

České vysoké učení technické v Praze



Návrh hybridní skříně převodovky elektromobilu (kov/kompozit)

Diplomová práce

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Šedivý** Jméno: **Ondřej** Osobní číslo: **411088**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky**
Studijní program: **Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Aplikovaná mechanika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Návrh hybridní skříně převodovky elektromobilu (kov/kompozit)

Název diplomové práce anglicky:

Design of hybrid electric gearbox (metal/composite)

Pokyny pro vypracování:

Dle geometrických podkladů (CAD) vytvořte MKP model kovové varianty skříně převodovky elektromobilu. Pro zadaná zatížení určete a posuďte napětí a deformace skříně. Posuďte tuhosti uložení hřídelů. Navrhněte možnou náhradu kovového horního víka převodovky kompozitovým dílem vyšší nebo ekvivalentní tuhosti a nižší hmotnosti.

Seznam doporučené literatury:

Guy, D.-Hoa, S.V.-Tsai, S.W.: Composite materials - design and applications CRC Press, 2003.
Kollár, L.- Springer, G.S.: Mechanics of composite structures. Cambridge University Press, 2003
Barbero, E.J.: Finite Element Analysis of Composite Materials. CRC Press. 2008.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

prof. Ing. Milan Růžička, CSc., ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **24.10.2017** Termín odevzdání diplomové práce: **19.01.2018**

Platnost zadání diplomové práce:



Podpis vedoucí(ho) práce



Podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry



Podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant 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.

31.10.2017
Datum převzetí zadání

Šedivý
Podpis studenta

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl všechny použité podklady a literaturu.

V Praze dne

Jméno a příjmení

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu diplomové práce, Prof. Ing. Milanu Růžičkovi, CSc., za mně věnovaný čas a cenné rady. Dále chci poděkovat panu Ing. Zdeňku Padovcovi, Ph.D., za časté konzultace a panu Ing. Viktoru Kulíškovi za množství rad k programu ANSYS. Děkuji i své rodině za podporu při studiu.

Anotační list

Jméno autora:	Ondřej
Příjmení autora:	Šedivý
Název práce česky:	Návrh hybridní skříně převodovky elektromobilu (kov/kompozit)
Název práce anglicky:	Design of hybrid electric gearbox (metal/composite)
Akademický rok:	2017/2018
Ústav:	Ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Aplikovaná mechanika
Vedoucí práce:	Prof. Ing. Milan Růžička, CSc.
Rozsah práce:	Počet stran: 80 Počet obrázků: 40 Počet tabulek: 28 Počet příloh: 2
Jazyk práce:	Český
Klíčová slova:	kompozitní materiál, skříně převodovky, MKP, deformace, napětí, tuhost, výztuha, úspora hmotnosti
Keywords:	composite material, gearbox housing, FEM, deformation, stress, stiffness, bracing, weight saving

Abstrakt:

Tato diplomová práce se zabývá návrhem hybridního (kov/kompozit) horního víka převodovky elektromobilu. Nejprve jsou představeny nejvhodnější materiály pro výrobu víka a výrobní metody. V dalším jsou řešena napětí, posuvy a tuhosti stávající duralové skříně. Následně je navržena a analyzována hybridní verze, kdy je cílem dosáhnout vyšší nebo ekvivalentní tuhosti a nižší hmotnosti. Podmínkou návrhu byla vyrobitelnost metodou kontaktní laminace. Výsledné hybridní víko splňuje cíl snížení hmotnosti, a to o 24,9 %. Pro větší zvýšení tuhosti bude muset být použita další výrobní metoda, kterou je navíjení. Dosáhnout zvýšení tuhosti a splnit podmínku výrobní metody se ukázalo být jako nereálné. Dosažené posuvy středů ložisek hybridní verze bez výztuh jsou 2,88x až 4,78x nižší než pro duralovou verzi (s výztuhou 2,65x až 4,3x nižší). Ačkoli jsou výsledné tuhosti nižší, správnou funkci převodovky nemusí ovlivnit. Výsledky této práce umožňují přejít k další optimalizaci hmotnosti nebo návrhu víka vyrobitelného metodou navíjení.

Abstract:

This master thesis is focused on the design of hybrid (metal/composite) housing of the gearbox for an electric car. First the most suitable materials for the manufacturing of the housing are introduced, along with suitable manufacturing methods. Following the stresses, deformations and stiffness of the current duralumin gearbox case are considered. Following, the hybrid version is designed and analysed. The goal for the hybrid version is to gain a housing with lower weight and higher or equivalent stiffness. The housing must be manufacturable using the hand lamination method. The newly designed housing has met demands of lower weight of 24,9 %. However, in order to reach a higher stiffness it would be necessary to use a winding method. In conclusion, it was shown that to reach a higher stiffness was unreachable while meeting the demand of the assigned manufacturing method. The displacements of the midpoints of the bearings are 2,88x to 4,78x lower than for a duralumin version (with a bracing 2,65 to 4,3x lower). Although the results show that the final stiffness is lower, this may not necessarily impair the proper functioning of the gearbox. The findings presented in this thesis can be used for further weight optimization or design of a housing manufacturable by a winding method.

Seznam symbolů

E	[N mm ⁻²]	Youngův modul
F	[N]	síla
G	[N mm ⁻²]	modul pružnost ve smyku
k	[N mm ⁻¹]	tuhost
k	[-]	bezpečnost vůči mezi kluzu
u	[mm]	posuv ve směru osy x
v	[mm]	posuv ve směru osy y
w	[mm]	posuv ve směru osy z
ϑ	[-]	Poissonova konstanta
ρ	[g cm ⁻³]	hustota
σ	[N mm ⁻²]	napětí
τ	[N mm ⁻²]	napětí ve smyku

Seznam indexů

A	verze duralové skříně A
B	verze duralové skříně B
celk	celkový
II	rovnoběžné s osou vláken
⊥	kolmé na osu vláken
f	fiber (vlákno)
Pt	mez pevnosti
red	redukované
HMH	energetická hypotéza napětí
1, 2, 3	označení hlavních napětí
D	dovolené
τ max	hypotéza maximálních smykových napětí

Úvod

Kompozitní materiály nacházejí zastoupení v celé řadě průmyslových použití. Díky kombinaci vlastností se staly atraktivním materiálem při navrhování součástí pro nejrůznější účely. Jsou voleny konstruktéry namísto konvenčních materiálů v případech, kdy jsou kladeny nároky na vysokou pevnost a tuhost za současné nízké hmotnosti, lepší tlumicí vlastnosti konstrukce, odolnost vůči korozi a tepelné a elektrické izolační vlastnosti. Flexibilita při návrhu konstrukčně komplikovaných dílů téměř jakéhokoli tvaru a jejich výrobní jednoduchost v porovnání s konvenčními materiály je jejich neposlední výhodou. Pomocí kompozitů lze v některých případech nahradit celou sestavu dílů za použití jednoho dílu a snížit tak potřebu na údržbu strojního zařízení a zvýšit jeho spolehlivost. [9]

Doménou posledních let je tvořit stroje vyhovující ekologickým požadavkům, především v automobilovém a leteckém průmyslu. Nižší hmotnost dopravního prostředku znamená nižší spotřebu a zde otevírá nahrazení kovových materiálů kompozitními nový prostor pro zlepšení efektivity. Například nový dopravní letoun Boeing 787 je tvořen z 50 % právě kompozitními materiály.

Automobilový výrobce Volvo představil v roce 2015 nákladní vůz určený především pro americký trh, který je zkonstruován z řady kompozitních součástí. Americký úřad pro ochranu životního prostředí vydal nařízení pro snížení spotřeby nákladních automobilů do desíti let o 27 % (z dnešních průměrných 40 l na 100 km) a použití kompozitních materiálů má být jedním z dílčích kroků k tomuto dosažení. [8] Uhlíkové kompozity jsou o 50 – 75 % lehčí než ocel a o 20 – 50 % lehčí než hliník.

Použití kompozitních materiálů se prosazuje i ve výrobě osobních automobilů, i když kvůli vysoké ceně pomaleji. Významnou roli mohou hrát při návrhu elektromobilů, kde jsou lehčí konstrukční materiály vítanými prostředky pro vyrovnání nárůstu hmotnosti zapříčiněného dobíjecími bateriemi [11]. V roce 2015 byl v Las Vegas představen elektromobil e-Go Electric Vehicle sestavený z hliníkového rámu a kompozitních dílů. Hmotnost tohoto vozu činí méně než 750 kilogramů včetně baterie. Výroba kompozitních dílců tohoto automobilu je mechanizována, což podstatně snižuje výrobní čas. [12] Velmi medializovanými byly i prototypy a nyní sériově vyráběné elektromobily a hybridní vozidla BMW, kdy sériová výroba kompozitních dílů svými výrobními časy může konkurovat klasické technologii svařování kovových komponent.

