



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE



FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ A ČÁSTÍ STROJŮ

Konstrukční návrh vidlice předního kolečka z kompozitních materiálů pro ambulantní transportní techniku

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Studijní program: (N2301) Strojní inženýrství

Studijní obor: (2301T047) Dopravní, letadlová a transportní technika

Autor práce: Bc. Jan Lebduška

Vedoucí práce: Ing. Jan Andruš

PRAHA 2015

Vysoká škola: **České vysoké učení technické v Praze**
Fakulta: **strojn**
Ústav: **12113, Ústav konstruování a částí strojů**
Akademický rok: **2014/2015**

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student: **Bc. Jan Lebduška**

Studijní program: **Strojní inženýrství**

Studijní obor: **Dopravní, letadlová a transportní technika**

Název práce: **Konstrukční návrh vidlice předního kolečka z kompozitních materiálů pro ambulantní transportní techniku**

Název práce anglicky: **Engineering design of front wheel fork made of composite materials for ambulance transportation means**

Zadání práce:

V rámci diplomové práce zpracujte kompletní hmotnostní, silovou a napěťovou analýzu aktuálního konstrukčního řešení podvozku předních nohou ambulantního podvozku nosítka typu EXTERO. Navrhněte konstrukční řešení stěžejní komponenty (přední vidlice) za použití moderních kompozitních materiálů. Zjednodušenou konstrukci v průběhu návrhu vyrobte a zhodnoťte její vhodnost pro sériové nasazení. K tomuto účelu navrhněte a sestrojte testovací zařízení. Finální konstrukční variantu verifikujte napěťovou analýzou. Výstupem bude technická dokumentace ke skladbě lamin podvozkového dílu a výrobní dokumentace zařízení pro zatěžování nově navrženého dílu.

Stručná osnova zadání:

- 1) Rešerše trhu pojezdových kol a koleček
- 2) Stručná rešerše kompozitních materiálů
- 3) Konstrukční úloha
 - I. Požadované funkce předního otočného kolečka
 - II. Stávající stav a jeho analýza
 - III. Předběžný návrh a výpočet kompozitové struktury
 - IV. Návrh testovacího standu pro zatěžování laminátové konstrukce
 - V. Finální podrobný konstrukční návrh přední vidlice otočného kola včetně napěťové analýzy

Rozsah grafické části:

- 1) Výrobní dokumentace nové konstrukční varianty (včetně nástřihů tkanin)
- 2) Výrobní dokumentace testovacího zařízení

Specifikace textové části:

- 1) Technická zpráva s podrobným konstrukčním řešením
- 2) Min. rozsah práce 80 stran vč. obrázků, přílohy zvlášť

Doporučené podklady:

SHIGLEY, J., MISCHKE, Ch., BUDYNAS, R.: *Konstruování strojních součástí*. Brno: Vutium, 2010.
LEE, H.: *Finite Element Simulations with ANSYS Workbench 14*. SDC Publications, 2012.
CHILDS, P.: *Mechanical Design Engineering Handbook*. Butterworth-Heinemann, Jordan Hill, 2013.
GIBSON, R. F.: *Principles of composite material mechanics*. McGraw-Hill, Michigan, 1994.

Vedoucí práce: **Ing. Jan Andruš**

Datum zadání: **10. 4. 2015**

Termín odevzdání: **19. 6. 2015**

Neodevzdá-li student diplomovou práci v určeném termínu (tuto skutečnost písemně zdůvodnil a omluva byla děkanem uznána), stanoví děkan studentovi náhradní termín odevzdání diplomové práce. Pokud se však student řádně neomluvil nebo omluva nebyla děkanem uznána, může si student zapsat diplomovou práci podruhé.

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

Zadání diplomové práce převzal dne:

.....
podpis studenta

.....
prof. Ing. Vojtěch Dinybyl, Ph.D.
vedoucí ústavu

.....
prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
děkan fakulty

Anotační list

Jméno a příjmení autora:	Bc. Jan Lebduška
Název diplomové práce:	Konstrukční návrh vidlice předního kolečka z kompozitních materiálů pro ambulantní transportní techniku
Anglický název:	Engineering design of front wheel fork made of composite materials for ambulance transportation means
Akademický rok:	2014/2015
Ústav/obor:	Ústav konstruování a částí strojů
Vedoucí diplomové práce:	Ing. Jan Andruš
Bibliografické údaje:	Počet stran: 86 Počet obrázků: 54 Počet tabulek: 8 Počet příloh: 3
Klíčová slova:	Kolo, vidlice, kompozitní materiál, testovací zařízení
Keywords:	Castor, fork, composite material, testing device

Abstrakt:

Práce se zabývá konstrukčním návrhem kompozitní vidlice pro kolečko ambulantního transportního nosítka Clinic EXTERO N114-P113. Analýza současného stavu prokázala předpoklad vyššího procentuálního zastoupení hmotnosti vidlice na celkové sestavě pojezdové části nosítka. Součástí práce je návrh, analýza a výroba prototypu vidlice a důležitých konstrukčních částí. Pro verifikaci MKP výpočtů je v průběhu práce navrženo a sestrojeno testovací zařízení.

Abstract:

The thesis is focused on the structural design of composite fork for ambulance stretcher Clinic EXTERO N114-P113. Analysis of the current state showed the assumption of higher percentage of the total forks weight on the whole stretcher assembly. The thesis includes the design, analysis and manufacture of prototype fork and its important components. For verification of FEM calculations was designed and constructed the testing device.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího práce. Všechny použité prameny jsem uvedl v seznamu literatury.

V Praze dne:

.....
podpis

Poděkování

*Rád bych poděkoval vedoucímu práce **Ing. Janu Andrušovi** za jeho připomínky, náměty a pomoc při vypracování této práce.*

VÝZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

označení	jednotka	popis
PA6		Polyamid
UHMW-PE		ultravysokomodulární polyethylen
HDPE		vysokohustotní polyethylen
PE		polyethylen
PBO		polyparafenylenbenzobisoxazol
CVD		chemical vapour deposition
PVC		polyvinylchlorid
PI		polyimid
PEEK		polyéteréterketon
PSU		polysulfon
PPS		polyfenylsulfid
ABS		akrilonitrilbutadienstyren
Al		hliník
B		bór
Ca		vápník
Si		křemík
Ti		titan
Mg		hořčík
UD		jednosměrné
MKP		metoda konečných prvků
HMH		Huber, von Mises, Hencky
FI		index selhání

Hm		vysokomodulové
Hs		vysokopevnostní
L		podélný směr
T		příčný směr
E_t	[Pa]	modul pružnosti v tahu
σ_p	[Pa]	pevnost v tahu
ρ	[kg · m ⁻³]	hustota
ε	[-]	poměrná deformace
$\varepsilon_{f,krit}$	[-]	kritická poměrná deformace
E_1, E_L	[Pa]	modul pružnosti v tahu ve směru 1 (L)
E_2, E_T	[Pa]	modul pružnosti v tahu ve směru 2 (T)
$E_3, E_{T'}$	[Pa]	modul pružnosti v tahu ve směru 3 (T')
G_{12}	[Pa]	modul pružnosti ve smyku ve směrech 1, 2
G_{23}	[Pa]	modul pružnosti ve smyku ve směrech 2, 3
G_{13}	[Pa]	modul pružnosti ve smyku ve směrech 1, 3
$\nu_{12}, \nu_{23}, \nu_{13}$	[Pa]	poissonova čísla (součinitele příčné kontrakce)
m	[-]	matrice
f	[-]	vlákno
F	[N]	zátěžná síla
A_f	[m ²]	plocha průřezu vlákna
A_m	[m ²]	plocha průřezu matrice
V_f	[-]	objemový podíl vláken
V_m	[-]	objemový podíl matrice
σ	[Pa]	napjatost
τ	[Pa]	smykové napětí

G	$[Pa]$	modul pružnosti ve smyku
σ_{oc}	$[Pa]$	mez únavy v ohybu
σ_{oD}	$[Pa]$	dovolené napětí v ohybu
τ_c	$[Pa]$	mez únavy v krutu
γ	$[-]$	zkos
c	$[-]$	tlak (compression)
t	$[-]$	tah (tension)
F_a	$[N]$	axiální síla
F_r	$[N]$	radiální síla
d	$[mm]$	průměr
p	$[Pa]$	tlak
v	$[m/s]$	rychlost
M_o	$[Nm]$	ohybový moment
W_o	$[m^3]$	kvadratický modul průřezu
q_o	$[N/m]$	spojité zatížení
R_{Ay}	$[N]$	reakční síla v místě A, působící ve směru osy y
R_{By}	$[N]$	reakční síla v místě B, působící ve směru osy y

OBSAH

Úvod.....	13
Rešerše	14
2.1 Pojazdová kola a kolečka.....	14
2.1.1 Historie	14
2.1.2 Rozdělení kol a pojazdových koleček podle použití	15
2.1.3 Materiály používané pro obruče, běhouny	16
2.1.4 Disky kol.....	19
2.1.5 Ložiska.....	19
2.1.6 Držáky kola.....	20
2.2 Kompozitní materiály.....	21
2.2.1 Klasifikace kompozitních materiálů	22
2.2.2 Kompozitní vlákna	23
2.2.2.1. Druhy polotovarů	28
2.2.3 Sendvičové materiály.....	31
2.2.4 Matrice.....	32
2.2.5 Základní vlastnosti kompozitové vrstvy.....	33
2.2.6 Způsoby porušování kompozitů	37
2.2.7 Mezní stavy kompozitů	38
Konstrukční úloha	41
3.1 Přední otočné kolečko.....	41
3.2 Analýza stávajícího stavu.....	43
3.2.1 Hmotnostní analýza.....	43
3.2.2 MKP analýza současného stavu.....	45

3.3	Návrh kompozitní konstrukce.....	49
3.3.1	Geometrie.....	50
3.3.2	Materiálová skladba	51
3.4	Napěťová analýza finálního řešení.....	52
3.4.1	geometrie.....	53
3.4.2	Tvorba sítě.....	53
3.4.3	Definice struktury	54
3.4.4	Úprava geometrie	55
3.4.5	Okrajové podmínky	56
3.4.6	Prezentace a analýza dosažených výsledků.....	56
3.4.7	Návrh upevnění prototypu k podvozku nosítka.....	60
	Praktická část.....	64
4.1	Návrh prototypové formy	64
4.2	Laminace prototypu	65
4.3	Návrh testovacího standu.....	67
4.3.1	Silový a kinematický rozbor	68
4.3.2	Konstrukce rámu.....	69
4.3.3	Výroba testovacího zařízení.....	74
4.3.4	Zatěžování prototypu	75
	Závěr.....	80
	CITOVANÁ LITERATURA	81

KAPITOLA 1

Úvod

Transportní technika se stala neodmyslitelnou součástí každodenního lidského života. Své uplatnění nachází napříč mnoha obory, mezi které patří mimo jiné i zdravotnictví. Příkladem transportní techniky v tomto oboru jsou ambulantní nosítka. Je velmi důležité, aby technika, která má sloužit k přepravě osob, splňovala funkční požadavky nejen z hlediska přepravovaných osob, ale i z pohledu obsluhy. Těmito požadavky jsou také dobrá manipulovatelnost, ergonomie a především nízká hmotnost.

Tato práce se proto snaží svým obsahem přispět ke snížení hmotnosti ambulantního nosítka. Pro návrh nového řešení bylo zvoleno nosítko Clinic EXTERO N114-P113 od firmy Medirol. Toto nosítko je konstruováno z lehkých hliníkových slitin a plastů, ovšem pojzdová část tuto skutečnost nerespektuje a značně se podílí na celkové hmotnosti sestavy nosítka.

Cílem této práce je zpracovat kompletní hmotnostní, silovou a napěťovou analýzu aktuálního konstrukčního řešení podvozku předních nohou ambulantního nosítka typu EXTERO. Konkrétně se jedná o vidlici předního kola a její prvky. Pro návrh konstrukčního řešení vidlice bude využito moderních kompozitních materiálů. Z navržených variant řešení bude vyrobena jedna zjednodušená konstrukce, která bude následně zhodnocena z hlediska vhodnosti pro sériové nasazení. K tomuto účelu bude navržen a sestrojen testovací stand. Finální konstrukční varianta bude verifikována napěťovou analýzou. Výstupem bude technická dokumentace ke skladbě lamin podvozkového dílu a výrobní dokumentace zařízení pro zatěžování nově navrženého dílu.

KAPITOLA 2

Rešerše

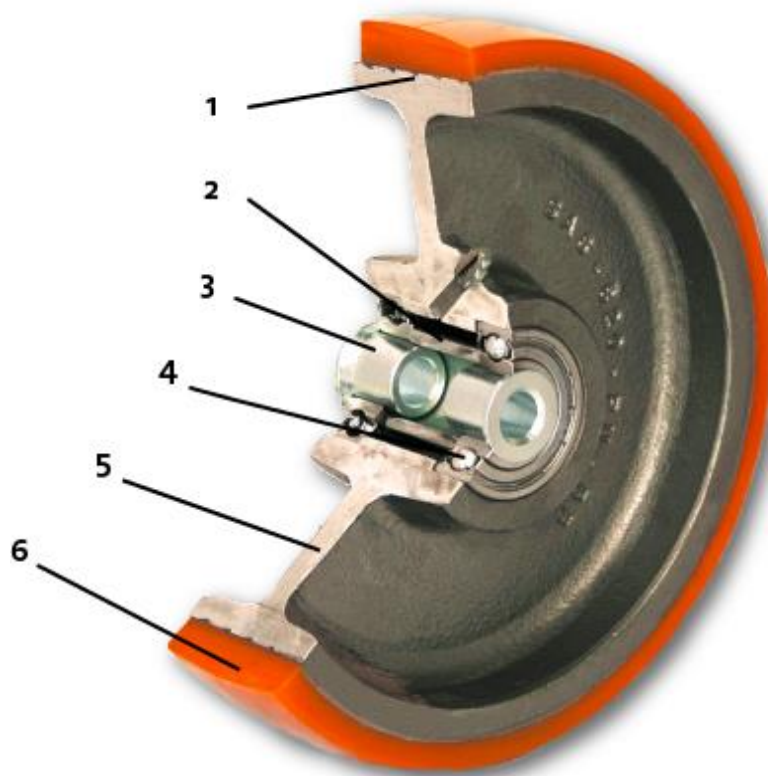
2.1 Pojezdová kola a kolečka

2.1.1 Historie

V průběhu let se nedílnou součástí lidského života stalo kolo. Aniž by si to člověk mnohdy uvědomoval, setkává se s ním téměř na každém kroku. Kolo nachází své uplatnění napříč mnoha obory, nejen technickými. Ovšem nejstarší a nejvíce využívanou oblastí použití se stala přeprava věcí a osob.

Vznik kola se datuje kolem roku 4 000 př. n.l., tedy před více než šesti tisíci lety na území Sumerské říše. Nejednalo se však o kolo určené k přepravě, nýbrž o část hrncířského kruhu.

Kolo, z hlediska transportní techniky, je definováno normou ČSN EN 12 526 jako kruhová konstrukce, která je schopná otáčet se kolem osy, buď přímo nebo pomocí ložiska(ek) a vnější část je v kontaktu se zemí. [1]



Obr. 1.: Konstrukční části kola: 1 – ráfek, 2 – mezikroužek, 3 – distanční vložka, 4 – ložisko, 5 – disk, 6 – obruč, běhoun. [2]

2.1.2 Rozdělení kol a pojezdových koleček podle použití

Kola a pojezdová kolečka se mohou kategorizovat dle mnoha kritérií, ovšem nejčastěji se dělí dle své aplikovatelnosti. [2, 3, 4]

Pojezdová kolečka pro nábytek a otočná křesla

Do této skupiny patří kola určená do interiéru, která se nejčastěji používají na otočná křesla a nábytek. Mohou být vybavena brzdícím zařízením, anebo bez něj. Dle normy ČSN EN 12 529 se tato kategorie dělí na 4 typy [5]:

- H – hladké rovné kolečko, tvrdý běhoun, jednotná barva celého kola
- W – pružný běhoun kolečka, odlišná barva kola a běhounu
- C – elektricky vodivá
- U – s brzdícím mechanismem

Přístrojová kola a pojezdová kolečka

Interiérová kola pro lehká zařízení a přístroje do hmotnosti 180 kg a pojezdové rychlosti do max. 1,1 m/s. Mohou být vybavena aretačí otáčení a parkovací brzdou. Jsou určena pro manuální pohybové aplikace například do obchodů, hotelů, restaurací, nemocnic atd.

Transportní kola

Uplatňují se zejména v průmyslovém odvětví. Slouží pro manuálně pohybované, ale některé typy i motoricky vlečené aplikace. Nosnost je obvykle do 600 kg a jsou určena do rychlosti 1,1 m/s. Brzdový a aretační systém u těchto kol může sloužit pro aretaci kola v požadovaném směru závisle nebo nezávisle na brzdění kola.

Těžkotonážní kola

Jedná se o kola, která mají robustní konstrukci z lisovaných, nebo svařovaných plechů. Někteří výrobci mají ve svém sortimentu kola se statickou nosností až 12 000 kg. Jsou určena do rychlosti 4,4 m/s a mohou být vybavena různými druhy brzd.

Kola a pojezdová kolečka s pneumatikou

Tato kola se vyznačují dobrým tlumením rázů. Nosnost pneumatiky je ovlivněna počtem vrstev plátna v ní obsažené. Obecně platí, že s rostoucí nosností roste počet vrstev plátna. Opět se používají jak pro manuální, tak i pro motoricky vlečené aplikace.

Na úkor tlumení rázů, hrozí nebezpečí proražení. Je také nutné dodržovat předepsaný tlak v pneumatice, protože nesprávným nahuštěním se ničí. Toto nebezpečí odstraňují kola s běhounem z pěnového polyuretanu.

Odpružená a absorpční pojezdová kolečka

Pro aplikace kde je vyžadováno tlumení rázů, jsou určena kola vybavená dodatečným odpružením. To bývá nejčastěji realizováno pomocí vidlice s kyvnou částí, která je doplněna pružným elementem (pružina, pryž, polyuretan), který pohlcuje silové rázy. Stejně jako kola v předcházejících kategoriích mohou být doplněna brzdovým a aretačním systémem.

2.1.3 Materiály používané pro obruče, běhouny

Norma ČSN EN 12 526 definuje obruč jako část kola, která je vyrobena z jiného materiálu, než je vyroben disk (*Obr. 1*). Běhoun je dle normy vnější povrch kola či obruče, který je v kontaktu se zemí. [1]

Materiál běhounu významně ovlivňuje chování celkové sestavy kola a transportovaných objektů. Při výběru kola je tedy nutné brát v potaz nejen jeho nosnost, ale také materiál a vlastnosti běhounu.

Následující rozdělení je uspořádáno dle nejčastěji používaných materiálů pro běhouny kol a nezahrnuje materiály distribuované pod firemními názvy. Tvrdosti uvedené u jednotlivých druhů běhounů se podle výrobce liší. Jedná se tedy o hodnoty orientační. [2, 4, 6, 7, 8]

- **Plnopryžový běhoun**

Nárazuvzdorný, tlumící vibrace, tichý chod. Při dlouhodobém stání pod zvýšenou zátěží se může tento typ běhounu trvale deformovat. Tvrdost 85°ShA¹. Použitelné v rozmezí teplot -20°C až +80°C. Pro svou relativně nízkou cenu je velmi rozšířen. Používá se především na přístrojová transportní kola a je určen na rovné povrchy.

- **Elastický plnopryžový běhoun**

Běhoun s vysokou nosností a zvýšenou odolností proti otěru. Zhotoven ze speciální pryžové směsi. Kola s tímto typem běhounu vykazují dobré jízdní vlastnosti i na nerovných površích. Tvrdost 64°ShA. Použitelné za teplot od -20°C do +80°C. Opět se používají na přístrojová transportní kola.

- **Termoplastický pryžový běhoun**

Běhoun s nízkým valivým odporem. Nešpiní, avšak je mastný a může na určitém typu podkladu zanechat stopu. Teplotní odolnost -20°C až +60°C. Uplatňuje se na přístrojových transportních kolech určených do interiérů s rovnými podlahami.

- **Polyuretanový běhoun**

Tento typ běhounu vykazuje mnohem lepší vlastnosti, než mají běhouny pryžové. Při styku s podlahou nezanechává stopy, vykazuje nízký valivý odpor, dobře odolává minerálním tukům, olejům, kyselinám a zásadám. Tvrdost 55°ShD. Použitelný za teplot -40°C až +80°C. Některé typy se vyrábí jako elektricky vodivé (ČSN EN 12 526). Používá se na přístrojových transportních kolech.

¹ Tvrdost dle Shorea. Jedná se o dynamicko-elastickou zkoušku odrazem zkušební tělesa od měřené plochy. Zjišťuje se výška odskoku zkušební tělesa.

- **Polyuretanový běhoun – Litý**

Vysoce elastický materiál, u kterého nedochází při dlouhé zátěži k trvalé deformaci. Je vhodný pro vysoké zátěže i na menších nerovnostech. Vykazuje vysokou odolnost vůči otěru, chemickému a mechanickému opotřebení. Tvrdost se dle výrobce pohybuje okolo 95°ShA.

- **Polyuretanový běhoun – Pěnový**

Pěnový polyuretan vytváří v běhounu kola vzduchové mezery, které mají za následek zvýšení pružnosti celé obruče. Běhoun má částečně vlastnosti nafukovacího kola, ovšem nehrozí proražení. Je odolný vůči otěru, bezúdržbový, lehký a tlumící hluk.

- **Polyamidový běhoun**

Polyamid PA6 je materiál vysoké tvrdosti a houževnatosti, který snese velké zatížení. Používá se jak pro běhouny, tak i na disky kol. Výroba probíhá vstřikováním na ocelový náboj, do kterého se následně osadí ložiska. Běhouny vykazují nízký valivý odpor a při dlouhodobém statickém zatížení se nedeformují. Použitelné za teplot -40°C až +80°C. Při pohybu po nerovném povrchu přenáší tvrdý polyamid (75°ShD) vzniklé vibrace a je zde také zvýšená provozní hlučnost. Je odolný proti otěru a částečně vůči solím, kyselinám a louhům. Používá se na transportní a na těžká transportní kola a rolovací kolečka, s nižší frekvencí používání.

- **Polypropylenový běhoun**

Stejně jako u polyamidových běhounů, probíhá výroba vstřikováním základního materiálu, polypropylenu, na ocelový náboj. Propylenový není tedy jen běhoun, ale také disk kola. Tvrdost 65°ShD. Je chemicky nezávadný, odolný vůči olejům, korozi, ropným produktům, tukům a rozpouštědlům. Použitelný při teplotách -10°C až +60°C. Není odolný vůči silným oxidačním látkám. Vhodný pro použití v potravinářských provozech, na stacionární zařízení – regály, stoly atd.

