kompozitní materiál je schopen v plném rozsahu použití produktu nahradit stávající řešení v podobě konstrukční oceli. Nově vzniklý produkt je schopen přenášet statické i dynamické zatížení se zachováním akceptovatelných rozměrů. Hmotnost kompozitní vidlice s hliníkovými inserty je 120g, což je oproti stávajícímu řešení úspora o 390g. Vidlice z kompozitního materiálu je schopna přenést ekvivalentní zatížení 150 kg s dynamickým účinkem odpovídající nárůstu zatížení o pět procent po dobu minimálně 3488 cyklů. Nárůstu životnosti vidlice je možné docílit přidáním nových vrstev do skladby vidlice. Přidání těchto vrstev zvyšuje pevnost i životnost vidlice výrazným způsobem. Těchto parametrů je schopna vidlice dosáhnout i za použití technologie ruční laminace do formy. Ta neumožňuje dosahovat takové kvality výroby, avšak výsledný produkt dokáže konkurovat nyní používanému řešení. Vidlici lze za pomoci ruční laminace vyrobit v požadované pevnosti i s obsluhou bez zkušeností s kompozitními materiály, avšak tato obsluha musí dbát na kvalitu při výrobě. Neboť právě kvalita výroby je hlavním parametrem ovlivňujícím pevnost vidlice.

Ekonomické hledisko nebylo součástí této práce, avšak bylo by nezodpovědné nezmínit závěry i tohoto rázu. Vidlice vyrobená ruční laminací je na výrobu mnohem náročnější a čas výroby jedné kompozitní vidlice je mnohonásobně delší, nežli je to mu u ocelové vidlice. Hmotnostní výhody vidlice jsou tedy vykoupeny zvýšenou výrobní cenou, která jistě bude ovlivňovat nasazení tohoto řešení do výsledného produktu. Po zdokonalení technologie výroby a zbylých procesů, na kterých je výroba závislá, však lze předpokládat trend nasazení kompozitních materiálů i do tohoto odvětví.

Použitá literatura

- [1] ČSN EN 12526. *Terminologie, doporučené značky a vícejazyčný slovník*. Praha: Český normalizační institut, 1999.
- [2] Wicke. *Katalog-Kola a pojezdové kladky*. Zlín: Wicke, 2015.
- [3] Torwegge. *Katalog-Samostatná a pojezdová kola*. Blancko: Torwegge, 2013.
- [4] Bs-Rollen. *Katalog-Dům koleček*. [Online]. [cit. 2015-05-11]. Dostupné z: <http://www.bs-rollen.de/fileadmin/bs-rollen.de/content/pdf/BS-Rollen-Katalog-CZ.pdf>.
- [5] BHAGWAN, Agarwal, Lawrence a Broutman. *Vláknové kompozity*. Praha: SNTL-Nakladatelství technické literatury, 1987.
- [6] Gottfried a Ehrenstein. *Polymerní kompozitní materiály*. Praha: Scientia, 2006.
- [7] Barbero, Ever J. *Introduction to composite materials design*. United States: Taylor and Francis Inc., 2010.
- [8] Bentur, Arnon. a Sidney. MINDESS. *Fibre reinforced cementitious composites*. New York: Elsevier science publishers LTD, 1990.
- [9] Ústav materiálového inženýrství FS. *Kompozitní materiály*. [Online]. [cit. 2016-13-02]. Dostupné z: http://umi.fs.cvut.cz/wp-content/uploads/2014/08/6_kompozitni-materialy.pdf.
- [10] JANČÁŘ, Josef. *Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2003.
- [11] LAŠ, Vladislav. *Mechanika kompozitních materiálů*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2008.
- [12] PETROUŠKA, Jindřich. *MKP v inženýrských výpočtech*. [Online]. VUT Ústav mechaniky těles, mechaniky a biomechaniky [cit. 2016-10-02]. Dostupné z:

<http://www.umt.fme.vutbr.cz/img/fckeditor/file/opory/RIV/MKP2011.pdf>.

- [13] MICHALEC, Jiří. *Pružnost a pevnost I*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2010.
- [14] HENNLICH. *Pouzdra, flexibilní kabely, energetické řetězy*. Litoměřice: Hennlich Industrietechnik, spol. s.r.o., 2007.
- [15] Icus. *Iglidur Expert Systém*. [Online]. [cit. 2016-16-04]. Dostupné z:
Available: <http://www.igus.cz/iglidurConf/Iglidur/Step1>.

Seznam příloh

Příloha č.1. – Šablona pro nástřihy vrstev skladby kompozitní vidlice

Příloha č.2. – Návrhový výkres sestavy pro uchycení vidlice na nosítka

Příloha č.3. – Program pro výpočet parametrů dynamického zatížení