Tato diplomová práce se zabývá návrhem kompozitního nebo hybridního (spojení kompozitu a kovu) víka pro převodovku elektromobilu, přičemž je k dispozici již existující model duralové verze. U víka musí být dodrženy vnitřní rozměry zaručující správnou funkci převodovky a vnější rozměry by neměly kvůli prostorovým požadavkům významně převyšovat rozměry stávající verze. Cílem je

navrhnout víko vyšší nebo ekvivalentní tuhosti za současného snížení hmotnosti, která činí u duralové verze 2460 g.

Návrh kompozitového víka vznikl ve spolupráci s firmou Compo Tech PLUS, spol. s.r.o. v Sušici a odborem pružnosti a pevnosti FS ČVUT v Praze a je plánovaná výroba prototypu. Návrhová technologie výroby a další omezení při konstrukci kompozitového víka jsou limitovány prostorovými požadavky, stávajícím tvarem a tím i výrobními možnostmi firmy Compo Tech. Tvar skříně není vhodný pro běžně využívané technologie v tomto podniku (navíjení a jejich kombinace s dalšími postupy), a proto konstrukční řešení této verze odpovídá vyrobitelnosti pomocí kontaktní laminace vrstev. Byla uvažována mimo jiné metoda navíjení na trn, která může být použita pro návrh verze víka v navazující diplomové práci. Výsledky této diplomové práce budou sloužit jako podklad pro další optimalizaci víka.

V kapitolách 1 až 3 je provedena rešerše zaměřena na kompozitní materiály a jejich výrobu se zaměřením na takové, které jsou potenciálně využitelné pro výrobu víka. Kapitola 4 se zaměřuje na popis stávající duralové skříně převodovky a v kapitole 5 je tato skříň v programu ANSYS Mechanical simulována. Druhá polovina práce, od kapitoly 6, popisuje tvorbu a výpočty kompozitové verze víka. V kapitole 8 je toto víko dále zpevněno vysokomodulovými uhlíkovými vlákny a výsledky jsou srovnány s verzí bez výztuhy. Před samotným shrnutím práce jsou v kapitole 9 diskutovány další možnosti optimalizace víka a dosažená úspora hmotnosti.

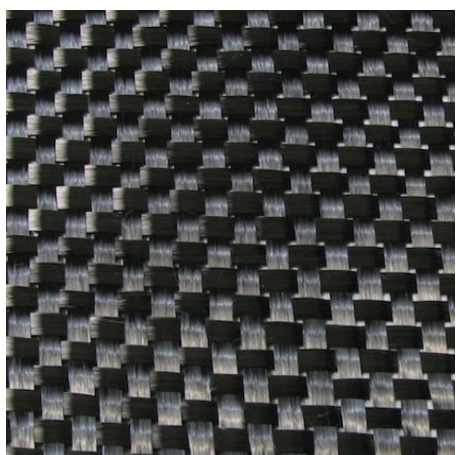
1 Nejdůležitější druhy vláken pro výrobu kompozitů

V této stati jsou představeny nejpoužívanější typy vláken pro výrobu kompozitních dílů. Jsou jimi uhlíková, skleněná a aramidová vlákna. Kapitola ve stručnosti informuje o základech výroby těchto vláken, specifických pevnostních vlastnostech a oblastech použití. Tato vlákna jsou potenciálně vhodná pro výrobu kompozitového víka převodovky.

1.1 Uhlíková vlákna

„Uhlíková vlákna (CF – Carbon Fiber) jsou technická vlákna s extrémně vysokou pevností a tuhostí, ale s nízkou tažností.“ [3] Výroba uhlíkových vláken probíhá následujícím způsobem. Výchozí látkou je organická surovina ve vláknitém tvaru, která projde procesem karbonizace¹. Při karbonizaci se odštěpí všechny prvky až na uhlík. Se zvyšující se teplotou a tedy se zvyšující se grafitizací se zlepšují mechanické vlastnosti. Při teplotě 1800 °C je tvorba grafitové struktury ukončena. Maximální teplota použití kompozitů z uhlíkových vláken se pohybuje v rozmezí 315 °C až 537 °C a může se dále značně lišit v závislosti na matrici.

Uhlíková vlákna se vrství do jednosměrných tzv. rovingů, nebo se spřádají do tkanin. Typů tkanin z uhlíkových ale i dalších typů vláken existuje celá řada. Jejich výroba probíhá stejným způsobem jako výroba běžné textilie. Na *obr. 1.1* je znázorněna tkanina z uhlíkových vláken.

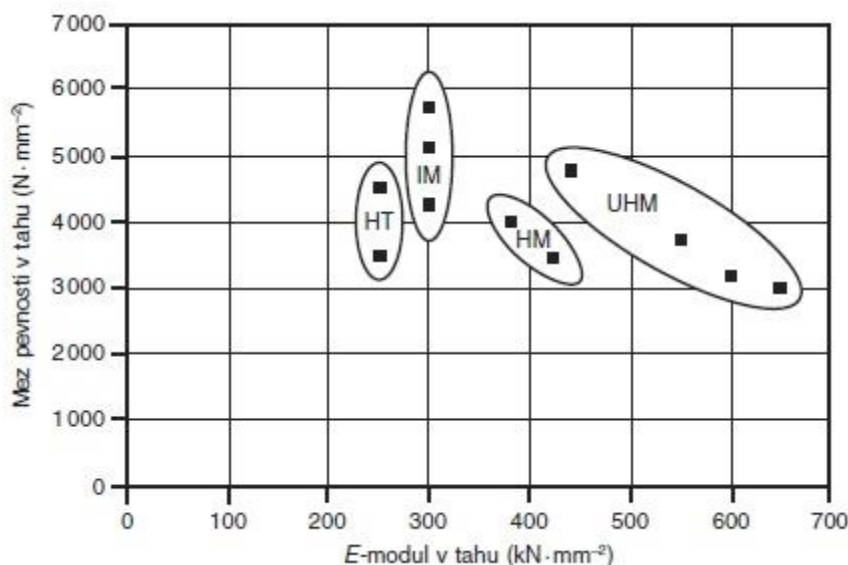


Obr. 1.1: tkanina z uhlíkových vláken [5]

¹ Karbonizace – proces, kdy z výchozí látky vznikají uhlíková vlákna. Provádí se nejčastěji v inertní dusíkové atmosféře, při teplotách mezi 1000 °C až 3000 °C a trvá několik minut. Bez přístupu kyslíku vlákno nemůže hořet. Při zahřívání vlákna se začínají uvolňovat především neuhlíkové atomy, až je většina neuhlíkových atomů odstraněna. Výsledné vlákno obsahuje 85 – 95 % uhlíku. [4]

1.1.1 Pevnostní a modulové spektrum

Jednotlivé druhy uhlíkových vláken se řadí do tzv. pevnostního a modulového spektra, jak je vidět na *grafu 1.2*. Použití vláken s vysokým modulem (HM, UHM) je vhodné v aplikacích, kdy je cílem nahradit ocelový nebo hliníkový díl kompozitovým při zachování mechanických vlastností a snížení hmotnosti. Je-li kovový díl nahrazen kompozitovým bez úpravy geometrie, je tento návrh téměř vždy neefektivní. [1]



Graf 1.1: rozdělení uhlíkových vláken (ve stavu bezprostředně po výrobě)

HT – standardní, IM – středně-, HM – vysoko, UHM – ultravysoko- modulová [3]

1.1.2 Vlastnosti uhlíkových vláken [3]

- Se zvyšujícím se zatížením stoupá hodnota E-modulu.
- Nízká hustota: $\rho_f = 1,6$ až $2,0 \text{ g cm}^{-3}$.
- Vysoká korozní odolnost (kromě silně oxidačního prostředí).
- Křehkost, při zpracování se snadno lámou – při zpracování se proto povrchově upravují směsí na bázi pryskyřice.
- Vysoká odolnost proti dlouhodobému dynamickému namáhání. „Dynamické vlastnosti laminátů s uhlíkovými vlákny jsou lepší než u všech ostatních materiálů (např. hliníku nebo oceli).“ [3]
- Typické mechanické vlastnosti jsou obsaženy v *tab. 1.1*.