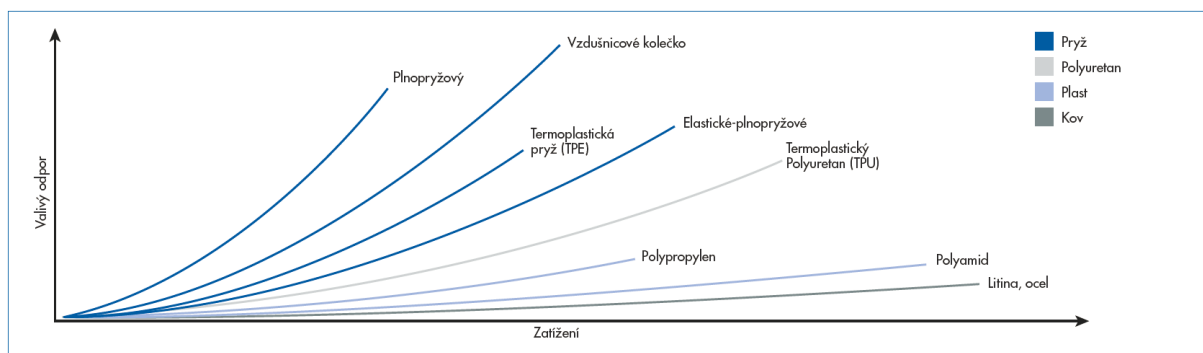
- **Litinový běhoun**

Celé kolo je vyrobeno z litiny. Je vysoce odolné vůči otěru, kovovým třískám a agresivním látkám. Proti korozi je chráněno nátěrem. Vhodné pro vysokou zátěž i při nešetřném zacházení. Použitelné za zvýšených teplot (+600°C) se sníženou maximální nosností. Dlouhodobá statická zátěž nedeformuje jeho obvodový tvar. Na rovném povrchu vykazuje minimální valivý odpor, oproti tomu při nerovném povrchu nepojíždí optimálně. Netlumí rázy a jedná se o relativně hlučný provoz.

- **Teplotně odolný běhoun – fenolové pryskyřice**

Disk i běhoun kola jsou vyrobeny ze stejného materiálu lisováním za zvýšeného tlaku a teploty. Tvrdost 90°ShD. Kola nejsou otěruvzdorná a mají nízkou odolnost pro častější používání na nerovném povrchu. Používají se v aplikacích s požadavkem na teplotní odolnost (-30°C až +280°C), například lakovny.

Na *Obr. 2* je znázorněn valivý odpor při rozjezdu kola pro různé typy běhounů.



Obr. 2.: Závislost valivého odporu různých druhů běhounů na zatížení. [7]

2.1.4 Disky kol

Jak je patrné z *Obr. 1*, disk je nosnou částí kola. Má tedy zásadní vliv na celkovou nosnost. V jeho středu je osazeno ložisko a na vnějším obvodu je uchycena obruč (běhoun) kola. [2, 7]

Druhy disků:

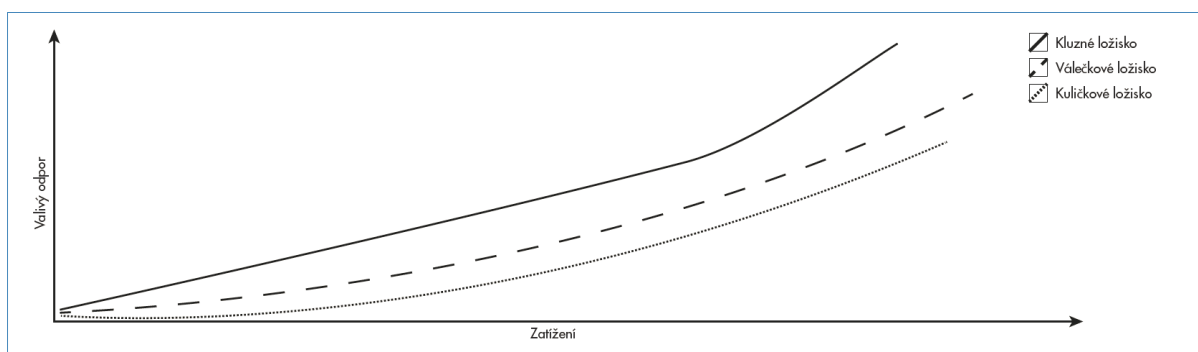
- Plastové – polyamidové, polypropylenové
- Ocelové – tvarované plechové výlisky
- Hliníkové – slitiny hliníku
- Litinové – šedá litina, povrchově upravený proti korozi

2.1.5 Ložiska

Norma ČSN EN 12 526 uvádí pět druhů ložisek používaných v sestavách kol. Jsou to ložiska kluzná, válečková, kuličková, kuličková s kosoúhlým stykem a kuželíková. Poslední dva uvedené druhy ložisek se ovšem nepoužívají pro náboje kol, ale při uchycení vidlice kola k podvozkové části. Typ ložiska má velký vliv na ovladatelnost kola, zejména při rozjezdu (*Obr. 3*).

Nejčastěji se používají tyto typy [2, 3, 4, 6, 8]:

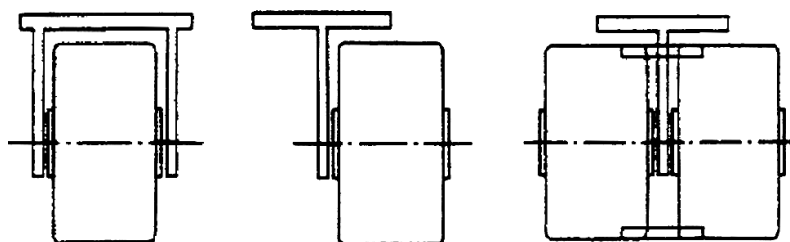
- Kluzné – nejlevnější typ ložiska, vhodné při méně častém užití, provozu s vysokou vlhkostí, odolné proti korozi
- Kuličkové – vhodné pro vyšší zatížení, lehký komfortní chod, provozní odolnost, vhodné pro kola s vyšší frekvencí užívání.
- Válečkové/jehlové – nízký valivý odpor i při vyšším zatížení, odolné, robustní,



Obr. 3.: Závislost valivého odporu různých typů ložisek. [7]

2.1.6 Držáky kola

Přípevnění pojezdového kolečka k transportnímu zařízení je dle normy ČSN EN 12 526 realizováno pomocí držáků. Existují tři základní typy (Obr. 4) a to vidlicový držák, držák čepu a držák čepu dvojitého kola. [1]



Obr. 4.: Základní typy držáků kola. (Zleva) Vidlicový držák, držák čepu, držák čepu dvojitého kola. [1]

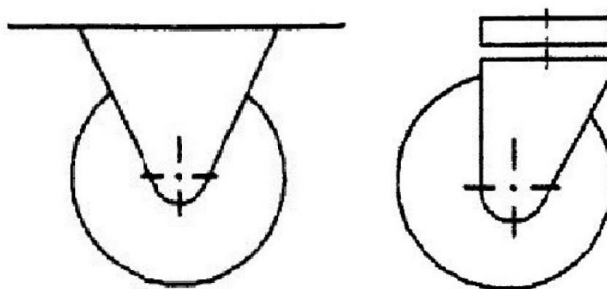
Nejčastější způsob uchycení je pomocí vidlicového držáku (dále jen vidlice). Sestava držící hřídel na obou stranách náboje. Jedná se o jednoduchý způsob, který ovšem vede k lepšímu rozložení ohybového momentu na hřídeli kola, než je tomu například při realizaci pomocí držáku čepu. [1, 2]

Třetí způsob, tedy držák čepu dvojitého kola (sestava držící hřídel pouze mezi dvěma koly), se používá například u kolečkových židlí.

Přípevnění kolečka k transportnímu zařízení

- Příruba – uchycení je realizováno pomocí příruby a 4 šroubů. Jedná se o pevný způsob uchycení.
- Středový otvor – spojení vidlice a transportního zařízení je realizováno šroubem, který prochází přes středový otvor a je zajištěn matkou. Jedná se o méně pevné spojení než přírubou, oproti tomu nemá tak velké nároky na prostor.
- Čep – svislá vrchní část pouzdra určená pro připojení k patce. Použití pro nemocniční lůžka, lešení atd.

Dle konstrukce vidlice se dále rozlišují kola pevná a otočná (*Obr. 5*). U pevných kol umožňuje vidlice otáčení kola pouze kolem jeho osy, zatím co u otočných umožňuje vidlice i změnu směru, tedy ve směru působící síly na transportní zařízení. [1, 8]



Obr. 5.: Pevná a otočná vidlice. [1]

2.2 Kompozitní materiály

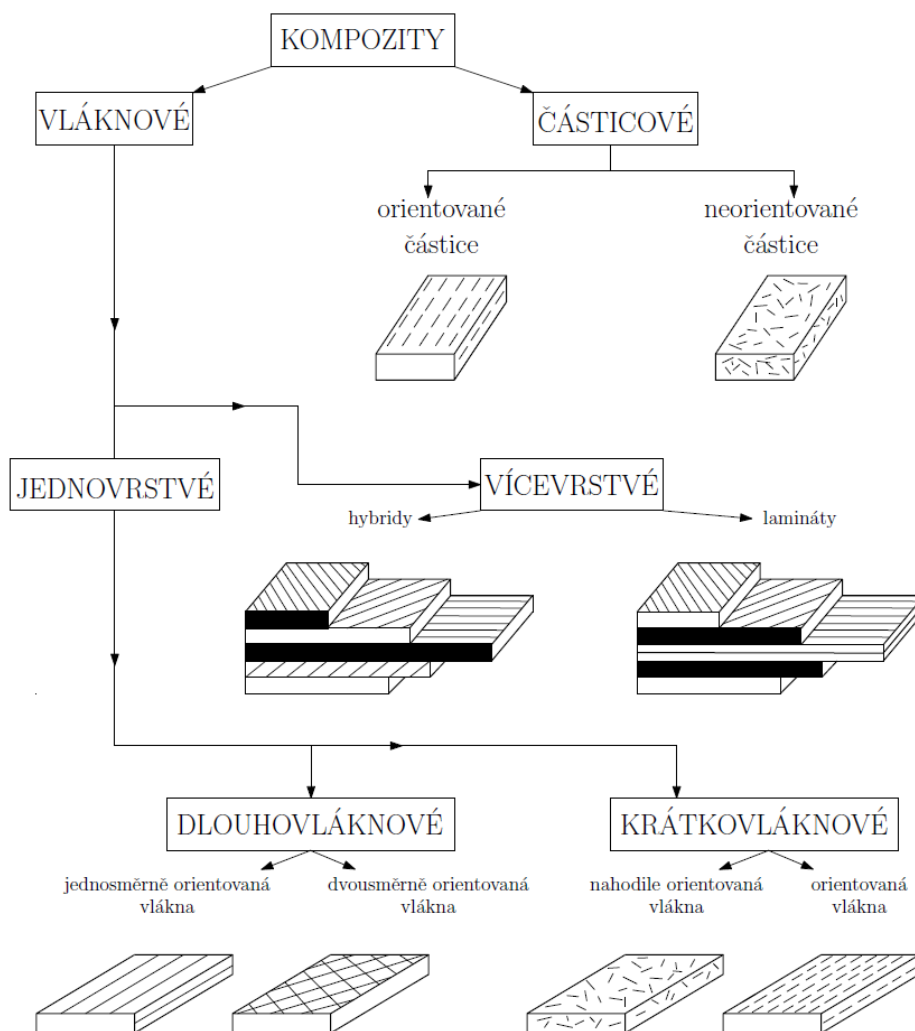
Pojmem kompozitní materiál je myšlen materiál složený ze dvou či více odlišných složek - fází. Rozdílnost jednotlivých složek a jejich mechanických vlastností je třeba posuzovat z hlediska makrostruktury, neboť z mikrostrukturního hlediska by se za kompozitní považovala většina materiálů. Jednotlivé fáze oddělené rozhraním jsou obvykle v tuhém stavu. Spojitou fází tvoří matrice, sekundární obvykle nespojitou fází tvoří částice (plniva) různého tvaru a velikosti. [9, 10]

2.2.1 Klasifikace kompozitních materiálů

Při současných možnostech kombinování složek, které kompozity vytvářejí, se člení do mnoha skupin. Nejčastěji se však dělí:

- Dle druhu matrice: Kovová, polymerní, silikátová matrice...
- Dle geometrického tvaru sekundární fáze: Vlákenná, částicová plniva

Na *Obr. 6.* je vyobrazeno obecně přijaté dělení kompozitních materiálů dle geometrického tvaru plniva.



Obr. 6.: Klasifikace kompozitních materiálů. [9]

Částicové se od vláknových kompozitů liší především tvarem plniva. Plnivo v nich obsažené je ve formě částic různých tvarů a to například kulové, krychlové, jehlicovité a jiné.

Částice mohou být orientovány nahodile, nebo s určitou preferencí směru. Omezují rozvoj plastických deformací a tím zvyšují mez kluzu, mez pevnosti a také tvrdost výsledného materiálu.

Vláknové kompozity jsou vyztuženy vlákny, která mají délkové rozměry v porovnání s jejich průřezem podstatně větší. Lze je rozdělit na jednovrstvé, tvořené jednou nebo více vrstvami stejné orientace a vlastností, a vícevrstvé. **Jednovrstvé** kompozity se dále dělí dle délky vlákna na dlouhovláknové a krátkovláknové. Vlákna u dlouhovláknových kompozitů mohou být orientována jedním směrem – jednosměrný kompozit (lamina). Výroba probíhá kladením vláken v jednom směru a následným prosycením pryskyřicí. Vyznačují se vysokou pevností ve směru vláken a naopak velmi nízkou pevností ve směru kolmém na vlákna. Pro dosažení vyrovnanějších vlastností se používá vyztužení i v druhém směru, kdy jsou vlákna na sebe kolmá. U krátkovláknových kompozitů jsou vlákna nejčastěji orientována nahodile a bývají vstříkována do formy spolu s pryskyřicí. Nejčastěji se v praxi používají **vícevrstvé** kompozity, které jsou složeny z několika různě orientovaných jednosměrových vláknových kompozitů. Jsou-li materiály v každé vrstvě stejné, nazývá se tento kompozit laminát, v opačném případě se jedná o hybridní laminát. [9, 11]

Nespornou výhodou vláknových kompozitů je jejich poměr vysoké pevnosti a tuhosti k nízké hmotnosti. Rovněž lze také díky orientaci vláken dosáhnout požadovaných mechanických vlastností v daných směrech.

2.2.2 Kompozitní vlákna

S ohledem na malé průřezové rozměry, se v technických aplikacích nepoužívají vlákna přímo, ale vkládají se do matricových materiálů. Zatímco vlákna tvoří nosnou strukturu kompozitních materiálů, matrice mezi nimi přenáší namáhání a chrání je před narušením z okolního prostředí. Vláknové kompozity jsou schopny dosahovat vysokých pevností a jsou tak velmi důležitou třídou kompozitních materiálů. [11]

Mechanické vlastnosti vláken

Obecně platí, že teoretické hodnoty pevnosti většiny materiálů jsou mnohem vyšší, než ve skutečnosti naměřené. Tento rozdíl je patrně způsoben vadami v materiálu. Pevnost snižují zejména trhliny, které leží kolmo na směr působícího zatížení.

Tabulka 1: Vlastnosti vybraných vláken. [11]

Materiál	E_t	σ_{Pt}	ρ	E_t/ρ	σ_{Pt}/ρ	$\varepsilon_{t,krit}$
	[GPa]	[GPa]	[g · cm ⁻³]			[%]
E-sklo	72,4	3,5	2,54	28,5	1,38	2,5
S-sklo	85,5	4,6	2,48	34,5	1,85	2,5
Grafit Hm	390,0	2,1	1,90	205,0	1,10	0,7
Grafit Hs	240,0	2,5	1,90	126,0	1,30	0,7
Bór	385,0	2,8	2,63	146,0	1,10	0,8
Křemen	72,4	5,8	2,19	33,0	2,65	0,9
Wolfram	414,0	4,2	19,30	21,0	0,22	
Berylium	240,0	1,3	1,83	131,0	0,71	
Kevlar Aramid 49	130,0	2,8	1,50	87,0	1,87	2,5

Typy vláken

V následujícím rozdělení jsou vybrány nejpoužívanější typy vláken.

- *Skelná vlákna*

Skelná vlákna se primárně vyrábí ze směsi oxidů Si, Al, Ca, Mg a B. Principem výroby je obvykle tažení taveniny skrze malý otvor. E-sklo (vysoce tuhé) se stalo nejrozšířenější výztuží pro kompozitní materiály. Další typ skelného vlákna, S-sklo (vysoce pevné), má oproti předchozímu zhruba o 30% vyšší tahovou pevnost a o 20% vyšší modul pružnosti.

Díky svým dobrým mechanickým vlastnostem a poměrně nízké ceně, nacházejí skelná vlákna své uplatnění v mnoha aplikacích, počínaje rybářskými pruty, loděmi a leteckým průmyslem konče. [12]

V kompozitech jsou mimo výše uvedená dále používána vlákna ze skloviny A, C, D, AR, L a další.

- ***Uhlíková vlákna***

Jedná se o vlákna s vysokou pevností a tuhostí, vysokou únavovou pevností a nízkou měrnou hmotností. Naproti tomu je jejich velkou nevýhodou nízká odolnost proti nárazu, která je způsobena jejich křehkostí. Ohebnost při textilním zpracování je zaručena menšími průměry. [13]

Organické suroviny jsou nejprve karbonizovány. Při tomto procesu se odštěpí téměř veškeré prvky až na uhlík. Se stoupající teplotou se zlepšují mechanické vlastnosti. Tvorba grafitové struktury je ukončena při teplotách nad 1800°C. Výchozími surovinami pro výrobu uhlíkových vláken jsou tři materiály, a to celulóza, polyakrylonitril anebo anizotropní smola. [14]

Nejprve se karbonizuje primární vlákno. Při tomto kroku se ale nesmí surovina roztavit a zreagovat na nechtěné produkty. Zvlákněné smoly se proto zesítují naoxidováním do termosetu. Zvláknění probíhá za přítomnosti napětí, aby došlo k vytvoření molekul orientovaných ve směru osy vlákna. Čím je tato orientace přesnější, tím má vlákno lepší mechanické vlastnosti. [15]

Požadovaných vlastností se dosahuje zpracováním při určitých teplotách. Například vysokopevnostní vlákna (HS - „High Strength“) jsou získávána při 900°C až 1500°C. Naproti tomu vlákna vysokomodulová (HM - „High Modulus“), vyrobená dalším zpracováním HS - vláken při teplotě 2000°C až 2800°C, mají vyšší modul pružnosti v tahu. [15]

- ***Polymerní vlákna***

- ***Aramidová vlákna***

Jedná se o vlákna na bázi lineárních organických polymerů, mající kovalentní vazby orientované podle osy vlákna. Označení aramid vzniklo spojením slov aromatický polyamid. Byl poprvé vyroben americkou chemickou společností DuPont pod názvem Kevlar. Podle Federální obchodní komise² je aramidové vlákno definováno jako vlákno vyrobené z polyamidu s dlouhým uhlovodíkovým řetězcem, jehož alespoň 85% peptidických vazeb spojuje dvě aromatická jádra. [14, 16]

Výroba probíhá navíjením pevného vlákna z kapalného roztoku polyparafenilového teraftalamidu v koncentrované kyselině sírové. Ta slouží k udržení vodou nerozpustného polymeru v roztoku v průběhu syntézy a soukání. [15, 17]

Vlastnosti aramidového vlákna [16, 17]:

- Bez teploty tání
- Špatně zápalné
- Dobrá integrita tkaniny při zvýšených teplotách
- Odolné vůči odření, teplu a organickým rozpouštědlům
- Vysoká pevnost a vysoký modul pružnosti

Díky svým vlastnostem se používá nejen k výrobě ochranných balistických prostředků (neprůstřelné vesty), ale například i pro ohnivzdorné oblečení, výztuže pneumatik, plachty lodí, sportovní pomůcky a jiné. [17]

- ***UHMW-PE***

UHMW-PE je syntetizován z monomerů ethylenů. Následným spojováním vzniká ultravysokomolekulární polyethylen. Jedná se o molekuly PE, které jsou uspořádanější a delší než klasický vysokohustotní polyethylen (HDPE). Vlivem téměř přímé orientace makromolekul PE v podélném směru vlákna, je dosaženo jeho vysoké tuhosti a pevnosti. Vyniká mechanickou odolností proti nárazu i při nízkých teplotách a je jedním z nejvíce

² Federal Trade Commission

otěruvzdorných plastů. UHMW-PE nahrazuje v mnoha aplikacích, kde je vyžadována vysoká odolnost proti opotřebení, ocel. [18]

Výroba probíhá čtyřmi základními způsoby:

- Kompresní tavení
- Tlaková extruze
- Gelové spřádání
- Slinutí

Nevýhodou těchto vláken je nízká teplota tání krystalů (140°C) a špatná smáčivost pryskyřicemi. Ovšem tento problém je možné odstranit povrchovými úpravami. [13]

○ **PBO**

Polyparafenylenbenzobisoxazol je izotropní krystalický polymer. PBO vlákna byla vyvinuta japonskou firmou Toyobo. Vyznačují se dobrými creepovými vlastnostmi, chemickou a abrazivní odolností a z polymerních vláken mají největší tepelnou odolnost. [13, 19]

• **Keramická vlákna**

Keramická vlákna mají vysokou teplotní odolnost, ale jsou zároveň velmi křehká. Patří mezi ně vlákna z SiC , Al_2O_3 a Si_3N_4 . [13]

Používají se především jako svrchní, teplotně odolné vrstvy laminátu v interiérech letadel, které musí odolat teplotě $1\,093^{\circ}\text{C}$ ($2\,000^{\circ}\text{F}$) po dobu nejméně 15min. [20]

• **Bórová vlákna**

Bórová vlákna jsou 5x silnější než ocel. Vyrábí se CVD procesem s atmosférou obsahující bór. Ten je nanášen na jemné wolframové, či uhlíkové vlákno.