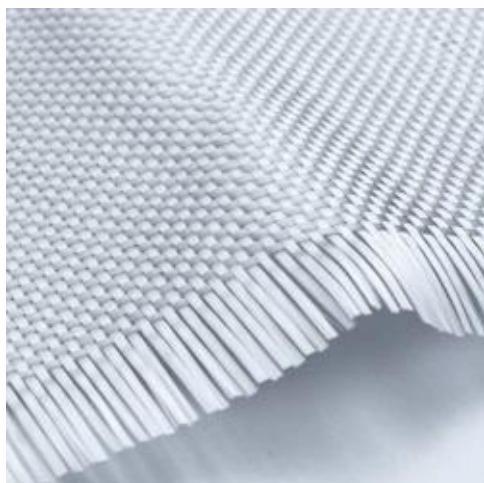
Uhlíkové vlákno	ρ hustota [g cm ⁻³]	$E_{ f}$ modul v tahu [N mm ⁻²]	$E_{\perp f}$ modul v tahu [N mm ⁻²]	σ_{Pt} pevnost v tahu [N mm ⁻²]	Tažnost [%]
Vysokopevnostní (HS)	1,78	240 000	15 000	3 600	2,1
Vysokomodulová (HM)	1,96	500 000	5 700	1 750	0,35

Tab. 1.1: typické mechanické vlastnosti vysokopevnostních a vysokomodulových uhlíkových vláken [3]

1.2 Skleněná vlákna

„Textilní skleněná vlákna (GF – Glass Fiber) jsou tenká vlákna (\varnothing 3,5 – 24 μ m) s pravidelným kruhovým průřezem, tažená z roztavené skloviny a používaná pro textilní účely.“ [3] Skleněná vlákna z bezalkalické skloviny jsou velmi dobrým elektrickým izolantem, proto se označují jako E-sklovina. Na rozdíl od uhlíkových a aramidových vláken jsou skleněná vlákna izotropní.

Fázové rozhraní vlákno – matrice tvoří slabé místo kompozitu, jelikož tudy mohou pronikat chemikálie a působit korozivně. Tomuto se zabráňuje tlustší vrstvou pojiva na povrchu laminátu a kvalitním spojením matrice a vláken pomocí speciální lubrikace. Na obr. 1.2 je znázorněna tkanina ze skleněných vláken.



Obr. 1.2: tkanina ze skleněných vláken [6]

1.2.1 Vlastnosti skleněných vláken [3]

- Izotropní vlastnosti (vlastnosti jsou v podélném a příčném směru stejné).
- Modul pružnosti v tahu je přibližně stejný jako u hliníku a oproti oceli přibližně třetinový.
- Pevnost v tahu je většinou podstatně vyšší než u oceli.

- „Ani dlouhodobé tepelné namáhání při 250 °C nesnižuje hodnoty mechanických vlastností.“ [3]
- Nehořlavost. Vhodné pro závěsy.
- Bod měknutí je vyšší než 625 °C.
- „Součinitel teplotní délkové roztažnosti je nižší než u většiny konstrukčních materiálů.“ [3]
- Typické mechanické vlastnosti jsou obsaženy v *tab. 1.2*:

Skleněné vlákno	ρ hustota [g cm ⁻³]	$E_{ f}$ modul v tahu [N mm ⁻²]	$E_{\perp f}$ modul v tahu [N mm ⁻²]	σ_{pt} pevnost v tahu [N mm ⁻²]	Tažnost [%]
E-sklo	2,6	73 000	73 000	2 400	3,0

Tab. 1.2: typické mechanické vlastnosti skleněných vláken (E-skloviny) [3]

1.3 Aramidová vlákna

Předností aramidových vláken je jejich vysoká pevnost a tuhost. Mohou být zpracovávány se všemi běžnými pryskyřicemi. Aramidová vlákna se vyrábějí v různých druzích lišících se modulem pružnosti v tahu a tažností (*tab. 1.3*). Velkou předností je nízká hustota 1,45 g.cm⁻³.

Aramid	ρ hustota [g cm ⁻³]	$E_{ f}$ modul v tahu [N mm ⁻²]	$E_{\perp f}$ modul v tahu [N mm ⁻²]	σ_{pt} pevnost v tahu [N mm ⁻²]	Tažnost [%]
Vysokotažný	1,45	80 000	-	3 600	4,0
S vysokou tuhostí	1,45	131 000	5 400	3 600	2,8
Ultratuhy	1,45	186 000	-	3 400	2,0

Tab. 1.3: srovnání aramidových vláken dle mechanických vlastností [3]

1.3.1 Vlastnosti aramidových vláken [3]

- Nejlehčí vyztužující vlákno, vysoká měrná pevnost v tahu.
- Silně anizotropní, vlastnosti ve směru vlákna jsou značně odlišně od vlastností měřených ve směru kolmém na osu vlákna. Hodnoty E-modulu jsou v kolmém směru podstatně nižší než v podélném směru.

- Mez pevnosti v tlaku v podélném směru je výrazně nižší než mez pevnosti v tahu – při návrhu je nutno brát v potaz citlivost vláken na tlak.

1.4 Biontec

Označení Biontec je v této práci používáno pro technologii přípravy 2D a 3D výztuže z daných typů vláken vyvinuté švýcarskou společností Biontec (do kapitoly 1 je zařazen jako konkrétní případ použití uhlíkových vláken s vysokým modulem pružnosti). V *tab. 1.4* jsou uvedeny materiálové typické vlastnosti takové výztuže vyrobené z uhlíkového vysokomodulového vlákna.

$E_{ }$ [kN mm ⁻²]	E_{\perp} [kN mm ⁻²]	$G_{ \perp}$ [kN mm ⁻²]	$\nu_{ \perp}$	$\nu_{\perp }$
289,5400	3,4913	2,7304	0,376	0,005

Tab. 1.4: vlastnosti vysokomodulového kompozitu od společnosti Biontec

Společnost Biontec používá tento materiál k výrobě dílů pro strojírenství, lékařství, měřicí přístroje a sportovní vybavení a další. Materiál je vhodný pro vysoce namáhané díly, u kterých hraje významnou roli hmotnost. Na *obr. 1.3* je ukázán příklad součástky pro sportovní použití vyrobené z Biontecu – brzdové páčky kola.



Obr. 1.3: brzdové páčky jízdního kola z kompozitu Biontec [13]

Při návrhu kompozitového víka v této práci je technologie Biontec využita pro zpevnění ve směru, ve kterém je vyžadována vyšší tuhost. Takto zvolená výztuha nahrazuje klasické „žebrování“ duralové varianty odlitku.

1.5 Porovnání vlastností vláken

Na závěr jsou v *tab. 1.5* srovnány vlastnosti výše zmíněných vláken: skleněných, aramidových (vysokomodulových – HM) a uhlíkových (standardní typ – HT a vysokomodulové – HM). Měření

pevnosti v podélném směru je obtížně, jelikož upnutí působí jako slabé místo a v kolmém směru se téměř měřit nedá. Proto je anizotropie vyjadřována jako poměr hodnot pružností $E_{||} : E_{\perp}$. Vyšší hodnota tohoto poměru značí vyšší anizotropii vlákn. Nízká hodnota modulu ve smyku $G_{||\perp}$ též svědčí o úrovni anizotropie. V praxi se tyto hodnoty zjišťují odvozením z teoretické analýzy výsledků měření vlastností matrice a jednosměrně vyztužených zkušebních těles. Z vláken používaných k vyztužení plastů jsou izotropní pouze skleněná vlákna.

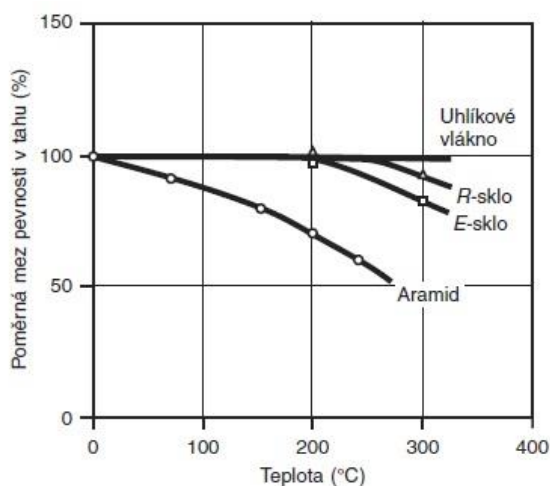
Vlákno	$E_{ }$ [kN mm ⁻²]	E_{\perp} [kN mm ⁻²]	$G_{ \perp}$ [kN mm ⁻²]	$\vartheta_{ \perp}$	$E_{ } : E_{\perp}$
E-sklo	73	73	30	0,25	1
Aramidové vysokomodulové (HM)	133	5,4	12	0,38	24,6
Uhlíkové standardní typ (HT)	240	15	10	0,28	16
Vysokomodulové (HM)	500	5,7	8	0,36	88

Tab. 1.5: srovnání mechanických vlastností skleněných, aramidových a uhlíkových vláken [3]

Z tab. 1.5 je vidět, že E-sklo má, jak bylo řečeno, izotropní vlastnosti ($E_{||} : E_{\perp} = 1$). Naproti tomu největší anizotropii vykazují vysokomodulová uhlíková vlákna díky vysokému $E_{||}$.

1.6 Rozsah teplot pro použití vláken

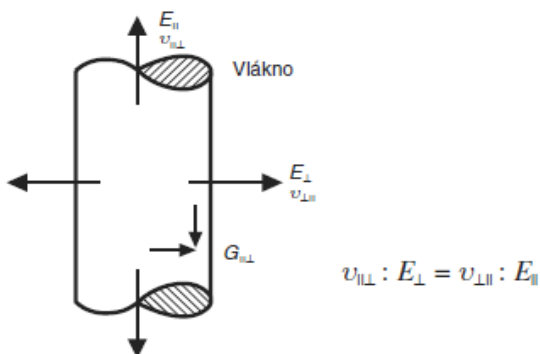
Rozsah provozních teplot kompozitů je dán především typem matrice. U uhlíkových vláken až do teploty 300 °C neprobíhá pokles mechanických vlastností, u skleněných vláken klesá poměrná mez pevnosti v tahu od 200 °C a u aramidových vláken již od 0 °C, jak ukazuje graf. 1.2.



Graf 1.2: závislost poměrné meze pevnosti v tahu na teplotě pro jednotlivé typy vláken [3]

1.7 Směry elastických vlastností vlákna

Na obr. 1.4 jsou pro úplnost schematicky znázorněny směry modulů pružnosti vzhledem k vlákně.



Obr. 1.4: charakteristické hodnoty elastických vlastností vlákna [3]

(1. index – směr smrštění, místo děje; 2. index – směr napětí, které toto smrštění vyvolá, příčina děje; princip: nejprve místo pak příčina)

2 Základní druhy matric

V následujících podkapitolách jsou představeny nejběžnější typy matric používané pro kompozit s uhlíkovými, skelnými a aramidovými vlákny.

„Pod pojmem matrice se rozumí materiál, kterým je prosycen systém vláken a partikulárních komponent tak, že po zpracování vznikne tvarově stálý výrobek.“ [3] Matrice zaručuje geometrický tvar a jeho stálost, zavedení a přenos sil a ochranu vláken před vlivy okolí.

Pro správnou funkci kompozitu je důležitá správná přilnavost vláken a matrice. K tomu se využívá apretace pro daný typ matrice. „Matrice musí mít vhodnou viskozitu a povrchové napětí, aby vlákno smočila úplně a bez bublin.“ [3]

V dnešní době jsou pro uhlíková, skelná a aramidová vlákna nejčastěji používány tři druhy pryskyřic. Jsou jimi epoxidové, vinylesterové a polyesterové pryskyřice. Cena i vlastnosti jednotlivých pryskyřic se velmi liší.

1.8 Epoxidové pryskyřice

Epoxidové pryskyřice jsou nejdražším typem pojiv. Vyznačují se vysokou pevností a velmi dobrou přilnavostí k uhlíkovým, skelným a aramidovým vláknům. Jsou vhodné pro dynamicky namáhané díly s vysokopevnostními vlákny (např. uhlíkovými). Chemická odolnost je závislá na druhu tvrdidla (možná odolnost proti kyselinám a horké vodě, alkáliím). [3]

Za normální teploty jsou v kapalném až pevném skupenství a tvrdidlo se přidává v kapalné nebo pevné formě. Tvrdidlo musí být dodrženo přesně ve stechiometrickém poměru k pryskyřici. [7]

1.9 Vinylesterové pryskyřice

Tyto pryskyřice vykazují oproti epoxidovým pryskyřicím třetinovou pevnost. Špatně přilínají k uhlíkovým a aramidovým vláknům a jsou v těchto případech používány pouze pro kosmetické účely. Pro silově namáhané kompozitní díly z uhlíkových a aramidových vláken je nutné zvolit jiný typ pryskyřice. [7] Maximální doporučená provozní teplota je 90 – 150 °C. Dále mají dobrou chemickou odolnost za zvýšených teplot (v kyselém a alkalickém prostředí).

1.10 Polyesterové pryskyřice

Polyesterové pryskyřice patří k nejlevnějším. Stejně jako vinylesterové mají špatnou přilnavost k uhlíkovým a aramidovým vláknům a nikdy by neměly být použity s těmito vlákny pro silově namáhané díly. [7] Nejčastěji se používají se skelnými vlákny, jsou dobré do slabě kyselého prostředí

2. Způsoby výroby kompozitů

Výběr výrobního procesu laminátu závisí na řadě faktorů, jsou jimi např.: typ matrice a tkaniny, teplota potřebná k vytvrzení kompozitu a ekonomičnost výroby. Při navrhování součástky hraje způsob výroby podstatnou roli a konstruktér se tomuto musí přizpůsobit. Při konstrukci samotného dílu je žádoucí znát výhody a nevýhody daného výrobního postupu, výrobní náklady daného postupu, plánovaný objem výroby a typické použití výrobní metody. [1]

Postup výroby kompozitu shrnují následující body: [1]

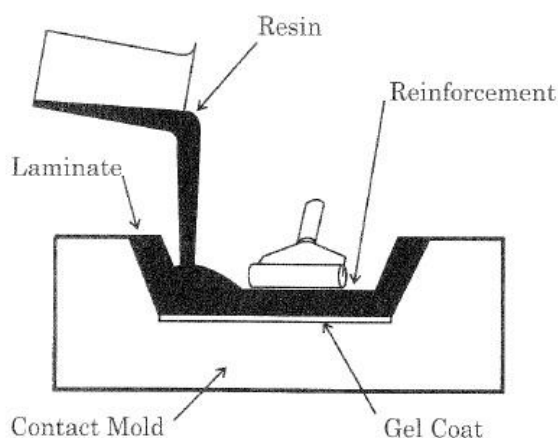
1. Klazení tkanin do formy v požadovaných směrech.
2. Impregnace tkaniny pomocí pryskyřice.
3. Odstranění nadbytečné pryskyřice a vzduchu.
4. Vytvrzení.
5. Vyjmutí z formy.
6. Dokončovací operace, jako ořezávání.

V závislosti na výrobním postupu mohou být jednotlivé body prováděny souběžně. V následujícím jsou uvedeny základní postupy výroby kompozitů, které jsou uvažovány pro zhotovení kompozitového víka převodovky.

2.1 Ruční klazení

Ruční klazení, nebo též kontaktní laminace, patří mezi metody ručního laminování (dále sem patří lisování a stříkání). Principem této metody je nanesení povrchové vrstvy pryskyřice, tzv. gelcoatu, na vyčištěnou formu s následným klazením vrstev výztuže (rohož, tkanina, sendvič), které se důkladně prosycují pryskyřicí. Z vzniklých vrstev se pomocí válečku vytlačí nežádoucí vzduchové bubliny, které vznikají mezi jednotlivými vrstvami laminátu. Díl se nakonec nechá vytvrdnout.

Ruční klazení lze rozdělit do čtyř kroků: příprava formy, nanesení gelcoatu, klazení vrstev tkaniny a pryskyřice, vytvrzování. [1] *Obr. 3.1* schematicky znázorňuje postup ručního klazení: gelcoat ve spodní části formy, navrstvené tkaniny, přidávaná pryskyřice a válečkem vytlačovány vzduchové bubliny.



Obr. 3.1: schéma metody ručního kladení [1]

Tato metoda se používá pro výrobu dílů pro řadu průmyslových odvětví. Tab. 3.1 uvádí typické aplikace ručního kladení.

Aplikace	Produkt
Výroba lodí	Lodě, lodní trupy, potrubí, bazény, nádrže, nábytek
Letectví	Trysky raketových motorů a jiné části letadel
Konstrukce	Filtry pecí, podpory konstrukcí, rovné a vlnité pláty, trubky, kryty
Spotřební průmysl	Části bicyklů, díly pro automobily

Tab. 3.1: příklady použití kompozitů vyrobených ručním kladením [1]

2.1.1 Gelcoat

Gelcoat je nátěr používaný v prvním kroku výroby. Forma je natřena gelcoatem před pokládáním tkaniny a zabraňuje přilnutí kompozitového dílu na povrch formy a tím k jeho snadnějšímu vyjmutí. Jako gelcoaty jsou nejčastěji používány vosky, polyvinylalkohol, silikony a krycí papíry. Volba gelcoatu závisí na typu kompozitu a požadovaném povrchu výsledného výrobku. Během procesu výroby přilne gelcoat k laminátu a tvoří jeho výsledný povrch. Tento povrch vytváří ochrannou vrstvu, skrze kterou nepronikají vlákna tkaniny, a dílec nevyžaduje další povrchovou úpravu.