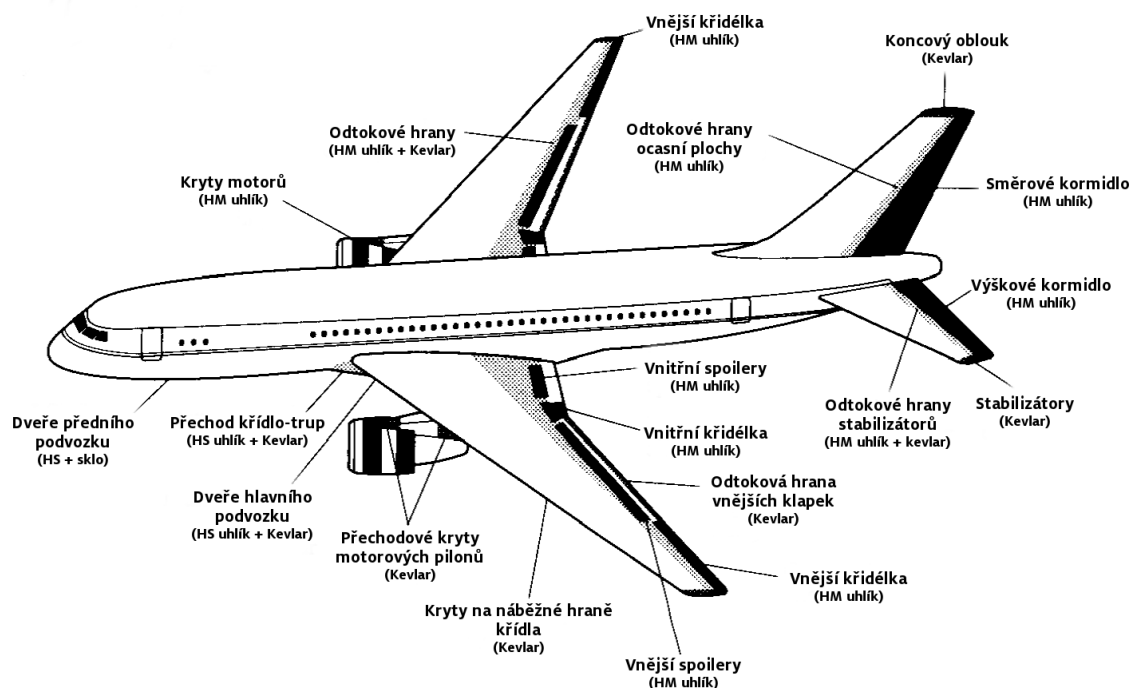
Jedná se o silná tuhá vlákna s nízkou hmotností a dobrými tahovými a tlakovými vlastnostmi. Relativně větší průměr bórových vláken je příčinou výborné odolnosti laminátu proti ztrátě stability vybočením. [15]

Bórová vlákna se používají v širokém spektru sportovních potřeb – rybářské pruty, lyže, rámy kol, ale i v leteckém průmyslu – ocasní plochy letadel. [20]

- **Přírodní vlákna**

Tato vlákna mohou být rostlinná, minerální a proteinová. Rostlinná vlákna se využívají především k vyztužování plastů. Vhodná pro tuto aplikaci jsou vlákna s celulózovým základem. Do této kategorie spadá len, konopí, sisal, juta, ramie a bavlna. Jejich výhodou je nízká cena, čichová nezávadnost a odolnost proti stárnutí. [13, 14]

Příkladem minerálních vláken jsou vlákna čedičová. Ta mají velice obdobné vlastnosti jako skleněná vlákna, i jejich výrobní postup je velice podobný. Čedič se zvlákní v pecích při teplotě okolo 1300°C. [21]



Obr. 7.: Použití kompozitních materiálů na letadle Boeing 767. [12]

2.2.2.1. Druhy polotovarů

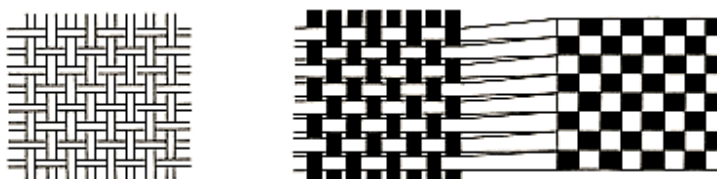
Vyztužující vlákna jsou samostatně využívána pouze výjimečně. Ze zpracovatelských důvodů se aplikují upravené produkty. Sloučením jednotlivých vláken vznikají prameny, ze kterých se zpracovávají následující polotovary [14]:

- Příze
Výroba probíhá spřádáním vláken a dále se zpracovává na tkaniny.
- Nitě
Skládají se z jedné, nebo více přízí, které jsou společně spředeny. Proces spojování jednotlivých přízí se nazývá skaní (spojování a zakrucování dvou a více přízí).
- Roving
Jedná se o sdružené prameny s žádným nebo malým počtem zákrutů – méně než 40 zákrutů/m. Zpracování probíhá sekáním, tkaním, navíjením nebo tažením nekonečného pramence.
- Spředený roving
Výroba probíhá spřádáním vláken stočených kolem podélné osy
- Rohože ze sekaných pramenců
Plošné netkané polotovary o hmotnosti 300 – 900 $g.m^{-2}$. Vyrábějí se ze sekaných vláken o délce 25 nebo 50 mm , které jsou nepravidelně plošně uložena do jednotlivých vrstev. Po nasycení pojivem a vysušení je možné takto vzniklou rohož navíjet do rolí.
- Rohože z kontinuálních vláken
Na rozdíl od rohoží ze sekaných pramenců probíhá výroba kladením nekonečných vláken do jednotlivých vrstev. Vlákna jsou uložena nepravidelně a nejsou nijak orientována.
- Povrchové rohože
Netkané rohože, jež jsou určeny do povrchové vrstvy laminátu. Zabraňují proražení hrubší struktury na povrch. Vyrábí se ze skleněných nebo termoplastových vláken.
- Krátká vlákna
Vlákna namletá (0,1 - 5 mm) a rozptýlená. Používají se pro vyztužení termoplastů.

- Tkaniny

Výrobky z vláken nebo pramenců uložených v útku a osnově, které mají vyztužující funkci ve dvou směrech. Vzájemné uspořádání osnovy a útku vytváří základní typy vazeb: [13, 14]

Plátnová vazba – základní, a nejvíce rozšířená vazba, málo poddajná při tvarování. Pramen útku prochází nad a pod každým pramenem osnovy.



Obr. 8.: Plátnová vazba [13]

Keprová vazba – pramen útku překříží minimálně dva prameny osnovy a poté opět projde pod jedním, nebo více prameny. V další řadě je útek posunut do strany, vždy k nejbližšímu prameni osnovy. Vzniklá vazba je ohebnější a je proto vhodnější pro tvarové prvky. Díky menšímu zvlnění vláken je laminát pevnější a tužší.



Obr. 9.: Keprová vazba [13]

Atlasová vazba – nejméně pevná textilní vazba. To je způsobeno volností jednotlivých pramenů. Čtyři nebo více pramenů útku překrývají jeden pramen osnovy svrchu. Ze spodní strany je pramen osnovy překryt pouze jedním útkovým pramenem. Atlasové tkaniny umožňují dosáhnout velmi hladkého povrchu laminy.



Obr. 10.: Atlasová vazba [13]

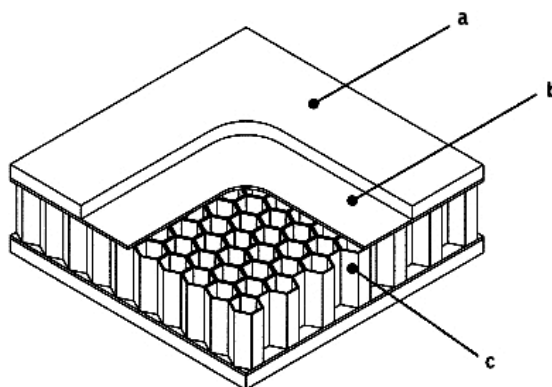
Pokud je v osnově a útku použita různá skladba vláken, dělí se tkaniny na [13, 14]:

- **Jednosměrné (UD)** – vlákna v osnově jsou fixována tenkými útkovými vlákny. Výsledkem je materiál vykazující vysokou pevnost a tuhost při jednosměrném namáhání.
- **Směsné** – v útku a osnově jsou použita různá vlákna. Příkladem mohou být jednosměrné tkaniny z uhlíkových vláken, ve kterých je použita skleněná příze jako útek. Tato volba je cenově výhodná, neb skleněná příze je cenově výhodnější, než uhlíková.
- **Hybridní** – v těchto tkaninách jsou kombinována různá vlákna. Jejich kombinací je možné získat tkaninu o požadovaných vlastnostech. Například kombinací aramidových, uhlíkových a skelných vláken je dosaženo tuhého, rázově houževnatého a tlaku odolnějšího materiálu.

2.2.3 Sendvičové materiály

Vysoká pevnost kompozitu dovoluje navrhovat konstrukce o tloušťce stěny v řádech desetin milimetru. Z hlediska bezpečnosti konstrukce není kritické porušení lomovou pevností, ale ztrátou stability. Ohybová tuhost dílu se proto zvyšuje pomocí sendvičové konstrukce. Mezi horní a spodní vrstvu tkaniny je vlepena lehká výplň o tloušťce několika milimetrů, které tvoří tzv. jádro kompozitu. [15]

Nejčastěji se pro jádra kompozitů volí různé pěny (Airex, Coremat, Herex (PVC), Rohacell (polymethacrylimid)), polystyreny, ale i voštiny (aramidové, polypropylenové, duralové).



Obr. 11.: Příklad aplikace voštinového jádra. [22]

a – svrchní uhlíková tkanina, b – epoxidová pryskyřice, c – duralové voštinové jádro.

2.2.4 Matrice

Jak už bylo řečeno, matrice tvoří spojitou fázi kompozitu. Jejími hlavními úkoly jsou přenos namáhání na vlákna, přenos namáhání z vlákna na vlákno, zajištění geometrické polohy vláken a tvarové stálosti výrobku a v neposlední řadě ochrana vláken před vlivy z okolí. [12, 14]

Pro správnou funkci matrice je velmi důležité její dokonalé spojení s vlákny. Pro lepší fyzikální, případně i chemickou vazbu na rozhraní matrice – vlákno, se nanáší na vlákna různé apretace. Matrice musí mít vhodnou viskozitu a povrchové napětí pro smočení vlákna. [14]

Dle použitého materiálu je možné rozlišovat matrice:

- Polymerní
- Kovové
- Keramické, sklokeramické, skleněné
- Uhlíkové

Polymery jsou bezesporu nejpožívanějšími materiály matric v současných kompozitech.

Dělí se na: [14]

- **Reaktoplasty** – epoxidové, polyesterové, vinylesterové, fenolické

Po vytvrzení utvoří reaktoplasty zesíťovanou strukturu, která se netaví ani při vysoké teplotě.

- **Termoplasty** – polyimidové (PI), polyéteréterketonové (PEEK), polysulfonové (PSU), polyfenylsulfidové³ (PPS)

Termoplasty jsou založeny na polymerních řetězcích, které jsou u sebe drženy pouze mezimolekulárními interakcemi. Výsledkem je, že interakce za vysokých teplot slábnou a polymery měknou. Při dalším zvyšování teploty termoplasty tečou, naopak při ochlazování opět tvrdnou. Tento proces může nastávat opakovaně.

Epoxidy a polyestery byly hlavními polymerními materiály pro matrice po několik dekád, ale moderní termoplastické materiály jako PEEK a PPS se nyní dostávají do popředí pro jejich vlastnosti – houževnatost, nízká absorpce vlhkosti a relativně jednoduchý cyklus zpracování. Epoxidy s třídou použití pro letectví jsou typicky vytvrzovány při teplotě okolo 177°C, a nepoužívají se obecně nad teplotami přesahující 150°C. Naproti tomu termoplasty jako PPS, PI, a PEEK mají teploty tání v rozsahu 315 – 370°C. To rozšiřuje možnosti aplikací těchto materiálů. V současné době je možné použití polymerních matric až do teplot okolo 425°C. Pro teploty přesahující tuto hranici, je zapotřebí použití jiných druhů matric. [12]

Použitím lehkých **kovů** - hliník, titan, hořčík a jejich slitiny, a intermetalických sloučenin – TiAl, Ni₃Al, může být operační teplota až 1250°C. Dalšími výhodami kovových matric oproti polymerním je jejich vyšší pevnost, tuhost a tvárnost, na úkor vyšší hustoty. [12]

Keramické matrice – karbid křemíku (SiC), nitrid křemičitý (Si₃N₄), mohou být používány při teplotách do 1650°C. Mají špatnou tahovou pevnost a jsou křehké.

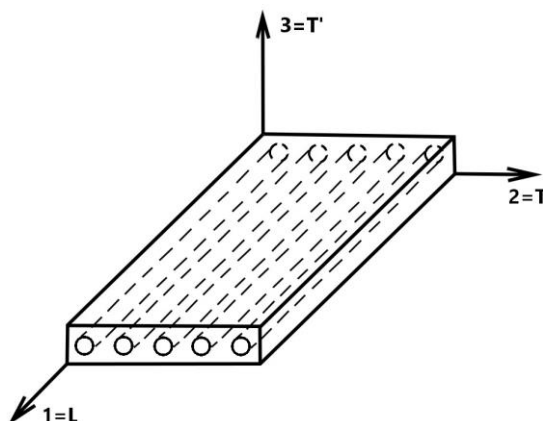
Kompozity vyrobené z uhlíkových vláken a z **uhlíkové matrice** jsou vysoce teplotně odolné. Mohou být používány za teplot dosahujících až 2760°C, ale cena tohoto materiálu je tak vysoká, že své uplatnění nachází pouze v omezené míře například v letectví. [12]

2.2.5 Základní vlastnosti kompozitové vrstvy

Pro kompozity je důležitou vlastností orientace materiálových charakteristik. Materiál mající tři navzájem ortogonální roviny symetrie elastických vlastností se nazývá ortogonální anizotropní, neboli ortotropní materiál. Každým bodem ortotropního materiálu procházejí tři vzájemně kolmé hlavní směry anizotropie. U jednosměrně vyztužených kompozitů je to směr

³ Polyfenylsulfid je termoplastický plast s vynikající chemickou odolností.

podélný (longitudinal – ve směru vláken), a dva směry příčné (transversal – kolmé na vlákna). [9]



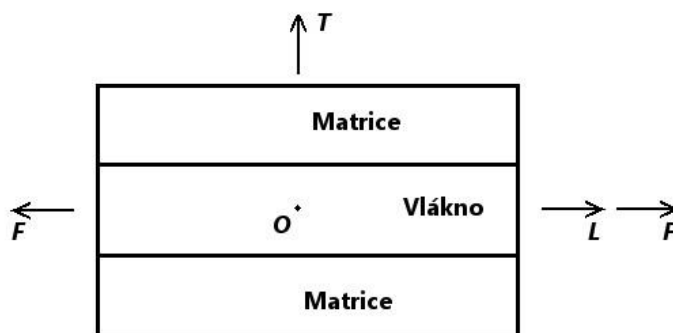
Obr. 12.: Souřadný systém jednosměrného kompozitu. [11]

Tyto směry se nazývají hlavní materiálové a označují se římskými číslicemi 1,2,3 (Obr. 12), jsou ovšem odlišné od hlavních směrů napětí a přetvoření.

Ortotropický materiál má obecně 9 nezávislých materiálových charakteristik. Moduly pružnosti v tahu E_1 , E_2 , E_3 , moduly pružnosti ve smyku G_{12} , G_{23} , G_{13} a Poissonova čísla ν_{12} , ν_{23} , ν_{13} . Uvedené indexy označují směr, popřípadě rovinu popisované materiálové charakteristiky. Dále se při popisu vlastností kompozitu používají indexy m (matrix) značící matrici, f (fiber) pro vlákna a c (composite) pro kompozit. [9]

- **Podélný modul pružnosti E_L** [9, 11, 12]

Při přijetí zjednodušených předpokladů lze pro jednosměrný kompozit sepsat rovnice popisující jeho vlastnosti. V kompozitu v souřadnicovém systému $O(L, T)$, zatíženém silou F v podélném směru L , tvořeného pouze jedním vyztužujícím vláknem a matricí se předpokládá jejich stejné prodloužení (Obr. 13). [11]



Obr. 13.: Kompozit zatížený silou F v podélném směru. (upraveno z [9])

Pak tedy platí

$$\varepsilon_L = \varepsilon_{Lf} = \varepsilon_{Lm} . \quad (1)$$

Napětí v tahu ve vláknech a matici

$$\sigma_{Lf} = E_f \cdot \varepsilon_{Lf} , \quad \sigma_{Lm} = E_m \cdot \varepsilon_{Lm} . \quad (2)$$

Napětí σ_{Lf} a σ_{Lm} působí na průřezích vláken celkové plochy A_f a průřezu matrice plochy A_m .

Tahová síla, složená ze zatěžujících sil F_{Lf} a F_{Lm} je dána vztahem

$$F = F_{Lf} + F_{Lm} = A_f \cdot \sigma_{Lf} + A_m \cdot \sigma_{Lm} . \quad (3)$$

Tahové napětí v kompozitu

$$\sigma_L = \frac{F}{A} = V_f \cdot \sigma_{Lf} + V_m \cdot \sigma_{Lm} = (V_f \cdot E_f + V_m \cdot E_m) \cdot \varepsilon_L . \quad (4)$$

Z rovnice (4) vyplývá, že podélný tahový modul pružnosti je

$$E_L = \frac{\sigma_L}{\varepsilon_L} = V_f \cdot E_f + V_m \cdot E_m = V_f \cdot E_f + (1 - V_f) \cdot E_m . \quad (5)$$

Za předpokladu, že $E_f \gg E_m$ je možné vztah (5) zjednodušit na výraz

$$E_L = V_f \cdot E_f . \quad (6)$$

- **Poissonovo číslo ν_{LT}**

$$\nu_{LT} = -\frac{\varepsilon_T}{\varepsilon_L} = V_f \cdot \nu_f + V_m \cdot \nu_m = V_f \cdot \nu_f + (1 - V_f) \cdot \nu_m , \quad (7)$$

- **Příčný modul pružnosti E_T** [9, 11, 12]

Zatěžující síla F je nyní uvažována ve směru T . Z důvodu stejného průřezu vlákna a matrice v příčném směru platí pro napětí vztah

$$\sigma_T = \sigma_{Tf} = \sigma_{Tm} . \quad (8)$$

Poměrné příčné prodloužení vlákna a matrice

$$\varepsilon_{Tf} = \frac{\sigma_T}{E_f} , \quad \varepsilon_{Tm} = \frac{\sigma_T}{E_m} . \quad (9)$$

Poměrné příčné prodloužení

$$\varepsilon_T = V_f \cdot \varepsilon_{Tf} + V_m \cdot \varepsilon_{Tm} = \left(\frac{V_f}{E_f} + \frac{V_m}{E_m} \right) \cdot \sigma_T . \quad (10)$$

Příčný modul pružnosti E_T kompozitu je definován

$$E_T = \frac{\sigma_T}{\varepsilon_T} = \frac{E_m}{V_m + V_f \cdot \frac{E_m}{E_f}} = \frac{E_m}{1 - V_f \cdot \left(1 - \frac{E_m}{E_f} \right)} . \quad (11)$$

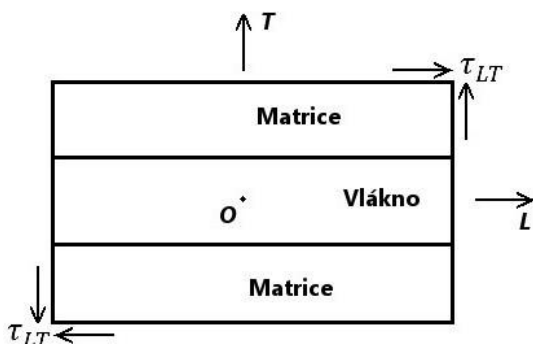
Jestliže $E_f \gg E_m$, pak

$$E_T = \frac{E_m}{1 - V_f} . \quad (12)$$

- **Smykový modul pružnosti G_{LT}** [9, 11, 12]

Je uvažován kompozit zatížený smykovým napětím τ_{LT} (Obr. 14). Vlivem zatížení dojde k deformaci. Předpokladem jsou stejná smyková napětí ve vlákne a matici.

$$\tau_{LT} = \tau_{LTm} = \tau_{LTf} . \quad (13)$$



Obr. 14.: Kompozit podrobený smykovému napětí τ_{LT}

Úhel natočení kompozitu je

$$\varepsilon_{LT} = \frac{u}{h} = \left(\frac{V_f}{G_f} + \frac{V_m}{G_m} \right) \cdot \sigma_{LT} , \quad (14)$$

kde u je posunutí kompozitu v horní ploše ve směru L , h je příčný rozměr ve směru T .

Smykový modul má tvar

$$G_{LT} = \frac{G_m}{V_m + V_f \cdot \frac{G_m}{G_f}} = \frac{G_m}{1 - V_f \cdot \left(1 - \frac{G_m}{G_f} \right)} . \quad (15)$$

Jestliže $G_f \gg G_m$, pak

$$G_{LT} = \frac{G_m}{1 - V_f} . \quad (16)$$

Smykové moduly vlákna a matrice je možné přibližně vyšetřit na základě znalosti modulu pružnosti v tahu a Poissonova čísla jako u izotropních materiálů. Platí

$$G_f = \frac{E_f}{2 \cdot (1 + \nu_f)} , \quad G_m = \frac{E_m}{2 \cdot (1 + \nu_m)} . \quad (17)$$

- **Podélná pevnost** [9, 11, 12]

Obecně se při deformaci kompozitů rozlišují čtyři různá stádia:

1. Vlákna i matrice se deformují elasticky.
2. Vlákna se stále deformují elasticky, matrice se deformuje plasticky.
3. Jak vlákna, tak i matrice se deformují plasticky
4. Dochází k přetržení vláken a lomu kompozitu.

Porušení kompozitu s nekonečnými vlákny nastává, dosáhne-li prodloužení vláken hodnot kritické deformace. Výsledná pevnost v tahu je potom určena směšovacími pravidly

$$\sigma_{pL} = \sigma_{pf} \cdot V_f + (\sigma_m)_{\varepsilon_{fkrit}} \cdot (1 - V_f), \quad (18)$$

kde σ_{pf} je pevnost vláken a $(\sigma_m)_{\varepsilon_{fkrit}}$ je napětí v matrici odpovídající kritické deformaci vláken.

- **Příčná pevnost** [9, 11]

Kritickou deformaci při lomu je možné aproximovat Nielsenovým vztahem

$$\varepsilon_{T krit} = \varepsilon_{m krit} \cdot \left(1 - V_f^{1/3}\right), \quad (19)$$

kde $\varepsilon_{T krit}$ je poměrné prodloužení kompozitu kolmo na vlákna, $\varepsilon_{m krit}$ je poměrná kritická deformace matrice a V_f je objemový podíl vláken v kompozitu. Má-li matrice a kompozit lineární závislost mezi napětím a deformací, pak je možné vztah (19) upravit do tvaru

$$\sigma_{pT} = \sigma_{pm} \cdot \frac{E_T}{E_m} \cdot \left(1 - V_f^{1/3}\right). \quad (20)$$

2.2.6 Způsoby porušování kompozitů

U kompozitních materiálů dochází obvykle nejprve k vnitřnímu porušení, bez projevu pozorovatelných makroskopických změn ve vzhledu, či chování. Vnitřní porušení materiálu lze pozorovat ve formě přetržení vláken, vzniku mikrotrhlin v matrici, oddělení vláken od matrice, oddělování vrstev v laminovaných kompozitech (delaminace). [11]

- **Podélné tahové zatížení**

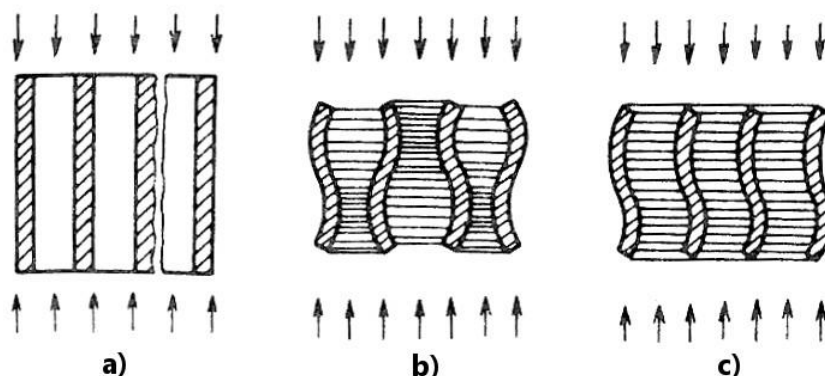
Při podélném tahovém zatížení jednosměrného kompozitu se porušení iniciuje přetržením vláken v jejich nejslabších příčných průřezích. Se zvyšujícím se zatížením vzrůstá počet přetržených vláken. Porušení vláken nemusí znamenat ztrátu únosnosti, neboť zatížení je stále přenášeno matricí na ostatní vlákna. [11]

- **Podélné tlakové zatížení**

Způsoby porušování kompozitní struktury podrobené podélnému tlakovému zatížení lze rozdělit do tří skupin [11]:

1. příčné tahové porušování
2. mikroprohnutí vláken
 - a) s elastickou matricí
 - b) s předchozím kluzem matrice
 - c) s předchozím oddělováním složek

3. smykové porušování



Obr. 15.: Způsoby porušení jednosměrných kompozitů namáhaných tlakovým napětím. a) příčné tahové porušení, b) mikroprohnutí vláken s extenzní deformací, c) mikroprohnutí vláken se smykovou deformací. [11]

- **Smykové namáhání**

K poruše kompozitu může dojít smykovým porušením matrice, nebo oddělením složek. Rovněž může nastat porušení kombinací obou uvedených způsobů. Porušení je způsobené velkým smykovým namáháním na rozhraní matrice – vlákno. [11]

2.2.7 Mezní stavy kompozitů

Pro ortotropní materiál nelze použít stejné podmínky pevnosti jako pro materiál izotropní. Zatímco u izotropního materiálu rozhodují o porušení tři veličiny napětí, u ortotropního je jich zapotřebí pět (podélná pevnost v tahu a tlaku, příčná pevnost v tahu a tlaku, smyková pevnost). Velikou roli zde má orientace materiálových charakteristik a jednotlivé fáze. [9]

U kompozitních materiálů se nejčastěji uplatňují mezní stavy pevnosti, které definují jeho porušení. V této práci jsou použity tři teorie pevnosti založené na maximální deformaci, maximálním napětí a maximální energii. [9, 11]

- **Kritérium maximálního napětí**

Podle teorie maximálního napětí dojde k porušení materiálu, pokud některá ze složek napětí ($\sigma_L, \sigma_T, \tau_{LT}$) v lamině dosáhne příslušné pevnosti materiálu. Podmínku pevnosti je možno přepsat ve tvaru:

$$\begin{aligned} -F_{Lc} < \sigma_L < F_{Lt} , \\ -F_{Tc} < \sigma_T < F_{Tt} , \\ -F_{LT} < \tau_{LT} < F_{LT} . \end{aligned} \tag{21}$$

Pokud je splněno těchto šest nerovností, nedojde k porušení materiálu. Nevýhodou podmínky maximálního napětí je neexistující vazba mezi normálovými a smykovými pevnostmi. Na rozdíl od jednoosého namáhání je nutné brát při víceosém namáhání tento nedostatek v úvahu. [9, 12]

- **Kritérium maximální deformace**

K porušení materiálu dojde, pokud některá ze složek poměrné deformace ($\varepsilon_L, \varepsilon_T, \gamma_{LT}$) dosáhne příslušné mezní složky poměrné deformace. Podmínku je možné vyjádřit ve tvaru

$$\begin{aligned} -F_{\varepsilon Lc} < \varepsilon_L < F_{\varepsilon Lt} , \\ -F_{\varepsilon Tc} < \varepsilon_T < F_{\varepsilon Tt} , \\ -F_{\varepsilon LT} < \gamma_{LT} < F_{\varepsilon LT} , \end{aligned} \quad (22)$$

kde $F_{\varepsilon Lt}, F_{\varepsilon Lc}$ je mezní tahová, tlaková poměrná deformace v podélném směru,

$F_{\varepsilon Tt}, F_{\varepsilon Tc}$ je mezní tahová, tlaková poměrná deformace v příčném směru,

$F_{\varepsilon LT}$ je mezní hodnota poměrné deformace ve smyku.

- **Kritérium Tsai-Wu**

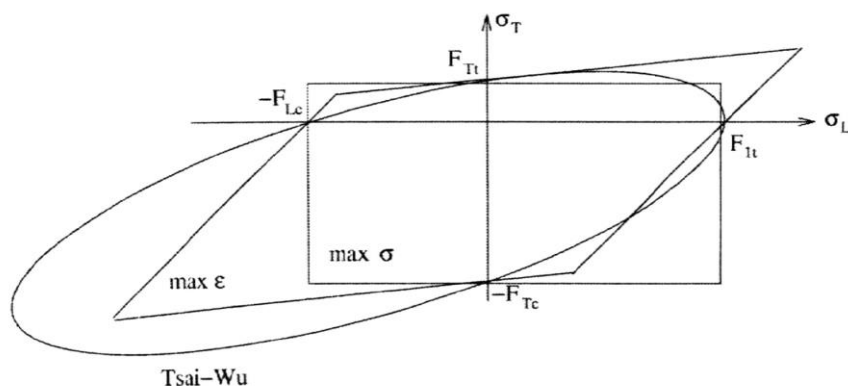
Toto kritérium předpovídá selhání pomocí celkové deformační energie. Rozlišuje mezi pevnostmi v tahu a tlaku. Pevnostní podmínka Tsai-Wu se pro rovinnou napjatost nejčastěji používá ve tvaru

$$\left(\frac{1}{F_{Lt}} - \frac{1}{F_{Lc}}\right) \cdot \sigma_L + \left(\frac{1}{F_{Tt}} - \frac{1}{F_{Tc}}\right) \cdot \sigma_T + \frac{\sigma_L^2}{F_{Lt} \cdot F_{Lc}} + \frac{\sigma_T^2}{F_{Tt} \cdot F_{Tc}} + \frac{\sigma_{LT}^2}{F_{LT}^2} + 2 \cdot f_{12}^* \cdot \frac{\sigma_L \cdot \sigma_T}{F_{Lt} \cdot F_{Lc}} = 1 \quad (23)$$

kde f_{12}^* je vazební koeficient, který může být vyjádřen následovně

$$f_{12}^* = \frac{1}{2 \cdot \sigma^2} \cdot \left\{ 1 - \left[F_{Lc} - F_{Lt} + \frac{F_{Lt} \cdot F_{Lc}}{F_{Tt} \cdot F_{Tc}} \cdot (F_{Tc} - F_{Tt}) \right] \cdot \sigma + \left(1 + \frac{F_{Lt} \cdot F_{Lc}}{F_{Tt} \cdot F_{Tc}} \right) \cdot \sigma^2 \right\}, \quad (24)$$

kde σ je napětí, při kterém dojde k porušení při dvouosém testu. Velmi často se koeficient f_{12}^* považuje za empirický, získaný jako funkce experimentálních výsledků. [9, 12]



Obr. 16.: Křivky pevnosti pro různá kritéria [9]

Z *Obr. 16* jsou patrné rozdíly pro výše uvedená kritéria pevnosti. Liší se dle konzervativnosti daného kritéria v určité oblasti.

KAPITOLA 3

Konstrukční úloha

3.1 Přední otočné kolečko

Sestava ambulantního transportního nosítka Clinic EXTERO N114-P113 (*Obr. 17*) a jeho podvozkové části je velice flexibilní a je možné upravit její nastavení nejen dle potřeb přepravované osoby, ale také dle obsluhy. Polohovatelná lůžková část nosítka, vybavená anatomickou matrací, slouží pro komfortní přepravu postižených osob a zároveň umožňuje umístění pacienta dle jeho potřeb. Pro bezpečnou přepravu je nosítko vybaveno pásy a bočními sklopnými madly.

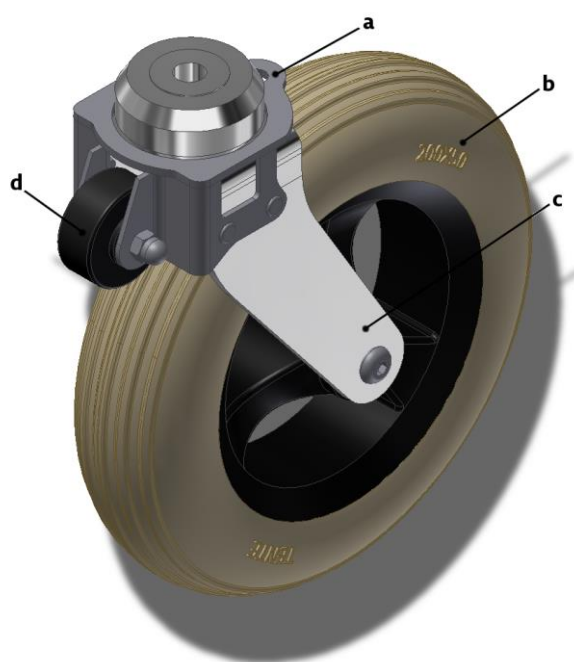


Obr. 17.: Nosítko Clinic EXTERO N114-P113

Podvozková část je vybavena ergonomickým ovládáním, které je uzpůsobeno pro jednočlennou obsluhu. Velká kola ($\varnothing 200$ mm) zajišťují nadstandardní manipulační možnosti i v obtížném terénu. Zadní jsou osazena brzdou, která zabraňuje pohybu nosítka, přední jsou

vybavena aretací směru a přídavným kolečkem. Aretace slouží k uzamčení kola v podélném směru a umožňuje tak jednočlennou obsluhu. V případě absence této funkce by manipulovatelnost s podvozkem byla velice obtížná.

V současnosti je aretace vidlice řešena čepem, který zajíždí do drážky na vrchní části vidlice (*Obr. 18*). Ovládání je realizováno brzdovou pákou. V případě potřeby obsluhy nosítka je tedy možné přední vidlici odemknout a využít tak výhod 4 otočných kol. Naopak pokud je zapotřebí uzamčení předních kol, obsluha jednoduše povolí ovládací páku a čep přitlačovaný pružinou zapadne do drážky a tím je vidlice zaaretována.

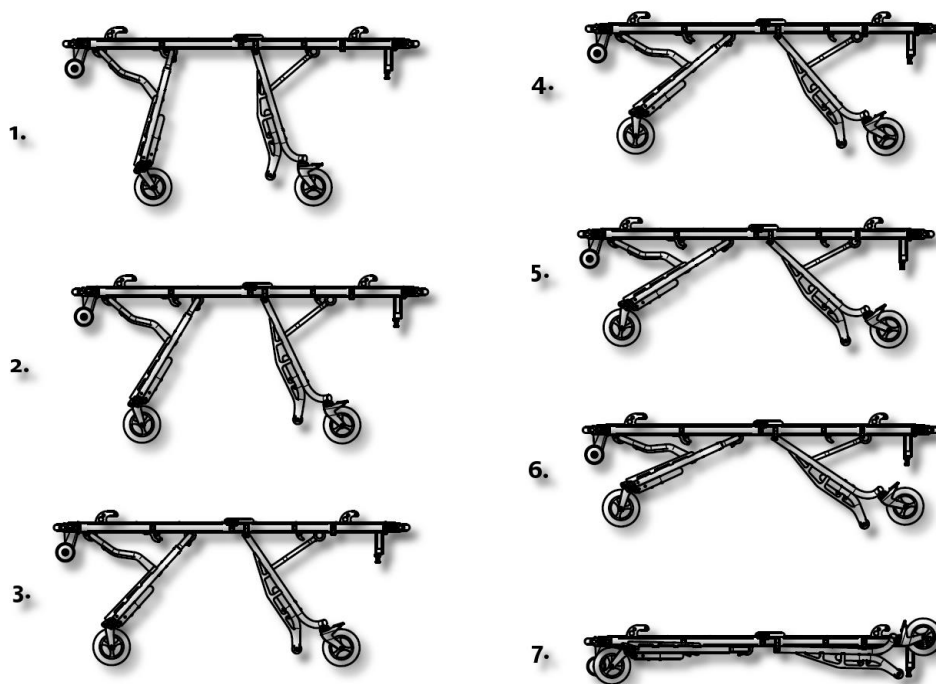


Obr. 18.: Přední otočné kolo (a – konstrukce s drážkou pro aretaci vidlice, b – kolo, c – vidlice, d – přídavné kolečko)

Přídavná kolečka pak slouží při nájezdu do prostoru sanitního vozu, kdy při sklopení předních nohou zabezpečují hladký vjezd. Jejich umístění je řešeno přes dodatečnou konstrukci, která je k vidlici přinýtována.

3.2 Analýza stávajícího stavu

Analýzou kinematických možností nosítka bylo stanoveno 7 základních poloh, do kterých může být podvozková část nastavena. Tyto polohy jsou vyobrazeny na *Obr. 19*.

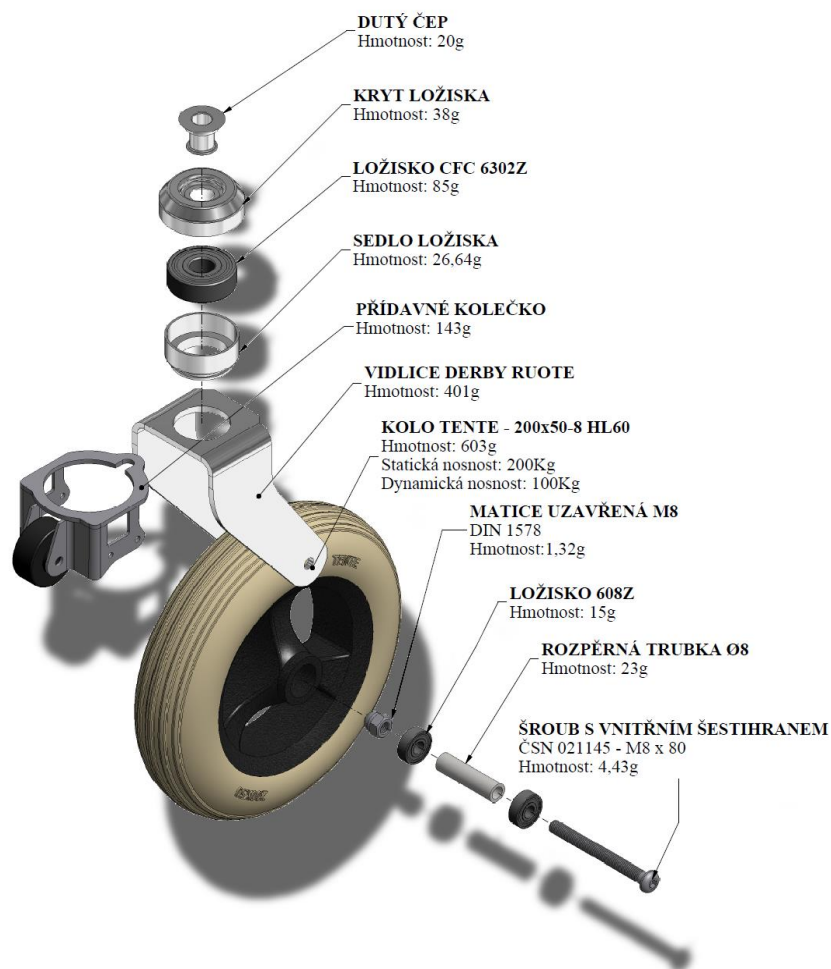


Obr. 19.: Jednotlivé polohy podvozku

Většina směrově otočných vidlic pro pojezdová kolečka je určena převážně pro zatížení v jedné poloze. Jak je ale patrné z *Obr. 19*, přední vidlice podvozku nosítka (na obrázku se jedná o kolo na levé straně) je namáhána v šesti různých polohách. Poloha č. 1. je přepravní a umožňuje její bezproblémové otáčení. Se snižující se výškou podvozku klesá schopnost jejího otáčení. Poloha č. 7. je určena pro naložení postižené osoby, nikoliv však pro pojezd.

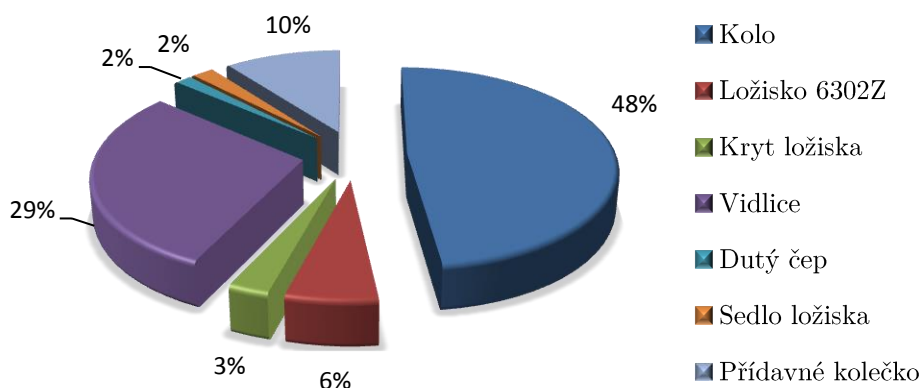
3.2.1 Hmotnostní analýza

Pro zmapování stávajícího řešení a pochopení funkce byl vytvořen 3D model sestavy předního kola, ke kterému bylo přiřazeno hmotnostní zastoupení jednotlivých komponent (*Obr. 20*).



Obr. 20.: Hmotnostní analýza současného stavu

Hmotnostního zastoupení komponent zobrazuje diagram (*Obr. 21*), ze kterého je patrné, že nejvyšší podíl na váze sestavy má kolo (pneumatika, disk, hřídel, ložiska), vidlice, přídatné kolečko a hlavní ložisko. Redukcí hmotnosti vidlice kola se tedy významně ovlivní hmotnost celé sestavy.



Obr. 21.: Procentuální podíl jednotlivých komponent na celkové hmotnosti sestavy kolečka

3.2.2 MKP analýza současného stavu

Z důvodů odstranění mezních stavů při navrhování konstrukce nové vidlice byla provedena analýza současného řešení. Výpočet, s cílem nalézt místa s vyšším napětím, byl proveden pomocí MKP software ANSYS 15.0.

V případě numerického řešení napjatosti je nutno provést značná zjednodušení z hlediska geometrie a okrajových podmínek. Ovšem musí být kladen důraz na co možná největší přiblížení výpočtového modelu ke skutečné součásti.

- **Geometrie a její import**

Pro výpočetní potřeby byla vytvořena jednoduchá sestava vidlice, sedla pro ložisko a ložiska. Zjednodušení modelu v tomto případě zahrnovalo odstranění přebytečných zaoblení a radiální kuličkové ložisko bylo modelováno jako monolitická součást. Jelikož se jedná o symetrickou součást, byla vytvořena pouze polovina sestavy. Tímto byl model připraven s ohledem na pozdější tvorbu sítě.

Parametrické modelovací programy podporují mnoho standardizovaných formátů pro převod objemové geometrie do jiného 3D prostředí. K převodu geometrie do programu ANSYS byl zvolen výchozí formát sestav pro Autodesk Inventor, tedy *iam*. Tím bylo zajištěno stálé provázání geometrie v obou programech a umožněno provádět dodatečné úpravy v 3D modeláři.

Po převodu geometrie byl jednotlivým dílům automaticky přiřazen výchozí materiál konstrukční ocel (*Tabulka 2*) a kontaktní plochy.

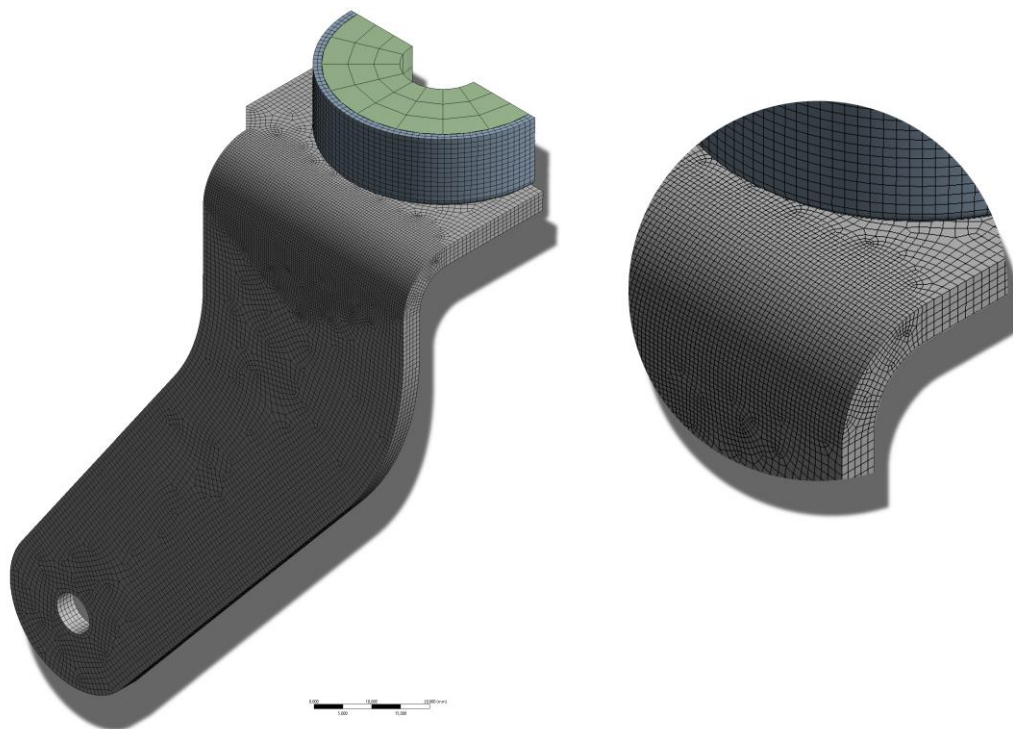
Tabulka 2.: Materiálové charakteristiky

Materiál	Re [MPa]	Rm [MPa]	E [MPa]	ν [-]	ρ [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]
Konstrukční ocel	250	460	200 000	0,3	7 850

Všem automaticky vygenerovaným kontaktním plochám je v programu ANSYS Workbench přiřazen typ kontaktu, zaručující pevné spojení součástí (Bonded). Jelikož nejlépe vystihuje reálnou vazbu mezi jednotlivými díly, byl proto ponechán.

- ***Vytvoření sítě konečných prvků***

Počet, velikost a druh elementů významně ovlivňují přesnost výsledků. Se snižující se velikostí elementů rostou výpočetní časy. Z tohoto důvodu byl nejprve proveden výpočet s poměrně hrubou sítí (4 mm). Po následném zhodnocení výsledků byla vytipována místa s vyšší koncentrací napětí a v nich byla síť zjemněna (0,5 mm). Postupnými úpravami byla vygenerována síť do konečné podoby (*Obr. 22*).



Obr. 22.: Síť konečných prvků na modelu vidlice

Pro tvorbu sítě byly použity prvky typu *Hexa* a *Hexa dominant*. Množství použitých elementů a jejich velikost je uvedena v *Tabulka 3*.