2.1.2 Příprava materiálu, kladení tkaniny, vytvrzování

Tyto kroky následují po natření formy gelcoatem. Kladené tkaniny jsou ve formě nařezaných rohoží, tkanin nebo rovingů². Na nakladené tkaniny se nanese pryskyřice a pomocí válečku se tkaniny přitlačí do formy a vytlačí se vzduchové bubliny. Vytvrzování probíhá nejčastěji za pokojové teploty s následným vytlačáním z formy.

2.1.3 Ekonomičnost

Rychlost a náklady výroby metodou ručního kladení závisí na druhu tkaniny, matrice, velikosti dílce a průběhu zpracování. Pro každý kus je zapotřebí nové formy. Pro velké série je možné vytvořit více pracovních stanovišť, z nichž každé vykonává dílčí operaci, čímž se zvyšuje produktivita výroby a snižují náklady. Cenu dále ovlivňuje typ použité formy a ostatních výrobních pomůcek a celková pořadovaná kvalita výrobku. Pro kvalitní dílce je zapotřebí vysoce kvalifikovaných pracovníků.

V následující tabulce (tab. 3.2) jsou shrnuty hlavní výhody a nevýhody ručního kladení.

Výhody	Nevýhody
Velké díly s členitou geometrií	Pouze jedna strana dílu je hladká
Nenáročnost na vybavení	Kvalita závisí na zručnosti pracovníka
Minimální strojní náklady	Fyzicky náročné
Porozita pod 1%	Nízká produktivita
Možnost sendvičové konstrukce	Vysoký únik těkavých látek
Jednoduché zpevnění v různých směrech	Náročné zaručit opakovatelnost (totožnost součástí)
Stroje pro vytvrzování nejsou nutné	Dlouhá doba vytvrzování při pokojové teplotě

Tab. 3.2: výhody a nevýhody kompozitů vyrobených ručním kladením [1]

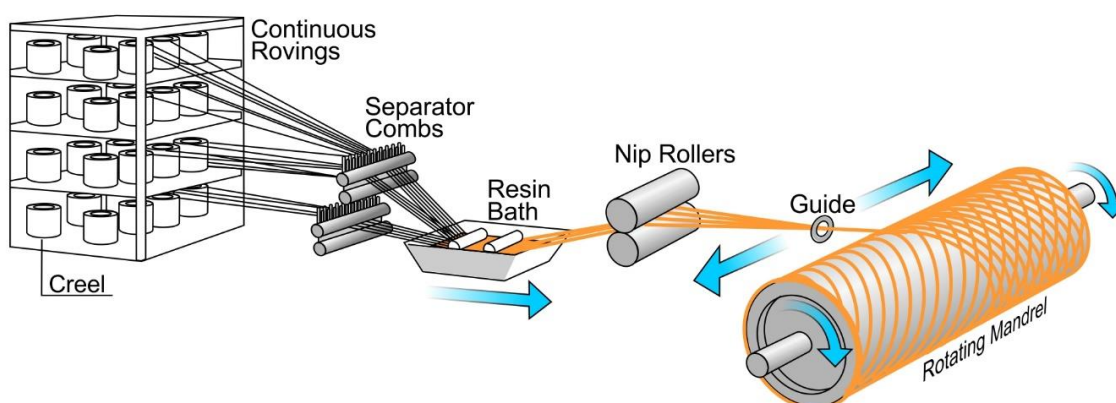
2.2 Metoda navíjení

Pomocí metody navíjení se vyrábějí především rotační dílce, jako válce, koule aj. Metoda spočívá v kontinuálním navíjení vláken na navíjecí trn, dokud není pokryt celý povrch a dosažena požadovaná tloušťka. Proces bývá automatizován, spotřebovávají se vlákna a pryskyřice v surové podobě, díky čemuž je metoda velmi ekonomická.

² Roving (pramenec) – skládá se z 20 až 60 nekonečných textilních vláken bez zákrutu. Vyrábí se ze všech vláken s vysokou pevností, především ze skla, aramidu, uhlíku.

2.2.1 Postup výroby metodou navíjení

Na obr. 3.2 je zobrazeno schéma procesu navíjení na trn. Ze zásobníků jsou odvíjena vlákna, která prochází přes separační hřebeny a následně namočením v pryskyřici. Po pryskyřicové lázni následuje průchod napínacím zařízením a v konečné fázi jsou vlákna pomocí oka vedena na trn, který vykonává rotační pohyb. Rychlostí posuvu oka a rotace trnu je řízen sklon vláken. Při této metodě se opakují dvě vrstvy vláken, a to o úhlech $\pm\theta$. Po dosažení žádané tloušťky jsou odvíjená vlákna přestřižena a následuje vytvrzování. Při vytvrzování je navíjecí trn zahříván za současného působení infračerveného světla, následuje vytvrzení v peci. Výsledná součást má tvar trnu, na který jsou vlákna navíjena. [1]



Obr. 3.2: schéma procesu navíjení [2]

2.2.2 Navíjecí trny

Navíjecích trnů bylo vyvinuto velké množství. Nejjednodušším typem je kovový liner, který zůstane po vytvrzení součástí vyrobeného dílce. Vhodná povrchová úprava trnů a separační vrstva umožňují také vytažení trnů z navíjeného výrobku speciálním zařízením. Dalším možným typem je trn složený z více částí, které se po vytvrzení výrobku demontují. Demontovatelné trny patří k nejdražším, proto se používají pro velkoobjemové díly. Následují rozpustitelné trny z písku smíchaného s polyvinylalkoholem. Pískový trn se skládá ze dvou a více částí, které tvoří po složení požadovaný tvar. Po vytvrzení je tento trn rozpuštěn pomocí vstříknuté horké vody. Sádrové trny jsou kvůli pracnému zhotovení a nebezpečí poškození při vyjmutí používány pouze pro výrobu prototypů nebo pro malé série rozměrných součástí. [1]

2.2.3 Omezení metody navíjení

Mezi nedostatky metody navíjení patří nutnost minimálního radiusu součástky. Poškození vláken a náhlé změny křivosti vytvářejí zóny se zvětšenou vrstvou pryskyřice. Potřeba odebrání navíjecího trnu po vytvrzení též limituje tvary součástí, které je možno takto vyrábět.

3. Popis stávající převodovky

V této kapitole je blíže představena duralová verze dvoustupňové převodovky s diferenciálem pro elektromobil se zaměřením na její skříň. Dále je zde zpracován MKP výpočetní model pro zjištění tuhostí, posuvů a napětí. Výsledky numerického řešení jsou uvedeny a diskutovány později.

3.1 3D model duralové varianty skříně převodovky

Jak již bylo řečeno v úvodu kapitoly, jedná se o dvoustupňovou převodovku s diferenciálem pro elektromobil, u které je zapotřebí analyzovat napětí a deformace. K dispozici byl dán 3D model skříně převodovky, který je následně popsán.

Na *obr. 4.1 a)* a *b)* jsou zobrazeny pohledy na vnější a vnitřní část horního víka, *obr. 4.2 a)* a *b)* znázorňují model dolního víka a na *obr. 4.3* je vidět výsledné spojení vík. Kapitola 6 se zabývá návrhem kompozitového horního víka a spolu s kapitolou 7 jsou stěžejními částmi této práce.