Tabulka 3.: Vlastnosti sítě

	Velikost prvku [mm]	Počet elementů	Počet uzlů
Vidlice	0,5 – 1,5	54 006	250 351
Sedlo ložiska	1,5	3 416	19 320
Ložisko	5	72	488
Celkem		57 494	270 159

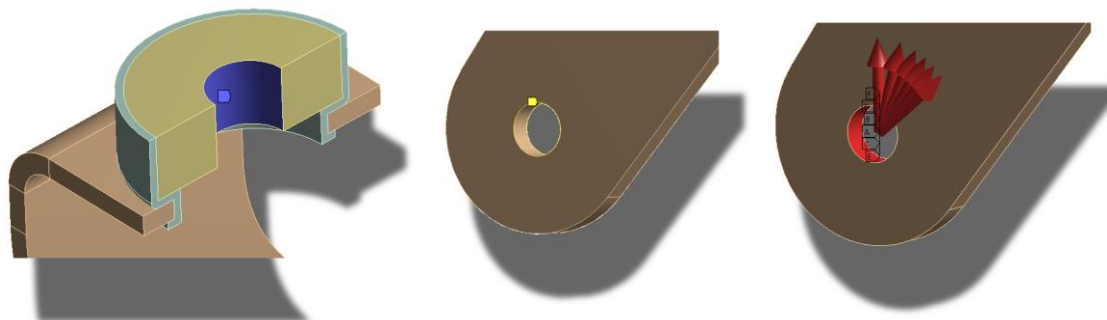
- **Okrajové podmínky**

Sestavu bylo nutné uložit a zatížit tak, aby co nejvíce odpovídala skutečnosti. Výpočet byl proveden celkem pro šest poloh, které byly předem stanoveny z kinematických možností nosítka. Pro všechny polohy probíhala definice uložení a uchycení stejně, lišily se pouze směrem vektoru zatěžující síly.

Na reálné součásti je vidlice uchycena pomocí šroubu, který svírá vnitřní kroužek radiálního ložiska. Pro výpočetní potřeby byla tedy aplikována fixní podpora na vnitřní část ložiska.

Pro nahrazení hřídele kola, který je realizován šroubem, a zamezení tak posuvů v ose x , byla na spodní díru aplikována vazba *Displacement*.

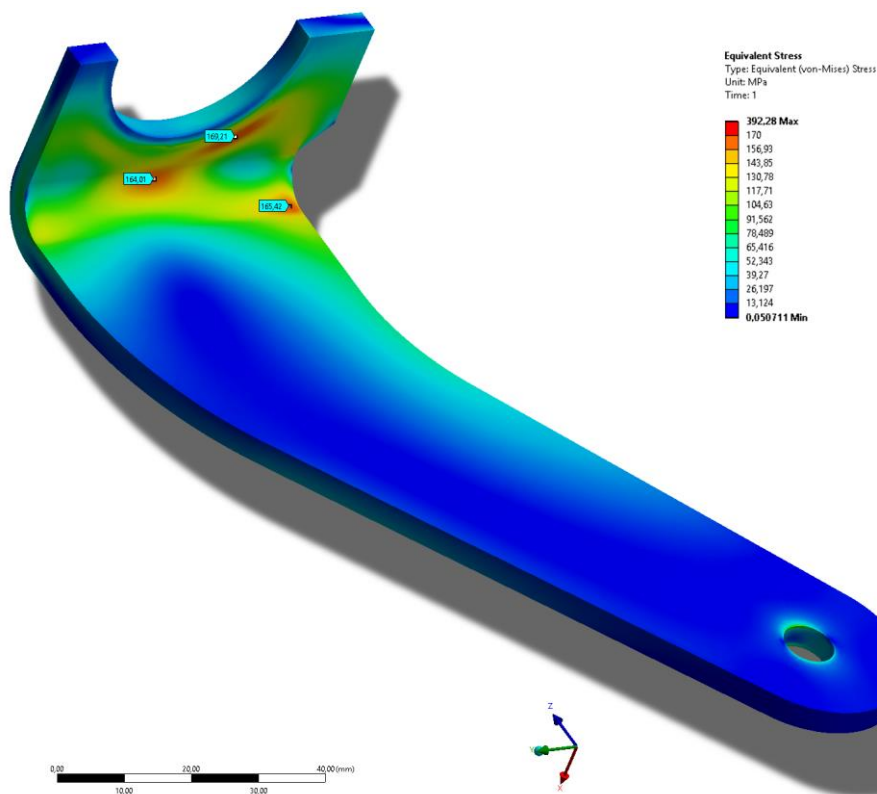
Samotná zátěžná síla byla pak aplikována na vnitřní plochy díry, která je určena pro hřídel kola. V katalogu výrobce je deklarovaná nosnost vidlice na 150 kg, byla tedy aplikována síla o velikosti 735,75 N (byla uvažována polovina sestavy - symetrie). Definice uložení a aplikace síly je patrná z *Obr. 23*.



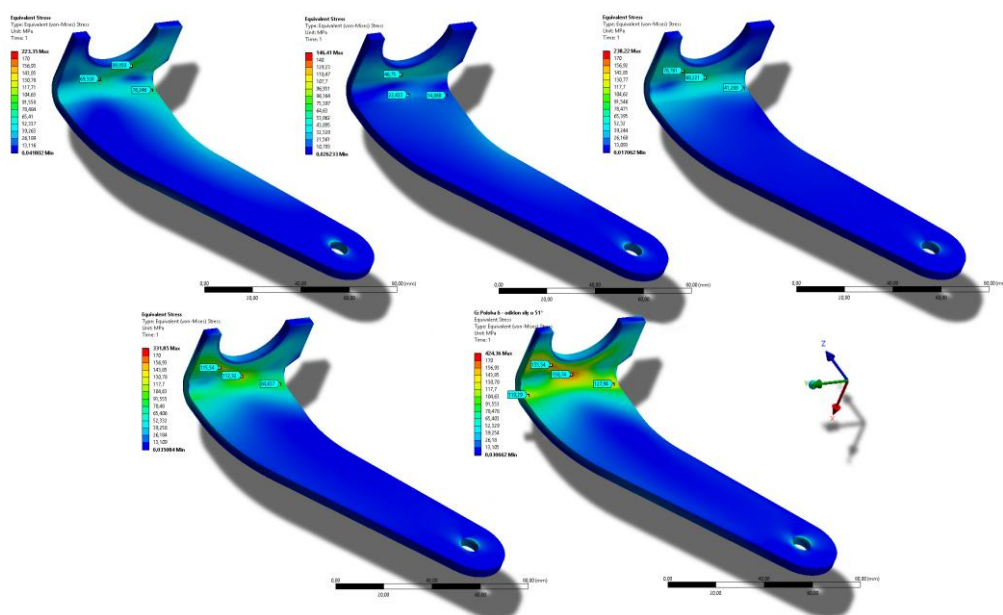
Obr. 23.: Zleva – fixní podpora (modrá), posuv (žlutá), síla v jednotlivých polohách (červená).

- **Prezentace dosažených výsledků**

Redukované napětí bylo stanoveno dle podmínky HMH. Výsledkem analýzy je vyobrazení pole napjatosti při zatížení silou v jednotlivých polohách (*Obr. 25*).



Obr. 24.: Vypočtené redukované napětí – poloha č. 1.



Obr. 25.: Vypočtené redukované napětí – polohy č. 2 – 6.

Místa s nejvyšší napjatostí jsou označena červenou barvou. Celkem byla vybrána tři v každé poloze, vykazující vyšší napětí. Jako nejhorší případ pro namáhání se jeví poloha č. 1, ve které se hodnoty napětí pohybují okolo 170 MPa. Hodnoty pro ostatní polohy jsou v návaznosti na *Obr. 24* a *Obr. 25* uvedeny v *Tabulka 4*.

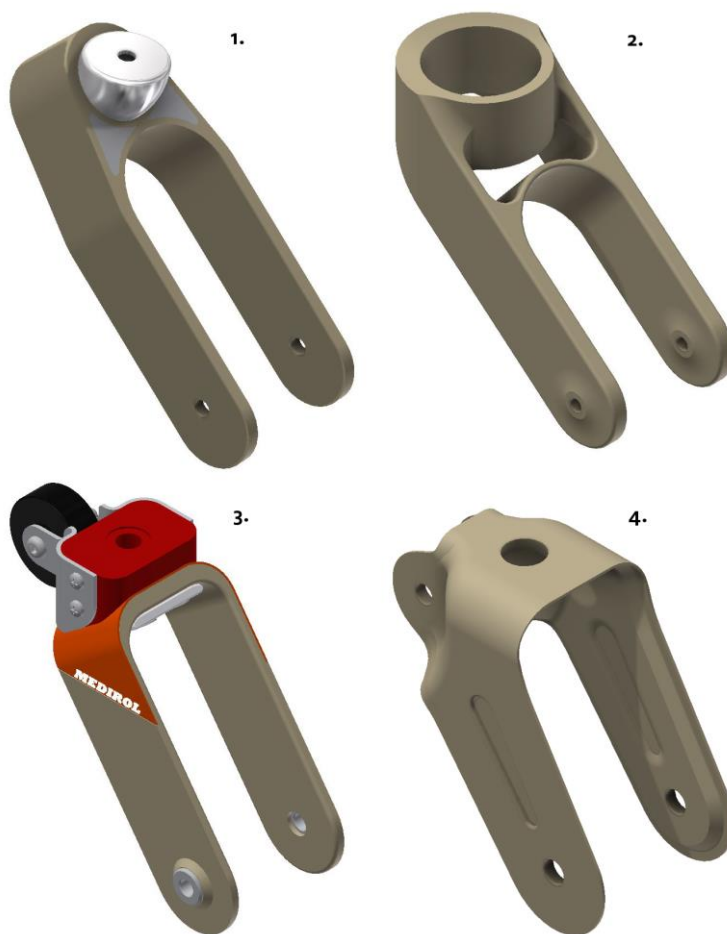
Tabulka 4.: Hodnoty von-Misesova napětí ve vybraných místech.

Poloha/pozice	1. [MPa]	2. [MPa]	3. [MPa]
č.1 [0°]	164	169	165
č.2 [16°]	69	89	76
č.3 [27°]	22	47	14
č.4 [36°]	78	68	41
č.5 [43°]	115	112	85
č.6 [51°]	155	159	128

3.3 Návrh kompozitní konstrukce

Nově navržená vidlice je celokompozitní konstrukce. Při navrhování bylo bráno na zřetel současného stavu a zejména byly respektovány připojovací rozměry. Je tedy zaručena zaměnitelnost nového a starého řešení.

V průběhu práce bylo navrženo několik konstrukčních variant (*Obr. 26*), ze kterých byla následně zvolena jako finální varianta č.4. Jedním z hlavních kritérií výběru byl požadavek na jednoduchost celé konstrukce. Samotná výroba tím bude snadnější a po finanční stránce přijatelnější.

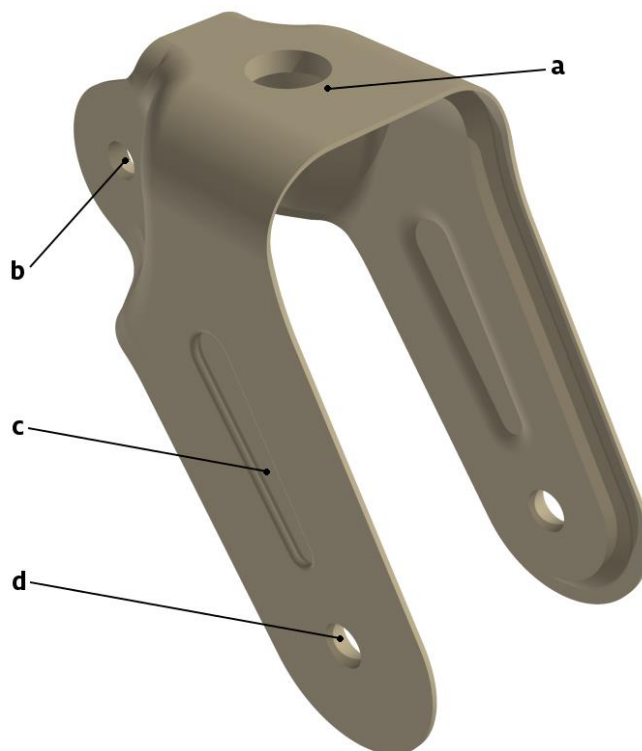


Obr. 26.: Konstrukční varianty nové vidlice

3.3.1 Geometrie

Drtivá většina spojů realizovaných v oblasti kompozitních materiálů je realizována pomocí tzv. insertů (vložek). V navrhované konstrukci tomu není jinak a tento postup je respektován. Oblast označená – **a** – je určena pro umístění insertu, skrze který bude vidlice uchycena k podvozkové části nosítka. V oblasti – **b** – bude umístěno přídatné kolo pro nájezd do prostoru sanitního vozu a v – **d** – pak bude insert pro uložení hřídele kola. Svislé části – **c** – slouží k odlehčení a vyztužení konstrukce.

Následující obrázek (*Obr. 27*) znázorňuje návrh vidlice a její jednotlivé části.



Obr. 27.: Návrh konstrukce. (a – oblast pro uchycení, b – oblast pro přídavné kolečko, c – odlehčení, d – místo po osu kola)

3.3.2 Materiálová skladba

Vidlice čelí nejen tahovým, ale i tlakovým silám. Již od prvopočátku bylo tedy uvažováno, že konstrukce bude sendvičového typu s pěnovým jádrem, které výrazně zvýší její tuhost s minimálním nárůstem hmotnosti. Skladba byla navržena symetricky podle jádra a to dvě vrstvy obousměrné uhlíkové tkaniny a dvě vrstvy jednosměrného uhlíkového vlákna. Stejná skladba následovala ve druhém směru od jádra.

Materiály použité při návrhu byly: Uhlíková obousměrná tkanina 3K KC 200g/m², uhlíková jednosměrná vlákna 250g/m² a sendvičová pěna Airex C70.55 2450 (3mm). Jejich materiálové vlastnosti jsou uvedené v *Tabulka 5*.

Tabulka 5.: Použité materiály a jejich vlastnosti.

Název		Tkanina 3K KC 200g/m ²	Jednosměrná vlákna 250g/m ²	Airex C70.55 2450
materiál	[--]	uhlík	uhlík	polyvinylchlorid
tkadba	[--]	plátno	jednosměrná	-
t	[mm]	0,38	0,3	3
ρ	[kg/m ³]	1 760	1 800	60
E1	[MPa]	61 340	121 000	70
E2	[MPa]	61 340	8 600	
E3	[MPa]	8 900	8 600	
G12	[MPa]	3 500	4 700	-
G23	[MPa]	2 700	3 100	
G13	[MPa]	2 700	4 700	
v12	[--]	0,05	0,27	0,3
v23	[--]	0,30	0,40	
v13	[--]	0,30	0,27	
vf	[--]	0,38	0,38	-
σ1t	[MPa]	805	1 231	1,5
σ1c	[MPa]	509	1 082	1,5
σ2t	[MPa]	805	39	1,5
σ2c	[MPa]	509	130	1,5
σ3t	[MPa]	50	39	0,95
σ3c	[MPa]	170	130	0,95
τ12	[MPa]	125	60	0,93
τ23	[MPa]	65	32	0,93
τ13	[MPa]	65	60	0,93

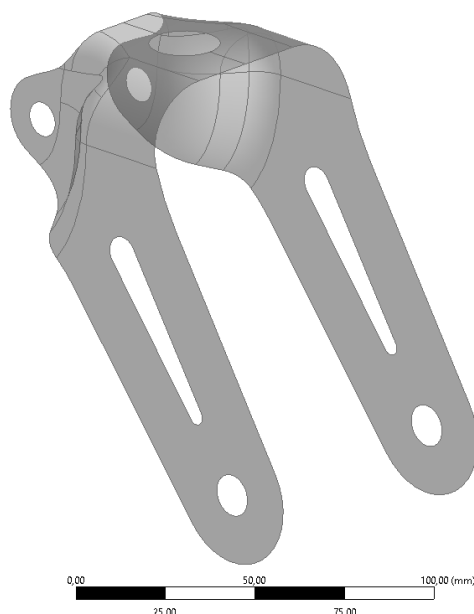
3.4 Napěťová analýza finálního řešení

Vybraná konstrukční varianta byla podrobena napěťové analýze v konečně prvkovém výpočetním programu ANSYS. Cílem bylo zjistit, zda konstrukce vidlice vydrží požadovanou zátěž 150kg a nedojde při ní k jejímu poškození. Jelikož je systém zadávání dat do výpočetního programu velmi shodný s popsaným postupem v kapitole (3.2.2), bude v následujícím textu uveden popis zkrácený.

3.4.1 geometrie

Samotná konstrukce představuje sestavu šesti komponent – vlastní vidlice, dva inserty pro uchycení pojezdového kola, dva pro přídavné kolečko a jeden pro uchycení vidlice k podvozku. Jelikož se z materiálového pohledu jedná o zcela odlišné druhy materiálů (ortotropní kompozit a izotropní inserty), bylo nutné po importu geometrie do prostředí ANSYS Workbench toto hledisko respektovat.

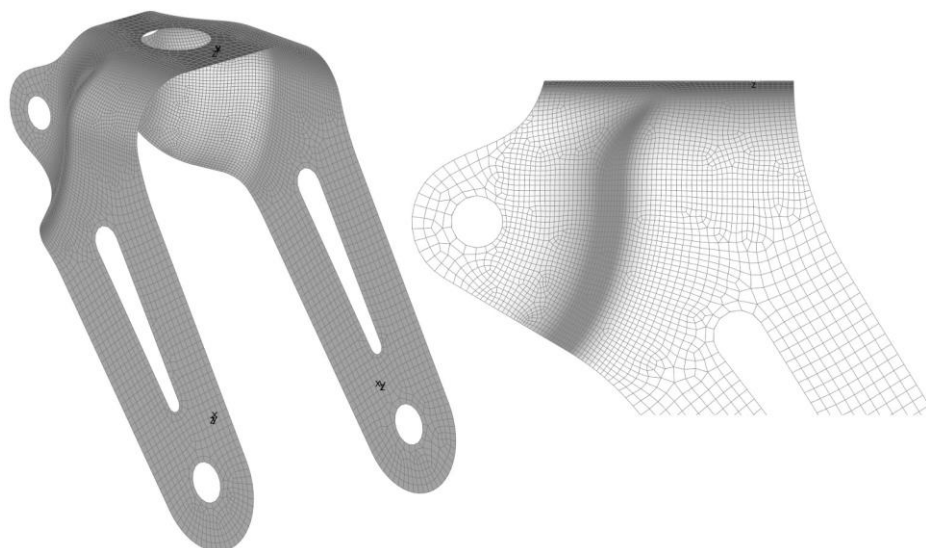
Po zadefinování materiálových charakteristik (*Tabulka 5*), bylo přistoupeno k úpravě geometrie vidlice, konkrétně k odebrání její tloušťky (*Obr. 28*). Byla ponechána pouze vnější plocha, která byla uvažována jako referenční pro definování jednotlivých vrstev.



Obr. 28.: Vidlice převedená na plošnou součást.

3.4.2 Tvorba sítě

Pro tvorbu sítě kompozitu byl zvolen vrstvený prvek typu Shell, pro inserty pak objemový prvek typu Solid. Byla vygenerována automatická síť (hrana prvku 3 mm), která byla na předem vytipovaných místech opět upravena. Z předchozí analýzy bylo zřejmé, že místem s nejvyšším namáháním na vidlici bude zaoblení pod upevňovací částí. V těchto místech byla velikost hrany elementu upravena na 1 mm. Informace o nastavené síti jsou pak uvedeny v *Tabulka 6*.



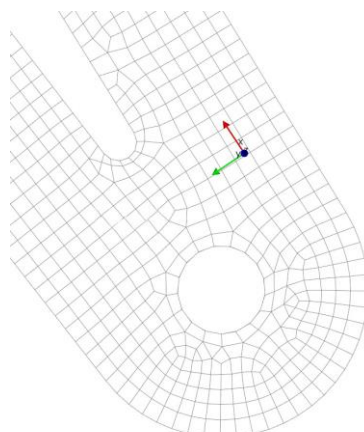
Obr. 29.: Upravená síť vidlice

Tabulka 6.: Počet použitých uzlů a elementů.

	Velikost elementu [mm]	Počet uzlů	Počet elementů
Vidlice	1 – 3	9 455	9 127
Inserty	3,3	17 420	3 651
Celkový počet		26 875	12 778

3.4.3 Definice struktury

V modulu ACP Pre (ANSYS Composite Pre) byla definována skladba jednotlivých vrstev uhlíkové tkaniny, UD vlákna a pěny. Skladba byla symetrická, tedy 2x uhlíková tkanina, 2x jednosměrné vlákno a 1 x pěna, která je rovinou symetrie. Dále byla nastavena orientace vláken a to pod úhlem 0° od lokální souřadnicové osy x , která je v podélném směru hrany vidlice (*Obr. 30*).

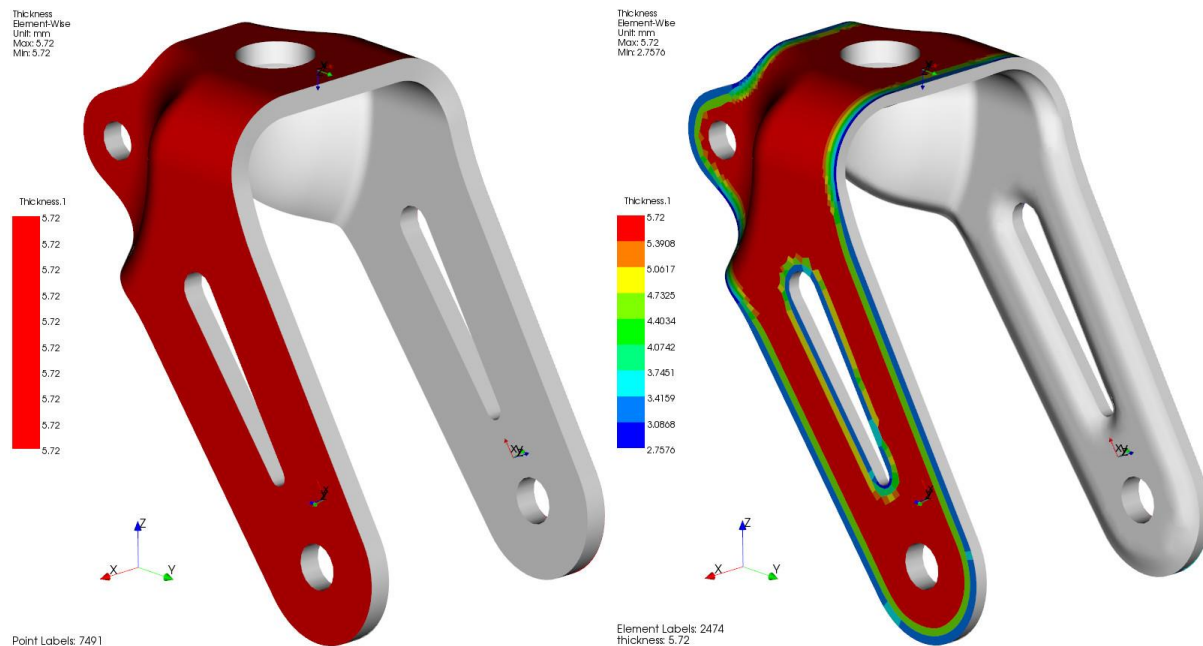


Obr. 30.: Lokální souřadnicový systém. (červená – osa x)

3.4.4 Úprava geometrie

Aby se výpočet pokud možno shodoval co nejvíce s realitou, je nutné geometrii které vznikla poskládáním jednotlivých vrstev upravit.