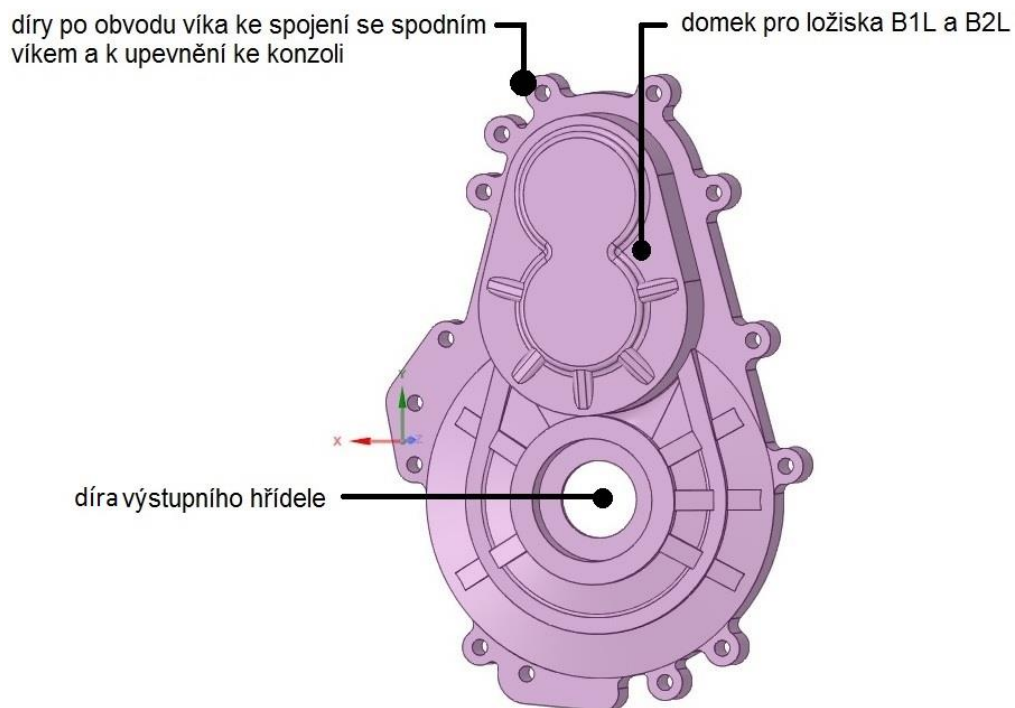
3.1.1 Horní víko převodovky

V této podkapitole následuje popis horního víka. Po obvodu se nachází 14 děr o průměru 8 mm. 12 z těchto děr slouží ke smontování s dolním víkem, zbylé díry připevňují konstrukci převodovky k blíže nedefinované konzoli. Na *obr. 4.1 b)* jsou oranžovou barvou zvýrazněna lůžka (věnce) pro ložiska. Do těchto lůžek jsou v MKP modelu přes funkci *remote point* aplikovány síly, které mají působíště na ozubených kolech (bližší vysvětlení následuje v kapitole 5.1.2).

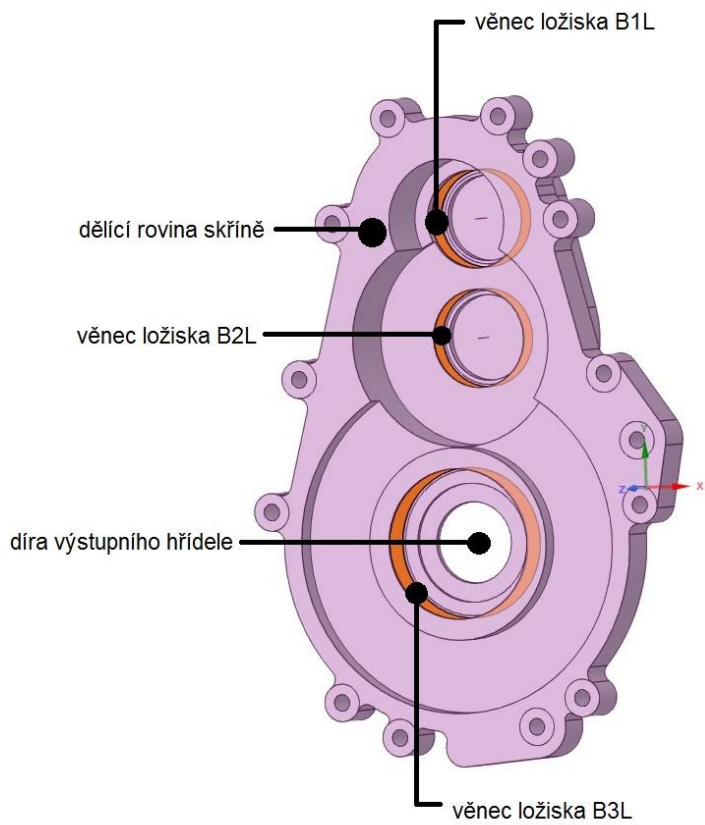
Aby bylo vyhodnocování přehledné, jsou jednotlivá ložiska pojmenována. Horní ložisko nese název B1L (bearing 1 left), prostřední B2L a spodní B3L. V tabulce (*tab. 4.1*) jsou pro představu o velikosti víka uvedeny rozměry ložisek. Výkres víka není v práci uveden.

Ložisko	Vnitřní průměr [mm]	Vnější průměr [mm]	Šířka [mm]
B1L	22	47	14
B2L	20	47	14
B3L	35	72	17

Tab. 4.1: rozměry ložisek horního víka převodovky



Obr. 4.1 a): náhled na vnější část horního víka převodovky



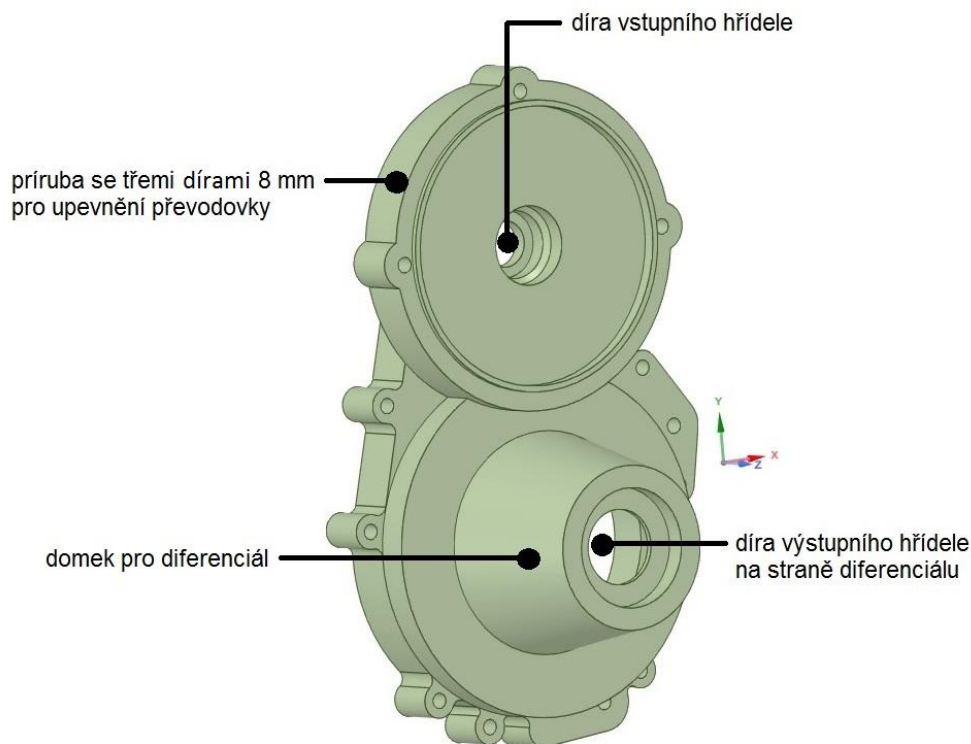
Obr. 4.1 b): náhled na vnitřní část horního víka převodovky

V následující podkapitole 4.1.2 pokračuje popis skříně převodovky dolním víkem.

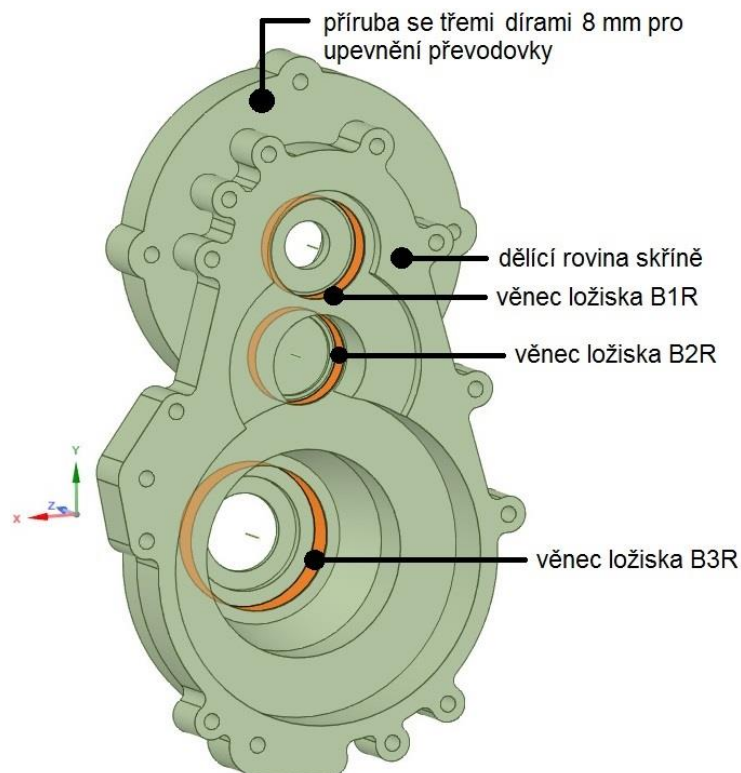
3.1.2 Dolní víko převodovky

V návaznosti na předchozí popis horního víka je nyní vysvětlena geometrie víka dolního, ačkoli se jím tato práce explicitně nezabývá. Stejně jako u horního víka jsou i v tomto případě pojmenovány ložiska podle svého umístění, jak lze vidět na *obr. 4.2 b)*. Ložiska jsou pojmenována od shora směrem dolu následovně: B1R, B2R a B3R.