Vzniklé těleso má v každém místě stejnou tloušťku stěny. U navrhované vidlice bylo uvažováno po celém obvodu spojení jednotlivých uhlíkových tkanin, bez přítomnosti pěnového jádra. Po obvodu pěnového jádra bylo tedy nastaveno zkosení pod úhlem 30° . Rozdíl je dobře patrný z *Obr. 31.* zejména díky grafickému zobrazení tloušťky stěny.



Obr. 31.: Zobrazení tloušťky stěny před úpravou (vlevo) obvodu vidlice a po (vpravo). Zatím co modrá barva značí minimální tloušťku stěny, červená maximální.

3.4.5 Okrajové podmínky

Definice okrajových podmínek proběhla shodným postupem popsáním v kapitole 3.2.2. Nebudou zde proto opět popisovány.

3.4.6 Prezentace a analýza dosažených výsledků

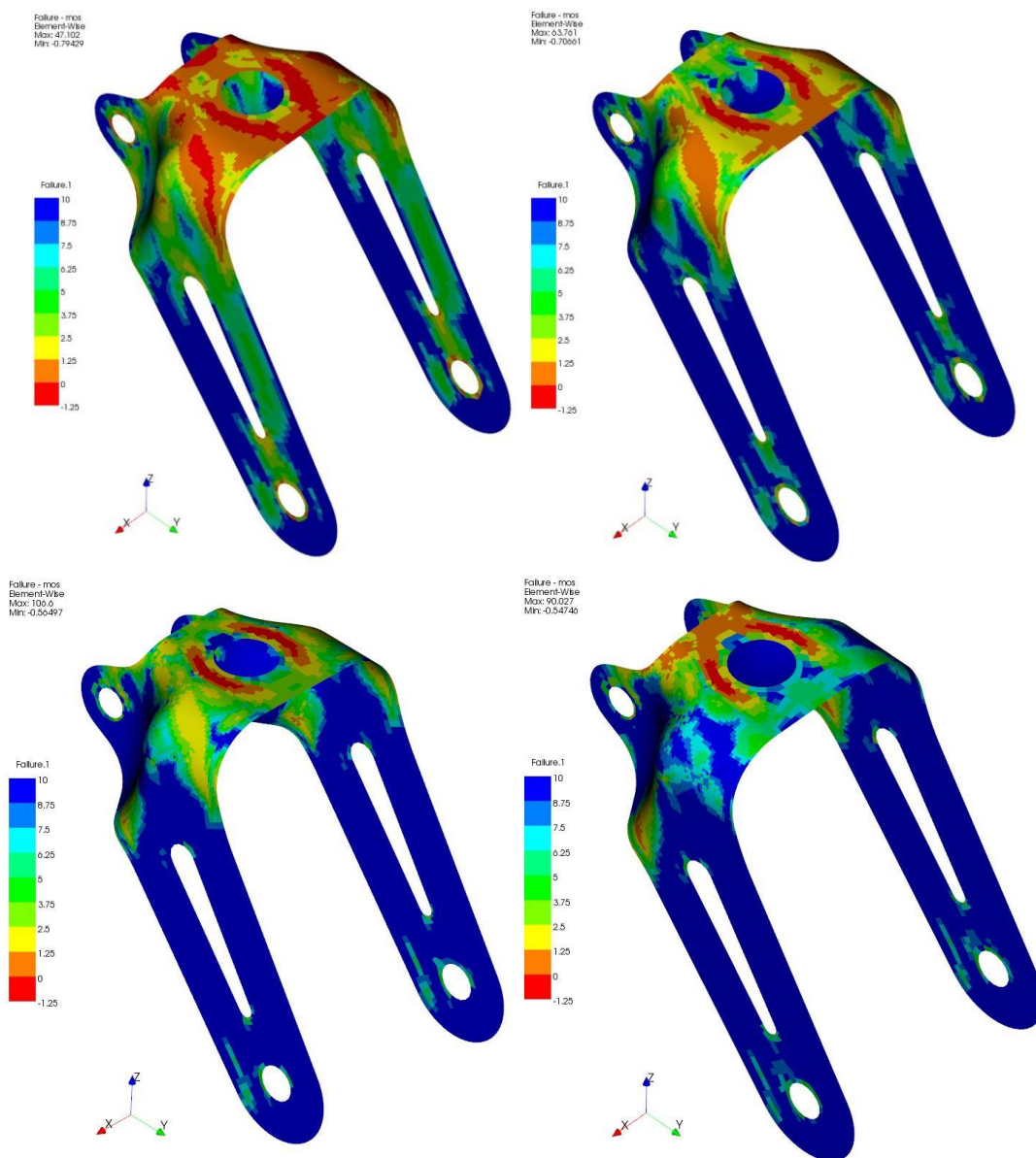
Po zadání všech potřebných parametrů a omezení byl spuštěn v modulu *Mechanical* samotný výpočet. Následná analýza kompozitní struktury poté probíhala v prostředí *ACP Post*. Pro vyhodnocení bylo zvoleno dvou kritérií porušení laminátové vrstvy a to kritérium maximálního napětí a interaktivní kritérium Tsai-Wu.

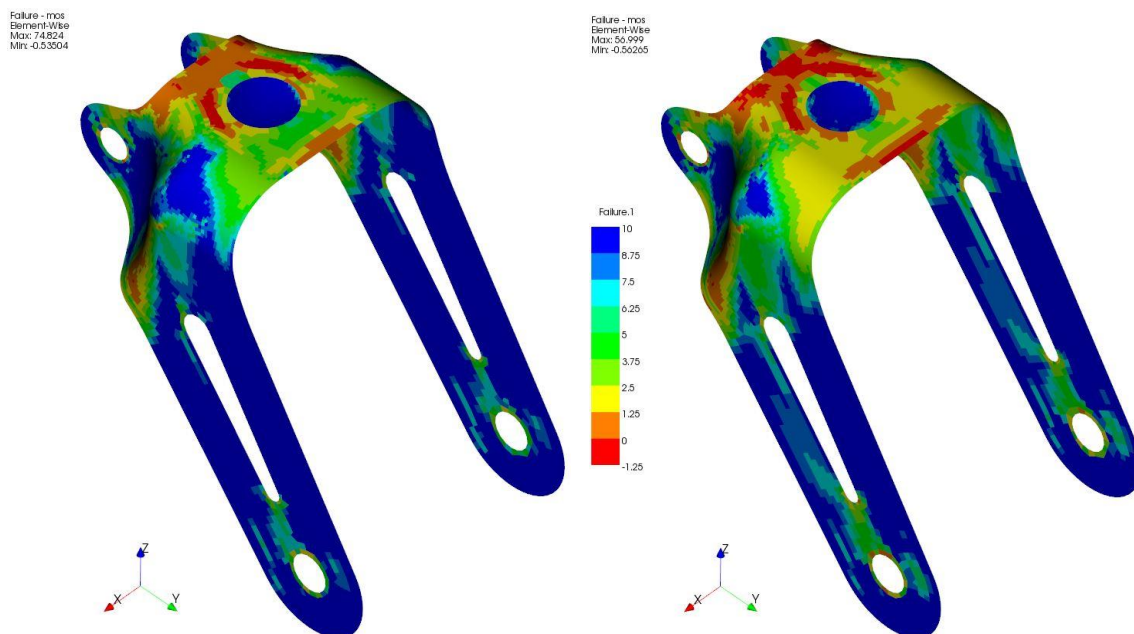
Kritérium maximálního napětí

V modulu *ACP* bylo nastaveno vykreslení nejkritičtější vrstvy, která je barevně rozdělena podle bezpečnosti k maximálnímu napětí. Výchozí hodnota je brána jako 0 a hodnoty větší než nula, jsou z hlediska kritéria maximálního napětí brány jako bezpečné.

Obr. 32 vyobrazuje faktor bezpečnosti podle tohoto kritéria. Hodnoty blížící se k nule, vykreslené červenou barvou, jsou patrné pod dosedací plochou horního insertu. Toto maximum je přičítáno kontaktním tlakům, které vznikly mezi insertem a vrchní vrstvou tkaniny.

V průběhu návrhu bylo považováno za problémové místo zaoblení mezi dosedací plochou ložiska a svislými částmi vidlice. Následný výpočet tento předpoklad potvrzuje, neboť hodnoty koeficientu bezpečnosti se v této oblasti pohybují v záporných číslech. S rostoucím úhlem zatížení se situace zlepšuje a hodnoty se dostávají na stranu bezpečnosti. Nicméně od polohy č. 4 se tento koeficient opět snižuje.



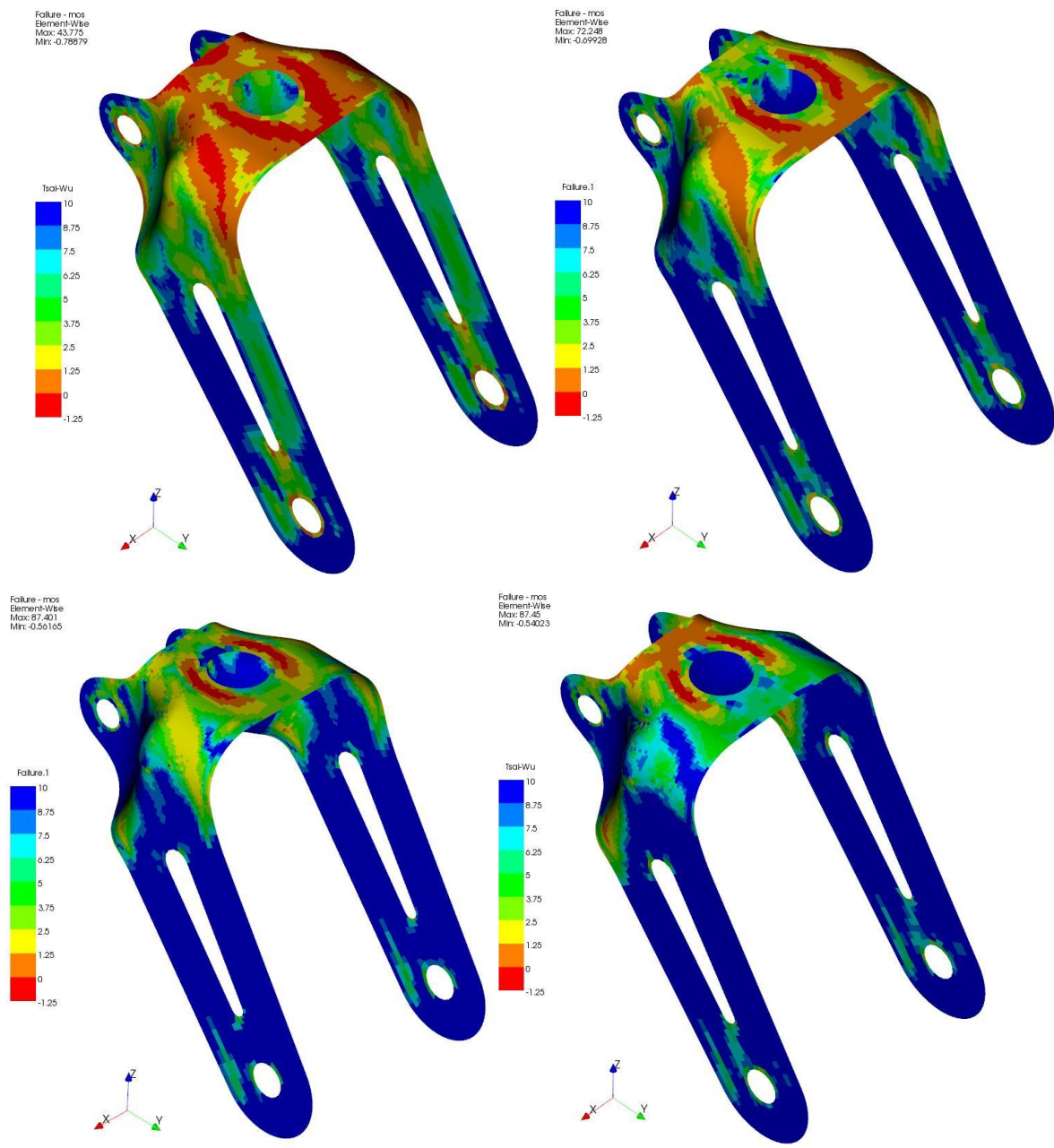


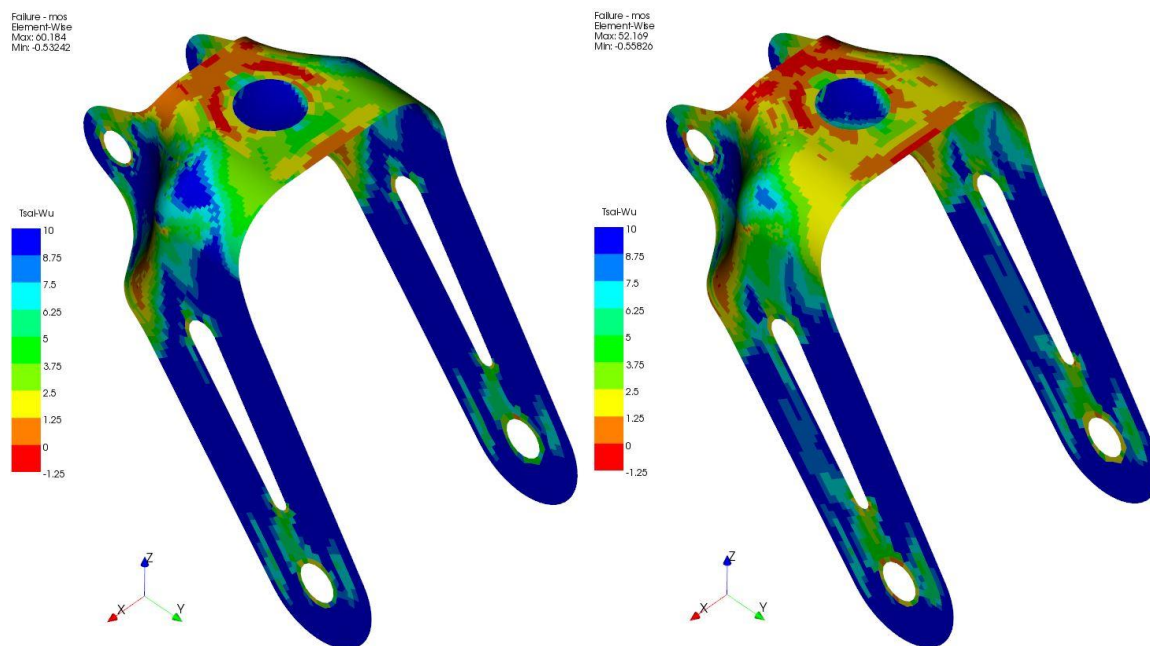
Obr. 32.: Vyobrazení faktoru bezpečnosti pro kritérium maximálního napětí v jednotlivých polohách vidlice

Kritérium Tsai-Wu

ANSYS hodnotu bezpečnosti vypíše jako $\frac{1}{FI} - 1$. Aby byla struktura kompozitu bezpečná, musí být hodnota faktoru bezpečnosti opět větší jak 0.

Na Obr. 33 je vyobrazen faktor bezpečnosti podle kritéria Tsai-Wu. Barevná škála značí jako nejméně bezpečné místo opět dosedací plochu pod horním insertem a zaoblení. Další oblast s nižší bezpečností se nachází v zaoblení po obou stranách této plochy.





Obr. 33.: Zobrazení faktoru bezpečnosti dle teorie Tsai-Wu pro polohy č. 1 až č. 6.

Z grafického výstupu výsledků analýzy jsou patrná místa s nízkým faktorem bezpečnosti a to jak podle kritéria maximálního napětí, tak pro kritérium Tsai-Wu. Tato místa jsou pro obě analýzy shodná a je tedy zřejmé, že navržená konstrukce je materiálově poddimenzována. Pro návrh nové vidlice by bylo vhodné navýšit počet vrstev uhlíkové obousměrné tkaniny.

3.4.7 Návrh upevnění prototypu k podvozku nosítka

Již při prvním návrhu nové vidlice bylo zřejmé, že současný způsob jejího upevnění k podvozkové části nosítka bude nevyhovující. Nejdůležitější součástí upevnění je bezesporu ložisko, které ji umožňuje rotaci kolem svislé osy a tím i změnu dráhy kola požadovaným směrem. V kapitole 3.2.1, zabývající se hmotnostní analýzou pojezdové sestavy, bylo zjištěno, že rotace je realizována radiálním kuličkovým ložiskem.

Při jednoduché úvaze, že rotace je umožněna v poloze nosítka č. 1 a v omezené míře v poloze č. 2, byla stanovena dominantní zátěžnou silou axiální síla.

Z tohoto pohledu vyplynul návrh na změnu radiálního ložiska za axiální. Vzhledem ke snaze snížit hmotnost celkové sestavy kola, bylo uvažováno o axiálním, plastovém kluzném ložisku, jehož hmotnost se pohybuje v řádech gramů.

Návrh probíhal za pomoci on-line kalkulátoru na webových stránkách firmy Igus [23], která se specializuje na výrobky z plastů.

Z důvodu měnícího se úhlu zatěžující síly byly uvažovány dva mezní stavy. První, provozní stav nastává v poloze podvozku č.1. Zde byly stanoveny axiální a radiální zátěžné síly o velikostech

$$F_{a1} = 1\,421,36 \text{ [N]},$$

$$F_{r1} = 380 \text{ [N]}.$$

Pro druhý stav, tedy pro polohu č.6, tyto síly nabývají hodnot

$$F_{a6} = 926 \text{ [N]},$$

$$F_{r6} = 1\,144 \text{ [N]}.$$

Dále byl zvolen typ ložiska a navrženy jeho rozměry. Zpráva o zadaných parametrech a kritériích výběru byla vygenerována na stránkách výrobce a je zahrnuta v přílohách.

Vybrané ložisko je dle značení výrobce typu F, tedy radiální ložisko s přírubou. Dále bylo nutné zvolit ložisko pro zachycení axiální síly, neboli axiální kluznou podložku – typ T.

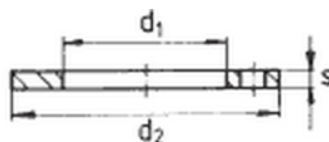
Jelikož webový kalkulátor umožňuje výběr pouze ložisek radiálních (typ S a F), bylo přistoupeno k manuálnímu výběru.

Navržené ložisko má rozměry

$$d_1 = 22 \text{ [mm]},$$

$$d_2 = 38 \text{ [mm]},$$

$$s = 1 \text{ [mm]}.$$



Obr. 34.: Rozměry axiálního ložiska

Bylo nutné určit maximální povrchový tlak, který byl uvažován v poloze č.1

$$p = \frac{F_a}{(d_2^2 - d_1^2) \cdot \frac{\pi}{4}} = \frac{1\,421,36}{(38^2 - 22^2) \cdot \frac{\pi}{4}} = 1,885 \text{ [MPa]}. \quad (25)$$

Pro zvolený typ ložiska J, je maximální dovolený povrchový tlak $p_{max} = 35 \text{ [MPa]}$. Z hlediska dovoleného povrchového tlaku je možné tento typ použít.

Dalšími rozhodujícími faktory bylo teplotní omezení, které je od -50°C do 90°C . V tomto případě je pracovní teplota uvažována v rozmezí hodnot -10°C až 35°C , tedy zvolený typ vyhovuje.

Pro výpočet povrchové rychlosti bylo použito vztahu

$$v = d_1 \cdot \pi \cdot \frac{2 \cdot \beta}{360} \cdot \frac{f}{1000} = 22 \cdot \pi \cdot \frac{2 \cdot 180}{360} \cdot \frac{0,08}{1000} = 0,0055 \text{ [m/s]}, \quad (26)$$

kde β je úhel pohybu během jednoho cyklu ve [°].