V horní části lze vidět přírubu se třemi dírami o průměru 8 mm sloužící k upevnění převodovky v automobilu. Ve spodní části lze vidět „vyboulenou“ část víka, která je zde pojmenována jako domek pro diferenciál – toto je jasně zřetelné na *obr. 4.1 a)*. V tomto domku pro diferenciál se nachází i ložisko B3R, jak lze pozorovat na *obr. 4.2 b)*. Dělicí rovina následně reprezentuje hranici mezi dolním a horním víkem.



Obr. 4.2 a): náhled na vnější část dolního víka převodovky



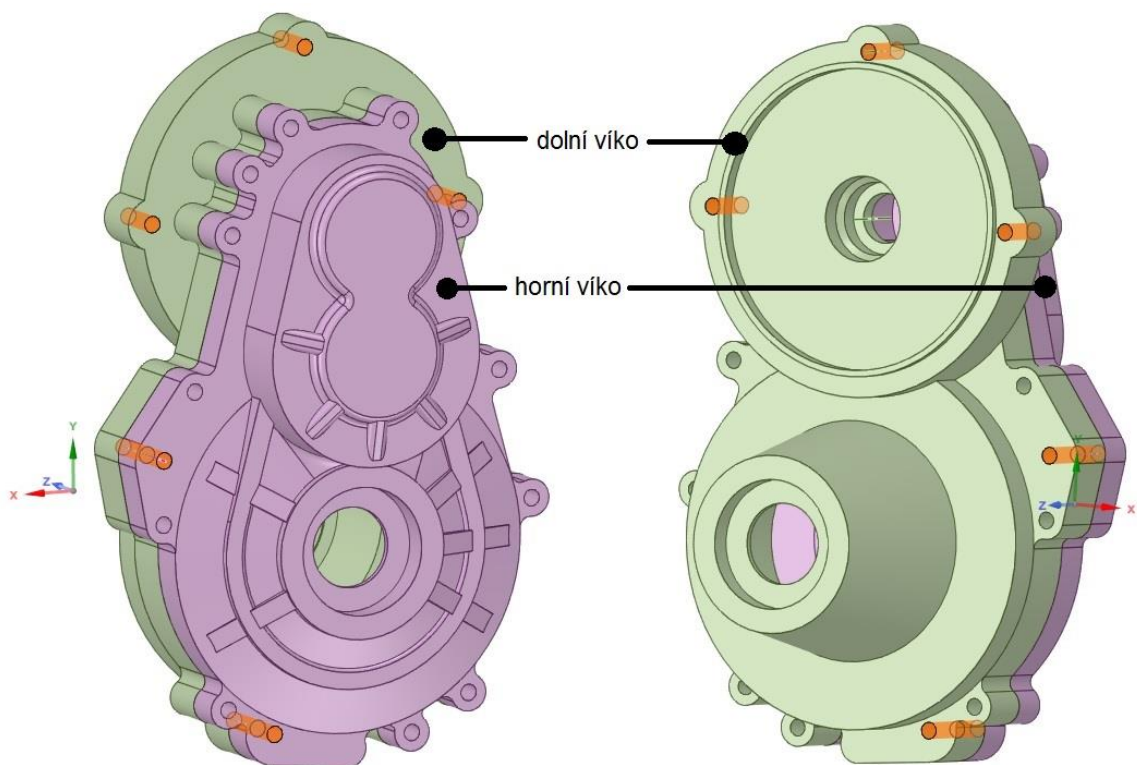
Obr. 4.2 b): náhled na vnitřní část dolního víka převodovky

Tímto byla vysvětlena geometrie jak horního, tak dolního víka převodovky a kapitola 4 pokračuje popisem modelu sestavy obou vík.

3.1.3 3D model sestavy skříně převodovky

Po podrobném popisu horního a dolního víka může nyní následovat model sestavy obou vík. 3D model na obr. 4.3 neobsahuje žádné spojovací prvky. Jelikož se jedná o sestavu pro MKP simulaci, jsou veškeré šroubové spoje nahrazeny patřičnými ideálními vazbami.

Na obrázku jsou také znázorněny oranžovou barvou díry, které zajišťují přimontování převodovky v automobilu. Ostatní díry slouží pro spojení vík.



Obr. 4.3: výsledný 3D model sestavy duralové skříně převodovky

3.2 Předpokládané výsledky

Kapitola 4 je uzavřena krátkou diskuzí, jaké výsledky jsou v simulaci skříně očekávány.

Simulace má posoudit tři hlavní kritéria, kterými jsou posuvy středů ložisek, napětí a tuhosti uložení hřídelů. Výsledky posuvů středů ložisek jsou následně srovnány s modelem „půl skříně“ (verzí B, viz. dále) tedy s modelem pouze horního víka a je následně uvažováno, zda je relevantní pro návrh horního víka neprovádět simulaci celé skříně, nýbrž pouze tohoto víka. To je důležité především kvůli odlišným okrajovým podmínkám – jakou roli bude hrát odlišnost okrajových podmínek skříně a samotného víka na výsledek posuvů středů ložisek. Toto je podrobněji vysvětleno v následující kapitole 5.

4. MKP model stávající duralové skříně převodovky

Po vysvětlení geometrie skříně převodovky lze nyní přistoupit k tvorbě MKP modelu. V následujících podkapitolách je ukázáno, jakým způsobem byla tvořena výpočtová síť, jaký typ této sítě byl použit, okrajové podmínky výpočtu a v závěru kapitoly jsou shrnuty výsledky simulací. Tato práce je zaměřena na posuzování horního víka převodovky, dolní víko analyzováno není a ve výsledcích se proto neobjevuje.

4.1 Stavba MKP modelu duralové skříně (varianta A)

Posuzovaná skříň převodovky je po stránce geometrie komplikované těleso. Tvoří ji dva hlavní díly – horní a dolní víko převodové skříně. Každý z dílů se vyznačuje střídáním tlustých a tenkých stěn, malých a velkých rádiusů a ploch a výztužným žebrováním. Tyto skutečnosti musely být brány v potaz při sestavování MKP modelů. Varianta modelu skříně převodovky složená z horního a dolního víka je dále nazývána pouze jako varianta A.

Materiálové vlastnosti duralu, ze kterého je skříň vyrobena, jsou uvedeny v *tab. 5.1*.

E [kN mm ⁻²]	G [kN mm ⁻²]	ϑ	$R_{p0,2}$ [kN mm ⁻²]	ρ [kg m ⁻³]
72	27,692	0,3	0,15	2700

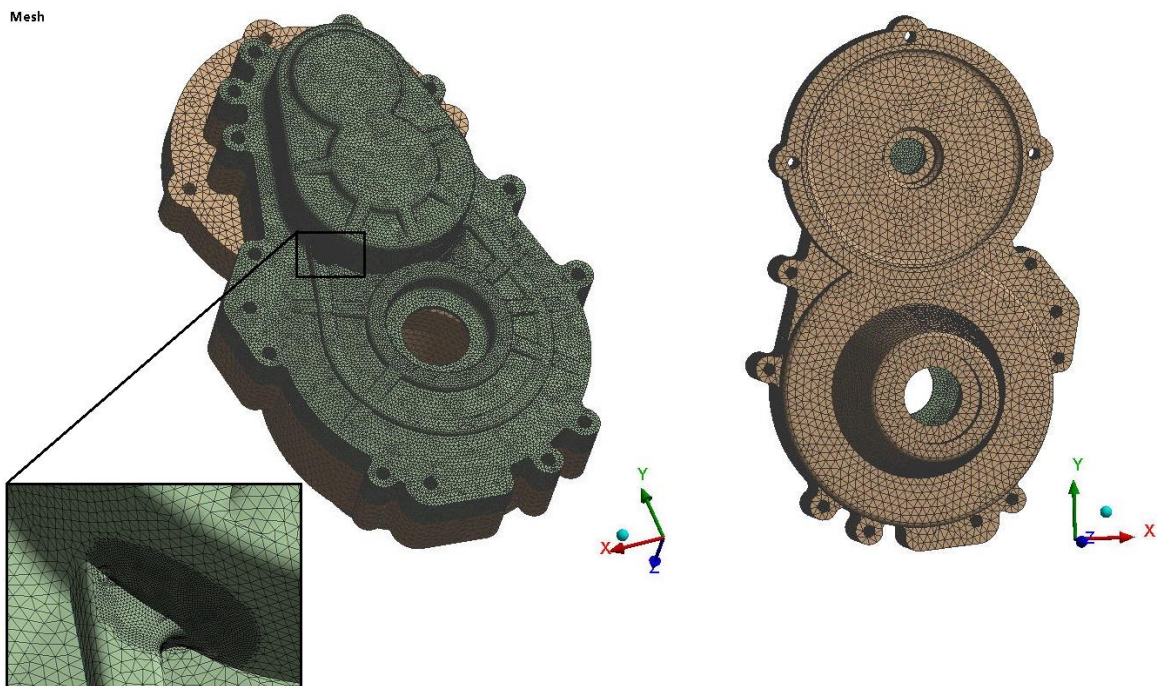
Tab. 5.1: materiálové vlastnosti duralu

4.1.1 Tvorba výpočtové sítě

Tvorba výpočtové sítě se odvíjela v jednotlivých případech od požadovaných výsledků. MKP modely mají společné použití tetragonální kvadratické sítě. Kvůli komplikované geometrii byla vyloučena síť hexagonální.