Hodnota rychlosti musí být menší než $v = 1,1 \text{ [m/s]}$, která je pro tento typ povolena dle katalogu firmy Hennlich. [24]

Při návrhu nesmí být opomenuta kontrola na oteplení, která je dle výrobce dána vztahem

$$p \cdot v = \left(\frac{K_1 \cdot \mu \cdot \lambda_k \cdot \Delta_T}{\mu \cdot s} + \frac{K_2 \cdot \mu \cdot \lambda_s \cdot \Delta_T}{2 \cdot \mu \cdot b_1} \right) \cdot 10^3 \quad (27)$$

kde K_1, K_2 jsou konstanty pro odvod tepla ($K_1 = 0,5, K_2 = 0,042$)

s je tloušťka stěny pouzdra [mm]

b_1 je délka pouzdra v [mm]

μ je koeficient tření

λ_k je tepelná vodivost pouzdra

λ_s je tepelná vodivost hřídele

Δ_T je rozdíl maximální provozní teploty a teploty okolí

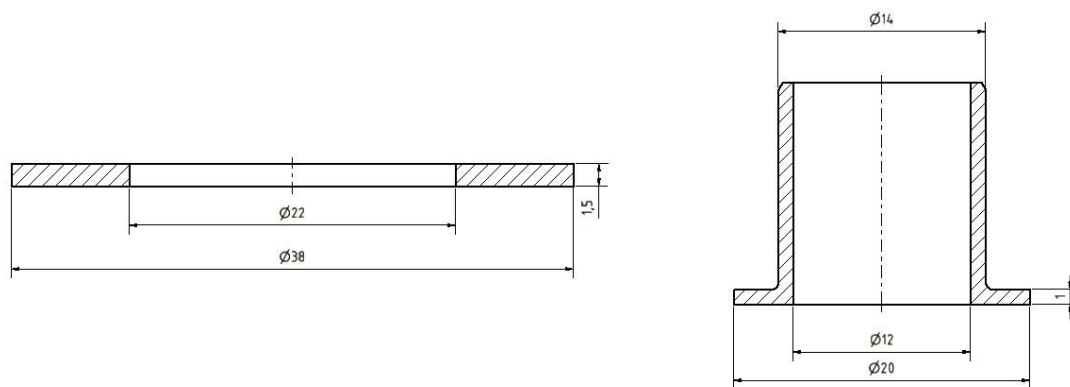
Po dosazení potřebných hodnot z katalogu [24], má výraz (44) tvar

$$p \cdot v = \left(\frac{0,5 \cdot 0,18 \cdot 0,25 \cdot 60}{0,18 \cdot 8} + \frac{0,042 \cdot 0,18 \cdot 46 \cdot 60}{2 \cdot 0,18 \cdot 1,5} \right) \cdot 10^{-3} = \\ = 39,5775 \cdot 10^{-3} \text{ [MPa} \cdot \text{m/s]}. \quad (28)$$

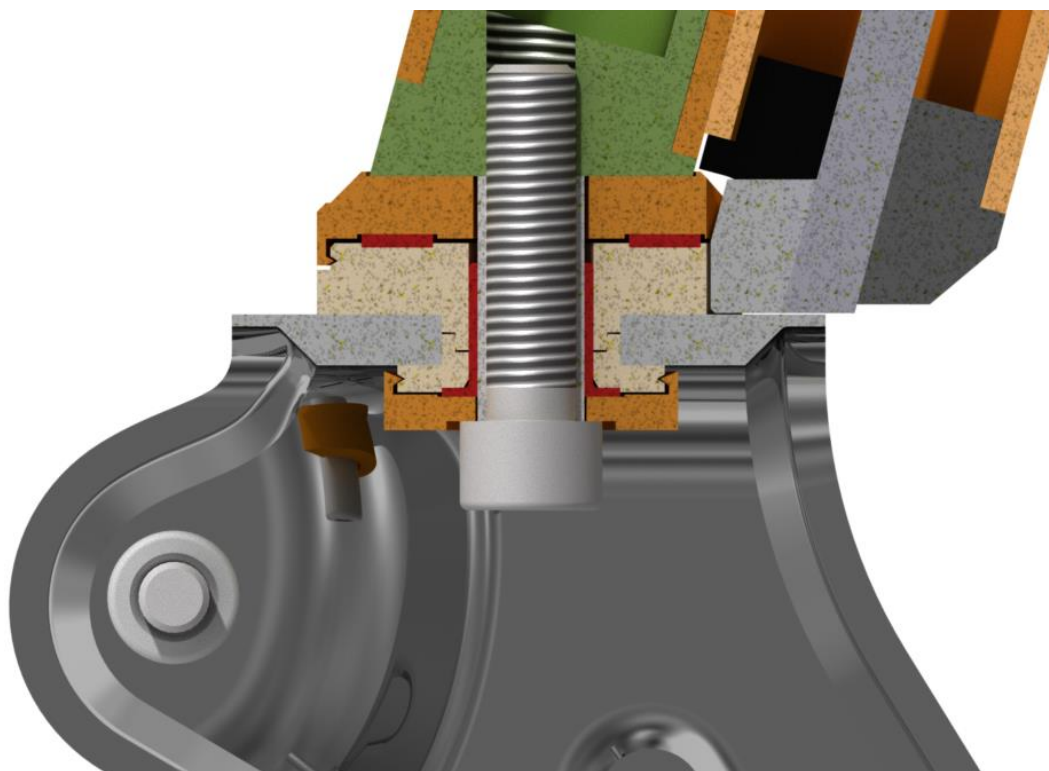
Výraz (28) musí být menší než $p \cdot v = 0,34 \text{ [MPa} \cdot \text{m/s]}$. Tato podmínka je splněna a tento typ ložiska může být použit. Při výpočtu byl uvažován ocelový hřídel a náboj (insert) z hliníkových slitin.

Obě zvolená ložiska budou uložena v insertech, které byly pro tuto aplikaci navrženy. Mechanismus aretace vidlice v přímé poloze bude fungovat na stejném principu, jen je nutné upravit fixační konec západky. Ta bude zamykat vidlici skrze drážku v inzertu.

Ložiska a jejich rozměry jsou vyobrazena na *Obr. 35* a uchycení, včetně aretace vidlice je na *Obr. 36*.



Obr. 35.: Rozměry vybraných ložisek.



Obr. 36.: Uchycení prototypové vidlice k podvozku nosítka. Ložiska (červená), inserty (béžová)

KAPITOLA 4

Praktická část

4.1 Návrh prototypové formy

Na základě geometrie nové kompozitní vidlice byla navržena prototypová forma (*Obr. 37*). Sestava formy je tvořena celkem šesti díly, přičemž dělicí roviny byly umístěny s ohledem na snadné rozebrání po vytvrzení kompozitu.

Vzájemnou polohu jednotlivých dílů formy budou zajišťovat vodící čepy, které budou umístěny do předem připravených děr. Vnější část formy je opatřena výstupky pro její snadnější rozebrání a nepoškození finálního laminátu.



Obr. 37.: Prototypová forma

Forma byla z finančních důvodů následně vyhotovena pomocí technologie 3D tisku z ABS plastu, nicméně pro hromadnou výrobu by byla vhodná forma ocelová (např. třídy 19).

Tiskové možnosti použité 3D tiskárny neumožňovaly dosažení nízké drsnosti povrchu forem. Bylo tedy zapotřebí plochy formy, které udávají tvar konstrukce, zbrousit. K finální úpravě forem se nabízely dvě možnosti:

- Nátěr dvousložkovou pryskyřicí, která zakryje nerovnosti povrchu a po vytvrzení opětovné broušení. Tento postup byl časově velmi náročný, ale bylo dosaženo kvalitního povrchu.
- Nanesení krycí PVC fólie. Efektivní, časově nenáročný postup. Jediné úskalí spočívalo s vytvarováním fólie na zakřivených plochách.



Obr. 38.: Forma potažená PVC fólií (červená – vnitřní plochy, bílá – vnější plochy).

Účelem prototypové formy byla laminace konstrukčního návrhu vidlice a zjištění zda půjde vytvrzený laminát z formy vyjmout, resp. zda jsou dělicí roviny správně umístěny. V případě kladných výsledků může být vyrobena finančně nákladnější, ale neporovnatelně kvalitnější, forma ocelová.

4.2 Laminace prototypu

Před samotnou laminací prototypu bylo zapotřebí připravit nástřihy uhlíkových tkanin a sendvičové pěny. Ty byly zhotoveny pomocí papírových šablon, které značně zjednodušily a urychlily tento proces. Šablona byla obkreslena na tkaninu (resp. pěnu) a nůžkami,

potażmo kolečkovým řezákem byl požadovaný obrys vystřižen. Tímto způsobem byly připraveny nástřihy nejen obousměrné, ale i jednosměrné tkaniny.

Po přípravě nástřihů bylo nutné nanést separační vosk na jednotlivé části formy a sestavit pomocí vodících čepů její vnitřní část. Separacním voskem bylo zamezeno následného spojení pryskyřice s povrchem formy. Poté byla namíchána epoxidová pryskyřice LH210 s tužidlem H10. Hmotnostní poměr míchání byl 100:45 a doba zpracovatelnosti smíchané směsi byla 30 minut.

Na vyhrazeném místě pracovního stolu byla položena a připevněna jedna vrstva strhávací (separační) fólie. V tomto prostoru docházelo k postupnému oboustrannému prosycování připravených nástřihů. Ty byly poté kladeny na vnitřní část formy a tvarovány dle její křivosti. Po umístění poslední vrstvy tkaniny proběhla poslední vizuální kontrola a případné dotvarování tkanin. Na závěr byly na vodící čepy nasazeny zbylé díly formy (*Obr. 39*). Přítlak nutný ke správnému spojení jednotlivých vrstev laminátu byl vyvozen šroubovými svěrkami. Během stahování formy docházelo k vytékání přebytečné pryskyřice. Tu bylo nutné jimat a zamezit tak znečištění okolního prostředí.

Vytvrzení laminátu probíhalo v peci za zvýšené teploty (80°C) po dobu 2 hodin. Po vyndání z pece byla forma ponechána v sevřeném stavu při pokojové teplotě dalších 24 hodin.



Obr. 39.: Vytvrzená konstrukce vidlice po odstranění svěrek.

Následující den byla forma rozebrána a pomocí přímé brusky došlo k odstranění přebytečných částí tkanin. Ostré hrany byly opracovány brusným plátnem o jemné zrnitosti (*Obr. 40*).



Obr. 40.: Kompozitní vidlice po opracování ostrých hran.

4.3 Návrh testovacího standu

Při vývoji nových produktů se neprovádějí pouze výpočtové, ale i reálné testy prototypů. Při testech se často projeví různé nedostatky a bývá zpravidla před zahájením výroby ještě dostatek času tyto chyby odstranit. Tímto postupem se dá zabránit výrobě nekvalitních výrobků, které by znamenaly pro konkrétní firmu velký problém v podobě odpovědnosti za případné škody. Podrobení prototypu zátěžovým testům je mnohdy jediným způsobem zjištění reálného chování výrobku v praxi.

Testování kompozitní vidlice na podvozku nosítka by bylo časově velmi náročné a ekonomicky nevýhodné. Byla by nutná výroba a testování všech čtyř vidlic. Dalším kritériem pro návrh jednoúčelového testovacího zařízení je možnost vyvození předem definovaných provozních stavů a jejich opakování po libovolně dlouhou dobu.

Navrhované testovací zařízení bude sloužit ke statickým zkouškám prototypových kompozitních vidlic určených pro transportní kola o $\varnothing 200\text{ mm}$.

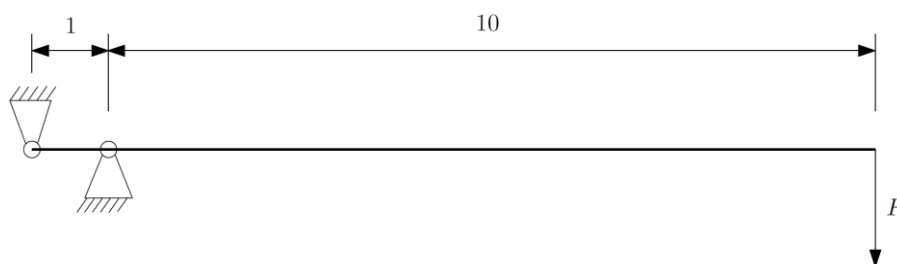
Při návrhu byly uvažovány následující skutečnosti:

- Jednoduché zařízení z hlediska obsluhy
- Složitost dílů z hlediska výroby – preferování normalizovaných součástí
- Minimální náročnost výměny zkoušené vidlice
- Testování vidlice ve všech přípustných polohách

4.3.1 Silový a kinematický rozbor

Již v prvopočátku návrhu bylo zřejmé, že pro docílení ekonomicky přijatelného testovacího zařízení nebude uvažováno elektrických, či hydraulických pohonů. Pro vyvození potřebného zatížení vidlice byla přijata myšlenka jednoduché páky, která umožňuje při vhodném poměru ramen aplikováním malých sil na jedné straně, vyvození velkých sil na straně druhé.

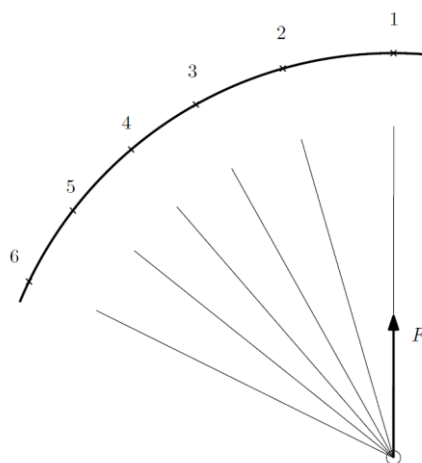
Na prototypovou vidlici byl kladen požadavek nosnosti 150 kg, neboli její provoz pod zatížením o velikosti 1 471,5 N. Pro vyvození této síly byl zvolen poměr ramen páky 1:10 a tedy na konci delšího ramene je nutné působit silou 147,15 N. Tato síla odpovídá závaží o hmotnosti 15 kg (*Obr. 41*).



Obr. 41.: Návrh způsobu vyvození zatížení.

Dalším požadavkem byla možnost testování vidlice v polohách, ve kterých se nachází při svém provozu. Bylo tedy nutné zajistit takové chycení, které bude umožňovat změnu úhlu zatěžující síly. Jak je z *Obr. 42* patrné, byla zvolena kruhová dráha upevnění vidlice, která tento požadavek splňuje.

Tímto byly splněny hlavní požadavky z hlediska kinematických možností testovacího zařízení.



Obr. 42.: Dráha upevnění vidlice.

4.3.2 Konstrukce rámu

Z hlediska technologie výroby bylo při návrhu uvažováno normalizovaných součástí, zejména byly použity tenkostěnné ocelové, uzavřené profily. Polotovarem horního upevnění vidlice byl zvolen plech, který je v dnešní době možné dělit laserem. Tato metoda umožňuje vypalovat přesně a ekonomicky nejrůznější tvary. Rám byl navržen jako svařovaná konstrukce.

Stěžejními prvky konstrukce standu jsou zatěžující rameno a čep, který tvoří osu rotace páky.

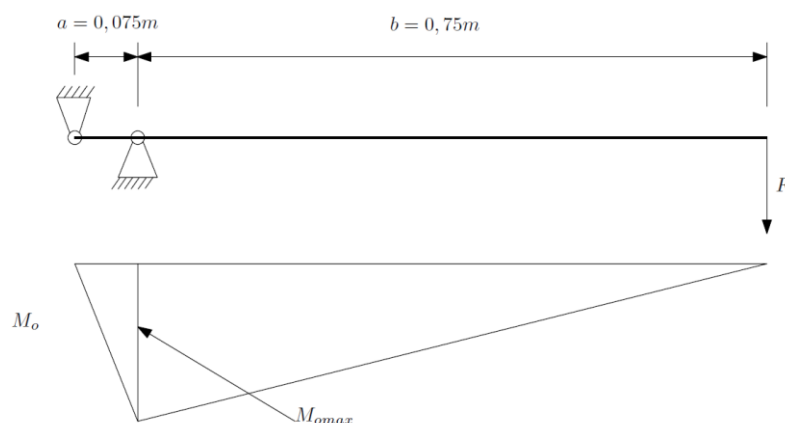
- **Rameno páky**

Návrh zařízení probíhal v 3D modelovacím prostředí programu Autodesk Inventor. Pro rameno páky byl z rozměrových důvodů zvolen čtvercový, uzavřený ocelový profil o délce hrany 40 mm a šířce stěny 3 mm. Dle strojnických tabulek byl vybrán materiál polotovaru – ocel 11 373. (25) Rozměry ramen byly stanoveny v předem uvažovaném poměru 1:10 na hodnoty 75 mm a 750 mm.

Tabulka 7.: Mechanické hodnoty ocele 11 373. [25]

Materiál	R_m [MPa]	R_e [MPa]	σ_{oC} [MPa]	τ_C [MPa]	σ_{oD} [MPa]
11 374	340 – 440	186 – 250	130 – 155	95 – 110	110 - 165

Navržený profil bylo nutné výpočetně zkontrolovat a popřípadě zvolit profil jiný. Pro výpočet byly uvažovány dva stavy, jeden provozní (hmotnost závaží 15 kg) a druhý na přetížení vidlice (hmotnost závaží 25 kg).



Obr. 43.: Průběh ohybového momentu

Úloha byla řešena jako nosník s dvěma podporami a převislým koncem zatížený osamělou silou (Obr. 43). [26]

Vstupní hodnoty:

$$a = 0,075 \text{ [m]}$$

$$b = 0,75 \text{ [m]}$$

$$F_1 = 147,15 \text{ [N]}$$

$$F_2 = 245,25 \text{ [N]}$$

$$W_o = 5\,098,6 \text{ [mm}^3\text{]}$$

$$\sigma_{oD} = 110 \text{ [MPa]}$$

Platí

$$\sigma_o = \frac{M_o}{W_o} \leq \sigma_{oD} . \quad (29)$$

Z Obr. 43 je patrné, že největší ohybový moment bude v místě osy rotace a výraz (29) byl upraven do tvaru

$$\sigma_{o \max} = \frac{M_{o \max}}{W_o} \leq \sigma_{oD} . \quad (30)$$

Dále z Obr. 43 vyplývá že,

$$M_{o \max} = F \cdot b \quad (31)$$

Při uvažování prvního provozního stavu zařízení, se dosazením výrazu (31) do (30) získá

$$\sigma_{o \max 1} = \frac{147,15 \cdot 750}{5\,098,6} = 21,645 \text{ [MPa]} . \quad (32)$$

Obdobně pro stav číslo 2.

$$\sigma_{o\ max2} = \frac{245,25 \cdot 750}{5\ 098,6} = 36,076 \text{ [MPa]}. \quad (33)$$

V obou případech je splněna podmínka z rovnice (29) a zvolený profil vyhovuje.

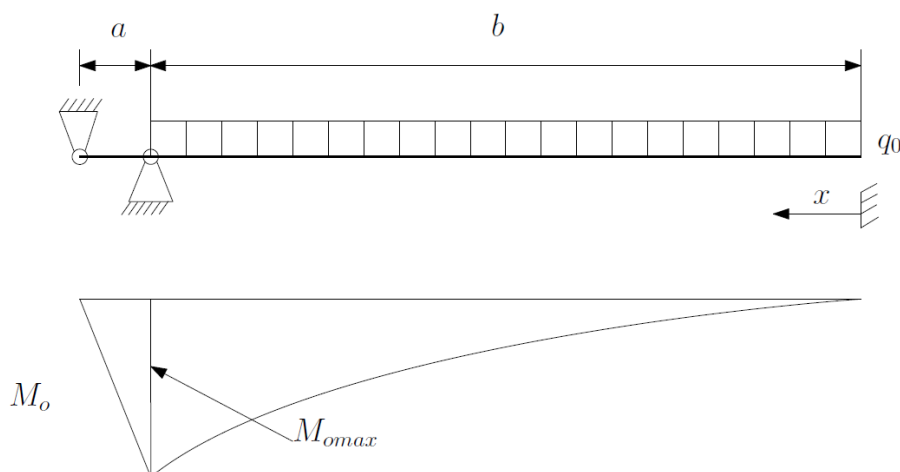
Vzhledem k nezanedbatelným rozměrům a následně i hmotnosti zvoleného profilu bylo nutné určit vliv od vlastní tíhy ramene na působící zátěžnou sílu. Úloha byla opět řešena jako nosník o dvou podporách, nyní však se spojitým zatížením na převislém konci.

Vstupní data pro výpočet byla

$$a = 0,075 \text{ [m]}$$

$$b = 0,75 \text{ [m]}$$

$$m = 2,6175 \text{ [kg]}$$



Obr. 44.: Ohybový moment od vlastní tíhy.

Velikost spojitého zatížení byla stanovena

$$G = q_o \cdot b, \text{ respektive}$$

$$q_o = \frac{G}{b} = \frac{m \cdot g}{b} = \frac{2,6175 \cdot 9,81}{0,75} = 34,237 \text{ [N/m]}. \quad (34)$$

Maximální ohybový moment je opět pod osou otáčení ramene páky a jeho velikost je dána vztahem

$$M_{o\ max} = \frac{q_o \cdot b^2}{2} = \frac{34,237 \cdot 0,75^2}{2} = 9,6292 \text{ [Nm]}. \quad (35)$$

Nyní je jednoduchým přepočtem zjištěna velikost svislé reakční síly v levé podpoře

$$R_{Ay} = \frac{M_{o\ max}}{a} = \frac{9,6292}{0,075} = 128,39 \text{ [N]}. \quad (36)$$

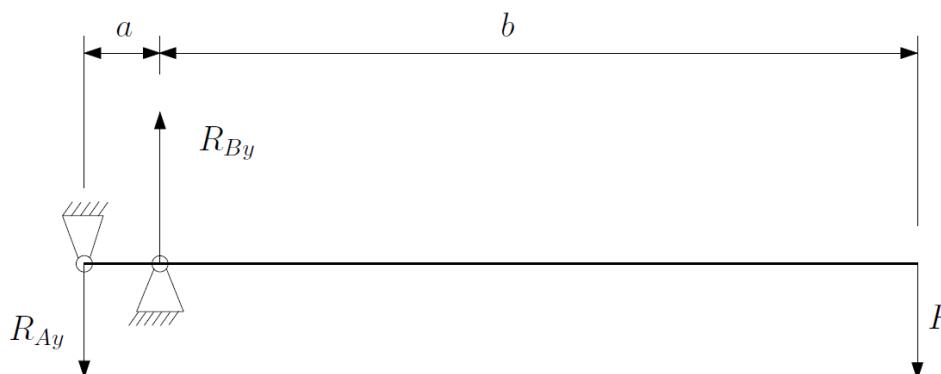
Z rovnice (36) vyplývá, že samotné rameno bez aplikace zátěžné síly, vyvolá v místě uchycení vidlice reakci o velikosti přibližně 130 [N]. Při výpočtu nebyly uvažovány pasivní odpory.

- **Volba čepu**

Pro osu rotace páky bylo nutné navrhnout polotovar čepu. Nejvhodnější varianta se zdála být v koupi již hotového lícovaného šroubu, ovšem v požadovaných rozměrech ($\varnothing 12$ [mm] a svěrná délka 115 [mm]) byla z ekonomického hlediska zvolena závitová tyč, která byla opatřena plastovou vložkou. Následnou kontrolou zvoleného polotovaru bylo ověřeno, zda bude vyhovující. Vzhledem ke konfiguraci zatížení, bude čep kontrolován na stříh.

Tabulka 8.: Volba polotovaru

Polotovar	R_m [MPa]	R_{el} [MPa]
Závitová tyč M12 – 130, 4.8	400	240



Obr. 45.: Silový rozbor.

Vstupní hodnoty:

$$a = 0,075 \text{ [m]}$$

$$b = 0,75 \text{ [m]}$$

$$\tau_D = 0,3 \cdot R_e = 0,3 \cdot 240 = 72 \text{ [MPa]}.$$

Z Obr. 45 byla sestavena silová rovnováha a momentová rovnice

$$-R_{Ay} + R_{By} - F = 0, \tag{37}$$

$$R_{By} \cdot a - F \cdot (a + b) = 0. \tag{38}$$

Vyjádřením R_{By} z (38) byl získán vztah pro výpočet potřebné síly

$$R_{By} = F \cdot \frac{(a + b)}{a}. \tag{39}$$

Opět byly uvažovány dva stavy zatěžování

$$R_{By} = F_1 \cdot \frac{(a + b)}{a} = 147,15 \cdot \frac{(0,075 + 0,75)}{0,75} = 1\,618,65 \text{ [N]}, \tag{40}$$

$$R_{By} = F_2 \cdot \frac{(a+b)}{a} = 245,25 \cdot \frac{(0,075 + 0,75)}{0,75} = 2\,697,75 \text{ [N]}. \quad (41)$$

Vztah pro výpočet smykového napětí

$$\tau = \frac{F}{S_3} = \frac{F}{\frac{\pi \cdot d_3^2}{4}} \leq \tau_D. \quad (42)$$

Výpočet pro provozní zatížení

$$\tau_1 = \frac{F_1}{\frac{\pi \cdot d_3^2}{4}} = \frac{1\,618,65}{\frac{\pi \cdot 9,853^2}{4}} = 21,23 \text{ [MPa]}, \quad (43)$$

$$\tau_2 = \frac{F_2}{\frac{\pi \cdot d_3^2}{4}} = \frac{2\,697,75}{\frac{\pi \cdot 9,853^2}{4}} = 35,38 \text{ [MPa]}. \quad (44)$$

Bezpečnost je dána vztahem

$$k = \frac{\tau_D}{\tau_1} = \frac{72}{35,38} \cong 2. \quad (45)$$

Je patrné, že oba stavy jsou vyhovující a není tedy nutné volit jiný materiál, popř. větší průměr polotovaru. Vzhledem k bezpečnosti byl při výpočtu zanedbán vliv vlastní tíhy ramene.

Po kontrole důležitých uzlů, bylo přistoupeno k finálnímu návrhu 3D modelu testovacího zařízení (Obr. 46).

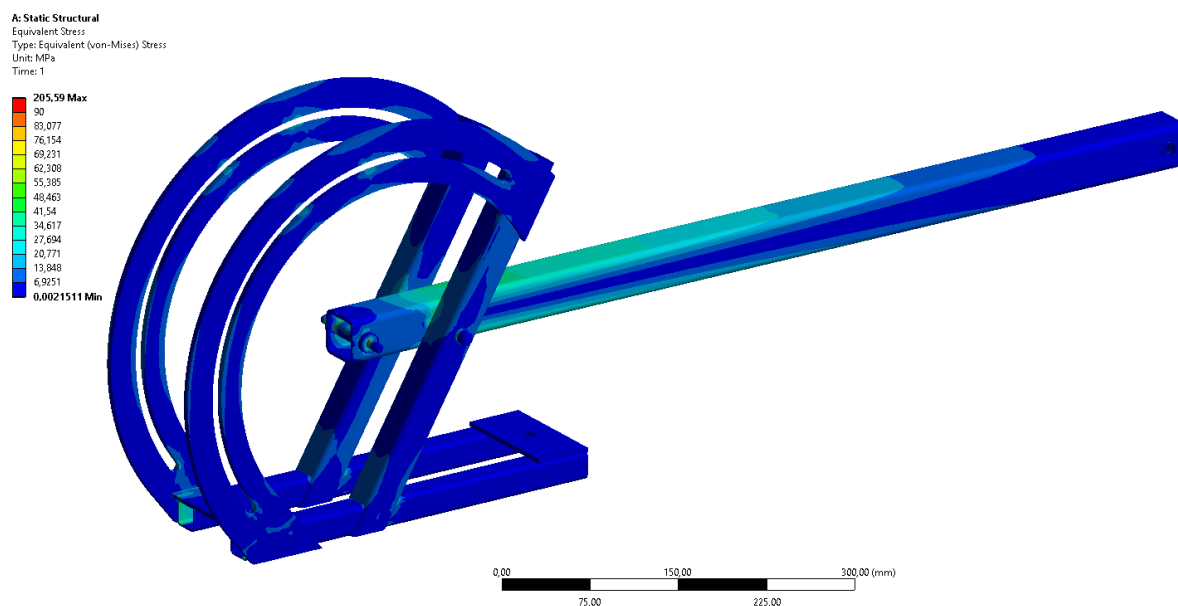


Obr. 46.: Model testovacího zařízení

Pro upevnění standu bylo zvoleno kombinace šroubu a T-drážky, ovšem je možné i jiného uchycení.

- **MKP statická analýza rámu**

Konstrukce byla podrobena statické MKP analýze rámu pro uvažovaný druhý zátěžný stav (hmotnost závaží $m = 25 [kg]$). Cílem bylo zjistit rozložení napětí v konstrukci rámu a případně upravit jeho geometrii. Jak je patrné z *Obr. 47* napětí nedosahuje vysokých hodnot ($20 [MPa]$) a není tedy nutné dalších vyztužujících prvků a návrh byl prohlášen za finální.



Obr. 47.: Napětí von-Mises v rámu konstrukce standu.

4.3.3 Výroba testovacího zařízení

Konečný návrh byl sestaven ve spolupráci firmy Mediol a pana Ing. Jana Andruše.

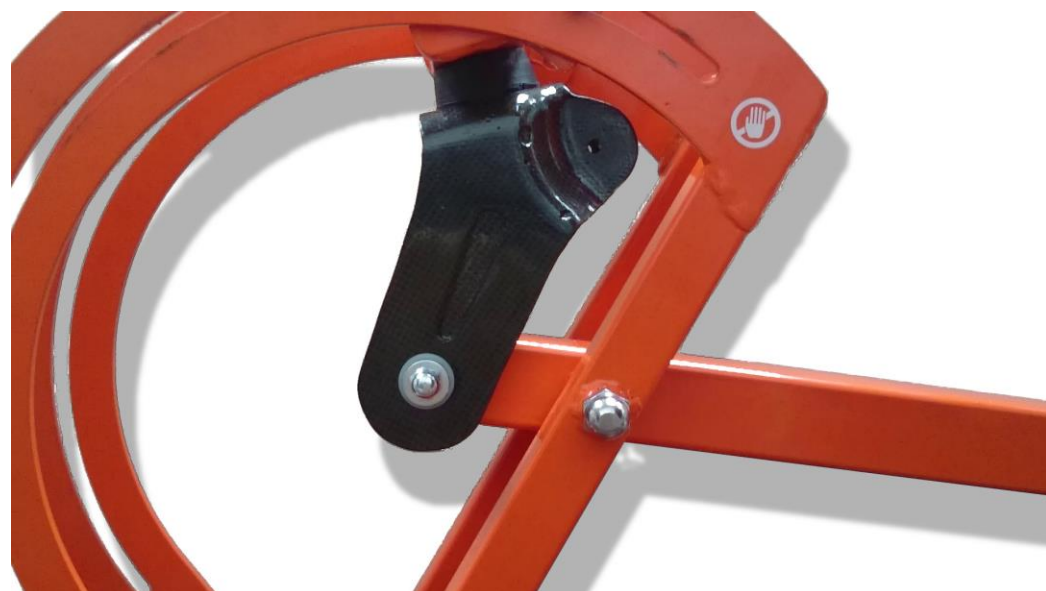
Před finální povrchovou úpravou bylo nutné povrch svařence opískovat a zbavit nečistot. Lakování probíhalo v práškové lakovně a bylo tak docíleno silnějšího povlaku, než při klasickém nátěru. Výsledný barevný odstín byl zvolen ve firemních barvách firmy Mediol, tedy oranžový.

4.3.4 Zatěžování prototypu

Po zhotovení testovacího zařízení bylo přistoupeno ke statickým zátěžným zkouškám vyrobené prototypové vidlice. Zatěžování probíhalo vzestupně od polohy č. 1. Maximální zátěžná síla byla ve všech případech shodná, o velikosti 1 500 [N].



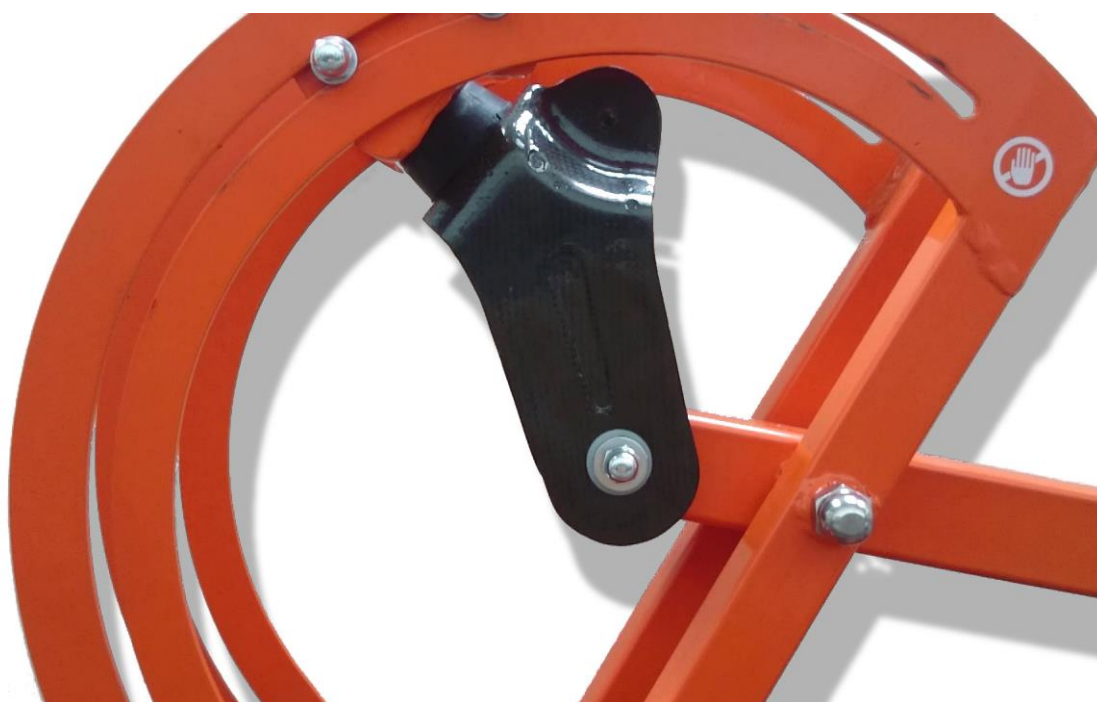
Obr. 48.: Zatížení vidlice – poloha č.1.



Obr. 49.: Zatížení vidlice – poloha č.2.



Obr. 50.: Zatížení vidlice – poloha č.3.



Obr. 51.: Zatížení vidlice – poloha č.4.



Obr. 52.: Zatížení vidlice – poloha č.5.

Zatěžování pro polohu č.6 nebylo realizováno, neboť při aplikaci zatížení v poloze č.5 *Obr. 52*, došlo k destrukci kompozitu (*Obr. 53*).

Porušení kompozitní struktury nastalo v místech přechodu svislé nosné části vidlice a částí pro přídatné kolečko. V této oblasti došlo pod zatížením k oddálení levé a pravé svislé části a tím ke změně geometrie vidlice. Tento stav vedl neodvratně k destrukci.

Jak je patrné z *Obr.* , při testech nebylo přídatné kolečko připevněno. V opačném případě by byla skrze hřídel kolečka zvýšena tuhost vidlice a tím i zamezeno poruše. Ovšem tento předpoklad nemohl být v době sepisování práce ověřen, z důvodu časové náročnosti laminace nového prototypu.



Obr. 53.: Destrukce kompozitní vidlice – poloha č.5.

V místech porušení kompozitní struktury bylo předchozími výpočty stanoveno kritérium porušení pohybující se okolo hodnoty 1. Z výpočetního hlediska se jedná o přijatelný stav, ovšem reálný zátěžový test vedl k opačnému výsledku. Tato skutečnost mohla být způsobena mnoha vlivy.

Jedním z možných faktorů, mohla být porezita matrice a její nedokonalé spojení s vyztužujícími vlákny. Při výrobě prototypu bylo dbáno bezpečnosti práce a bylo použito ochranných pomůcek včetně latexových rukavic. Při přípravě nástřihů tím byla zajištěna nejen ochrana lidského zdraví, ale také bylo zamezeno přímého kontaktu uhlíkových tkanin s povrchem dlaní, které jsou zdrojem mastnoty, způsobující nenasycení zasaženého místa pryskyřicí. Dalším kritickým bodem laminace mohlo být nanášení separačního vosku na formu vidlice a opomenutí výměny znečištěných rukavic. V tomto okamžiku mohlo při následné manipulaci s nástřihy dojít k nechtěnému přenesení vosku na tkaninu.

K znečištění tkanin mohlo též dojít i vlivem prostředí, neboť pracovní místnost nebyla prvořadě určena pro práci s kompozity (prašné prostředí).



Obr. 54.: Detail vnitřního zaoblení s vyznačenou trhlinou.

KAPITOLA 5

Závěr

V úvodu diplomové práce byla provedena rešerše zaměřená na problematiku pojezdových kol a koleček. Byl utvořen přehled kol a koleček dle způsobu použití, přehled používaných materiálů pro běhouny kol a disky, v neposlední řadě přehled způsobů upevnění kol k podvozku. Dále následovala rešerše kompozitních materiálů. Jejich klasifikace, druhy výztužných materiálů a matric a základní vlastnosti kompozitní vrstvy včetně mezních stavů.

V konstrukční části práce byl analyzován současný stav pojezdového ústrojí podvozkové části a to z hlediska kinematiky, hmotnosti a stavu napjatosti. V návaznosti na analýzu rozložení napjatosti následoval návrh nového řešení z kompozitních materiálů. Byla provedena MKP napěťová analýza tohoto řešení, ze které byly patrné části vidlice s nízkým faktorem porušení, a byla predikována destrukce v těchto místech.

Dále bylo navrženo nové upevnění prototypové vidlice k podvozkové části nosítka včetně návrhu nových ložisek.

V praktické části byla navržena a vyrobena forma nové prototypové vidlice a následovala výroba vlastního prototypu.

Pro hmatatelné výsledky bylo navrženo a sestrojeno testovací zařízení, které umožňuje realizovat statické zátěžové testy. Prototypová vidlice byla podrobena testům na tomto standu, kde došlo k její destrukci v poloze č. 5, pod zatížením 150 kg.

Pro další návrh nového řešení doporučuji navýšit počet vrstev uhlíkových tkanin a vyvarování se příliš malých zaoblení.

Hmotnost navržené vidlice bez upevňovacích prvků je 75 g, což je úspora 326 g oproti současnému stavu. Je zřejmé, že zvýšením počtu vrstev uhlíkové tkaniny dojde i k navýšení hmotnosti, ovšem nárůst nebude nijak výrazný.

CITOVANÁ LITERATURA

- [1] ČSN EN 12 526. *Terminologie, doporučené značky a vícejazyčný slovník*. Praha: Český normalizační institut, 1999.
- [2] Valve Control. *Katalog – Pojezdová kola a kladky*. Nivnice: Valve Control, 2015.
- [3] Rolko. *Katalog – Räder, wheels*. Borgholzhausen: Rolko, 2015.
- [4] Wanzl. *Katalog – Arirport solutions*. Leipheim: Wanzl, 2015.
- [5] ČSN EN 12 529. *Kladky a kola – Kladky – Kladky pro otáčivá křesla – Požadavky*. Praha: Český normalizační institut, 1999.
- [6] Derby Ruote. *Katalog – Medical and reha castors*. Milano: Derby Ruote, 2015.
- [7] Bs – Rollen. *Katalog – Dům koleček* [online]. 2015. [cit. 2015-05-04]. Dostupné z: <http://www.dum-kolecek.cz/soubory/katalog-dum-kolecek.pdf>
- [8] Tente – Česká Republika. *Kolečka a kladky*. [online]. 2015 [cit. 2015-02-05]. Dostupné z: <https://www.tente.com/cz-cz/>
- [9] LAŠ, Vladislav. *Mechanika kompozitních materiálů*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2004.
- [10] PLUHARĚ, Ladislav. *Nauka o materiálech*. Praha: SNTL – Nakladatelství technické literatury, 1989.
- [11] AGARWAL, Bhagwan, Lawrence Broutman. *Vláknové kompozity*. Praha: SNTL – Nakladatelství technické literatury, 1987.
- [12] GIBSON, Ronald. *Principles of composite material mechanic*. Detroit: Wayne state university, 1994. ISBN 0-07-023451-5.
- [13] HRUDNÁK, Miroslav. *Materiálové charakteristiky a struktura kompozitních materiálů pro malé sportovní letouny*. Praha: ČVUT, 2004.
- [14] GOTTFRIED, Ehrestein. *Polymerní kompozitní materiály*. Praha: SCIENTIA, 2006.
- [15] BAUMRUK, Martin. *Kompozitové materiály v leteckém průmyslu v ČR*. Praha: ČVUT, 2006.
- [16] Aramid fiber. *Fibersource*. [online]. 2015 [cit. 2015-04-05]. Dostupné z: <http://www.fibersource.com/f-tutor/aramid.htm>

-
- [17] Specifikace materiálu: Kevlar. *Odetka*. [online]. 2015 [cit. 2015-04-05]. Dostupné z: http://www.odetka.cz/net20/cz/hitech_snury_specmat_kevlar.aspx
- [18] WANG, L.C., M.K. Harvey. *Ultra-high molecular weight polyethylene (UHMW-PE) and its application in microporous separators for lead/acid batteries*[online]. 1998. [cit. 2015-05-06]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775398000238>
- [19] PBO. *Future fibres: Future Fibres Rigging Systems*. [online]. 2015 [cit. 2015-05-10]. Dostupné z: <http://www.futurefibres.com/Rigging/Technology/Core-Technology/Core-Fibres/PBO.html>
- [20] The fiber: CompositesWorld. *Composites World*. [online]. 2015 [cit. 2015-05-11]. Dostupné z: <http://www.compositesworld.com/articles/the-fiber>
- [21] Specifikace materiálu: Basalt. *Odetka*. [online]. 2015 [cit. 2015-05-11]. Dostupné z: http://www.odetka.cz/net20/cz/specmat_basalt.aspx
- [22] Araldite 8545-1 Panel Lamination Bonding. *Krayden*. [online]. 2015 [cit. 2015-05-11]. Dostupné z: <http://krayden.com/araldite-8545-1-panel-lamination-bonding/>
- [23] Iglidur expertní systém. *igus*. [online]. 2015 [cit. 2015-05-15]. Dostupné z: <http://www.igus.cz/iglidurConf/Iglidur/Step5>
- [24] HENNLICH. *Pouzdra, flexibilní kabely, energetické řetězy*. Litoměřice: Hennlich Industrietechnik, spol. s.r.o., 2007.
- [25] LEINVEBER, Jan. *Strojnické tabulky*. Praha: SCIENTIA, 1999.
- [26] SHIGLEY, J.. *Konstruování strojních součástí*. Brno: Vutium, 2010.

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1.:</i> Konstrukční části kola	15
<i>Obr. 2.:</i> Závislost valivého odporu různých druhů běhounů na zatížení.....	19
<i>Obr. 3.:</i> Závislost valivého odporu různých typů ložisek.....	20
<i>Obr. 4.:</i> Základní typy držáků kola.....	20
<i>Obr. 5.:</i> Pevná a otočná vidlice.....	21
<i>Obr. 6.:</i> Klasifikace kompozitních materiálů	22
<i>Obr. 7.:</i> Použití kompozitních materiálů na letadle Boeing 767	28
<i>Obr. 8.:</i> Plátnová vazba.....	30
<i>Obr. 9.:</i> Keprová vazba	30
<i>Obr. 10.:</i> Atlasová vazba	31
<i>Obr. 11.:</i> Příklad aplikace voštinového jádra.	32
<i>Obr. 12.:</i> Souřadný systém jednosměrného kompozitu.....	34
<i>Obr. 13.:</i> Kompozit zatížený silou F v podélném směru. (upraveno z (3)).....	34
<i>Obr. 14.:</i> Kompozit podrobený smykovému napětí.....	36
<i>Obr. 15.:</i> Způsoby porušení jednosměrných kompozitů namáhaných tlakovým napětím .	38
<i>Obr. 16.:</i> Křivky pevnosti pro různá kritéria	39
<i>Obr. 17.:</i> Nosítko Clinic EXTERO N114-P113	41
<i>Obr. 18.:</i> Přední otočné kolo.....	42
<i>Obr. 19.:</i> Jednotlivé polohy podvozku.....	43
<i>Obr. 20.:</i> Hmotnostní analýza současného stavu.....	44
<i>Obr. 21.:</i> Procentuální podíl jednotlivých komponent na celkové hmotnosti sestavy kolečka.	45
<i>Obr. 22.:</i> Síť konečných prvků na modelu vidlice.....	46
<i>Obr. 23.:</i> Zleva – fixní podpora, posuv, síla v jednotlivých polohách.....	47
<i>Obr. 24.:</i> Vypočtené redukované napětí – poloha č. 1.....	48
<i>Obr. 25.:</i> Vypočtené redukované napětí – polohy č. 2 – 6.....	48
<i>Obr. 26.:</i> Konstrukční varianty nové vidlice	50
<i>Obr. 27.:</i> Návrh konstrukce.....	51
<i>Obr. 28.:</i> Vidlice převedená na plošnou součást.....	53

<i>Obr. 29.</i> : Upravená síť vidlice.....	54
<i>Obr. 30.</i> : Lokální souřadnicový systém. (červená – osa x)	55
<i>Obr. 31.</i> : Zobrazení tloušťky stěny před úpravou (vlevo) obvodu vidlice a po (vpravo)..	55
<i>Obr. 32.</i> : Vyobrazení faktoru bezpečnosti pro kritérium maximálního napětí	58
<i>Obr. 33.</i> : Zobrazení faktoru bezpečnosti dle teorie Tsai-Wu pro polohy č. 1 až č. 6.....	60
<i>Obr. 34.</i> : Rozměry axiálního ložiska	61
<i>Obr. 35.</i> : Rozměry vybraných ložisek.	63
<i>Obr. 36.</i> : Uchycení prototypové vidlice k podvozku nosítka.....	63
<i>Obr. 37.</i> : Prototypová forma	64
<i>Obr. 38.</i> : Forma potažená PVC fólií (červená – vnitřní plochy, bílá – vnější plochy).	65
<i>Obr. 39.</i> : Vytvrzená konstrukce vidlice po odstranění svěrek.....	66
<i>Obr. 40.</i> : Kompozitní vidlice po opracování ostrých hran.	67
<i>Obr. 41.</i> : Návrh způsobu vyvození zatížení.....	68
<i>Obr. 42.</i> : Dráha upevnění vidlice.	69
<i>Obr. 43.</i> : Průběh ohybového momentu	70
<i>Obr. 44.</i> : Ohybový moment od vlastní tíhy.	71
<i>Obr. 45.</i> : Silový rozbor.	72
<i>Obr. 46.</i> : Model testovacího zařízení.....	73
<i>Obr. 47.</i> : Napětí von-Mises v rámu konstrukce standu.	74
<i>Obr. 48.</i> : Zatížení vidlice – poloha č.1.....	75
<i>Obr. 49.</i> : Zatížení vidlice – poloha č.2.....	75
<i>Obr. 50.</i> : Zatížení vidlice – poloha č.3.....	76
<i>Obr. 51.</i> : Zatížení vidlice – poloha č.4.....	76
<i>Obr. 52.</i> : Zatížení vidlice – poloha č.5.....	77
<i>Obr. 53.</i> : Destrukce kompozitní vidlice – poloha č.5.	78
<i>Obr. 54.</i> : Detail vnitřního zaoblení s vyznačenou trhlinou.	79

SEZNAM TABULEK

<i>Tabulka 1:</i> Vlastnosti vybraných vláken	24
<i>Tabulka 2:</i> Materiálové charakteristiky.....	46
<i>Tabulka 3:</i> Vlastnosti sítě.....	47
<i>Tabulka 4:</i> Hodnoty von-Misesova napětí ve vybraných místech.	49
<i>Tabulka 5:</i> Použité materiály a jejich vlastnosti.	52
<i>Tabulka 6:</i> Počet použitých uzlů a elementů.....	54
<i>Tabulka 7:</i> Mechanické hodnoty ocele 11 373 (17).....	69
<i>Tabulka 8:</i> Volba polotovaru	72

SEZNAM PŘÍLOH

- [1] Volba radiálního kluzného pouzdra
- [2] Výkresová dokumentace
- [3] Šablony nástřihů