Pro posuzování napětí byla použita jemná síť (*obr. 5.1*). Velikost elementů posuzovaného horního víka byla 2 mm, velikost elementů dolního neposuzovaného víka 5 mm. Po vyhledání místa s maximálním napětím byly elementy v tomto místě dále zmenšovány pro dosažení přesnějších výsledků (detailní pohled na *obr. 5.1*).

Pro posuzování posuvů středů lůžek ložisek a jejich směrových tuhostí byla aplikována na obě víka síť o velikosti elementů 3 mm. Obrázek této sítě je zařazen do *příloha 1*.



Obr. 5.1: MKP model duralové skříně převodovky pro výpočet napětí

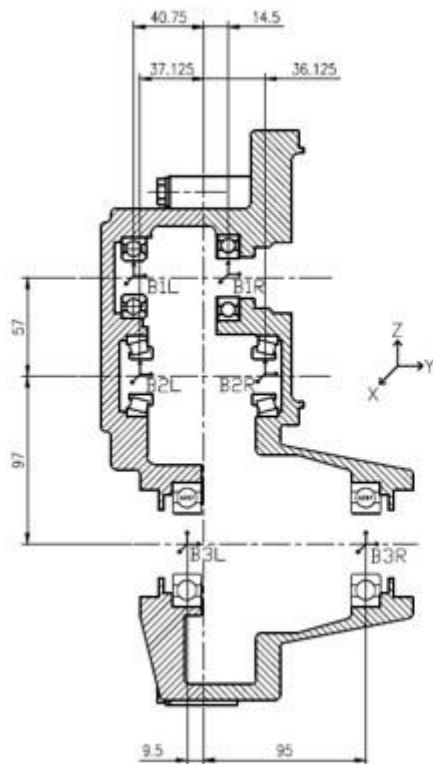
Horní víko: 2 mm síť se zjemněním v kritickém místě

Dolní víko: 5 mm síť

4.1.2 Aplikace sil

Aplikace sil probíhala pomocí *remote point*³ bodů do lůžek ložisek (obr. 4.1 b) a 4.2 b)). Tyto body jsou svázány s lůžky ložisek nedeformovatelnými vazbovými podmínkami. Předpokládá se, že deformace válcové plochy věnce s ložiskem bude zanedbatelná. Simulace byla prováděna pouze pro statické zatížení s maximálním namáháním, které je uvedeno v tab. 5.2. Na obr. 5.2 je k vidění řez skříní s uvedenými osovými vzdálenostmi ložisek. Na tomto výkresu je horní víko vlevo a dolní víko vpravo. Vypouklá část spodního víka slouží pro zorientování se.

³ Remote point – tato funkce vytvoří (v tomto případě) uprostřed lůžka bod a sváže ho nedeformovatelnými vazbovými podmínkami s lůžkem ložiska. V simulaci je tímto zanedbána deformace ložiska a s věncem je imaginárně pevně spojeno.

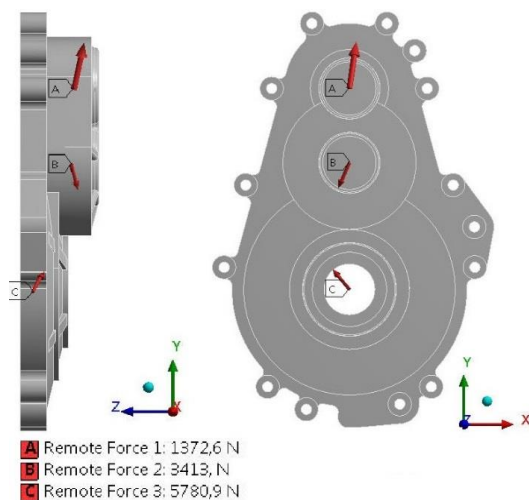


Ložisko	Síla F [N]		
	x	y	z
B1L	-192	-298	1 326
B1R	-599	1 328	914
B2L	1 323	-794	-3 043
B2R	-2 529	2 019	-4 028
B3L	3 433	-2 255	4 068
B3R	-1 436	0	2 028

Obr. 5.2: řez skříní převodovky s okótovanými pozicemi ložisek (vlevo)

Tab. 5.2 síly přenášené z ozubených kol do ložisek (vpravo)

Vektory sil na obr. 5.3 graficky znázorňují směry zatěžování víka. Pozor na odlišný souřadnicový systém použitý v obr. 5.2 a u 3D modelů víka. Víko je zatěžováno především v ose y. Za povšimnutí dále stojí, že síly jsou převážně v rovině xy (podle obr. 5.3). Toto bude dále zmíněno u kompozitové verze víka, kde budou tyto převažující síly zapříčiňovat zvýšený smyk.

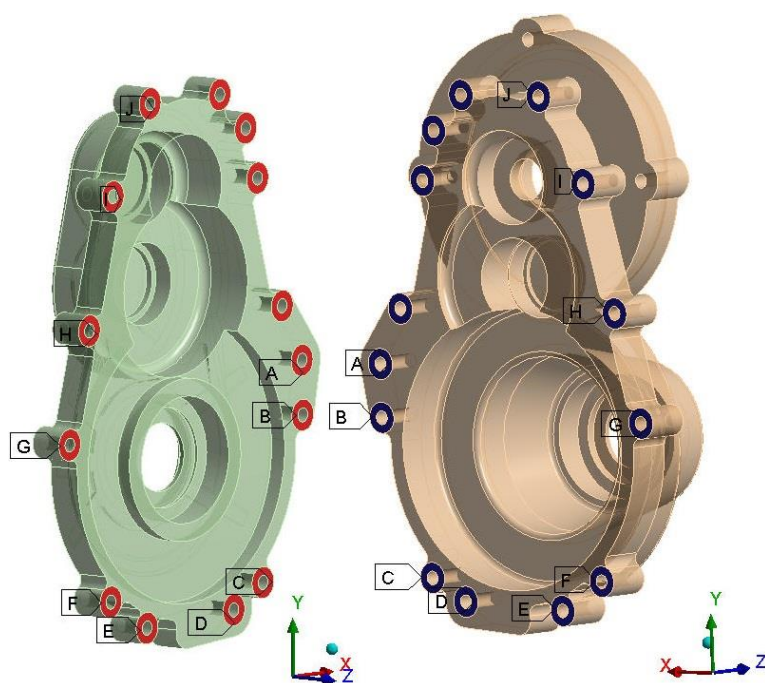


Obr. 5.3: znázornění vektorů sil aplikovaných ve středech jednotlivých lůžek ložisek; horní lůžko B1L, prostřední lůžko B2L, dolní lůžko B3L (vlevo – pohled zprava, vpravo – pohled zdola)

4.1.3 Aplikace okrajových a vazbových podmínek

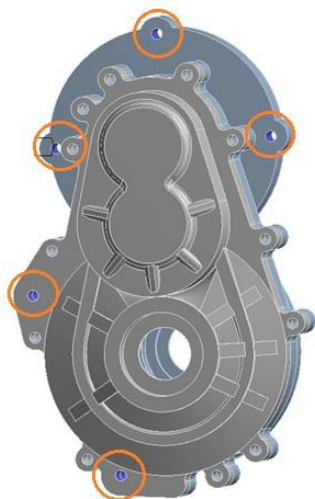
Správný způsob volby okrajových podmínek je pro každý výpočet velmi důležitý. Ze všech aspektů mívá nejvýznamnější vliv na správnost výsledků. Je důležité, aby byl co nejlépe znám způsob uchycení dané součástky nebo sestavy součástek v nadsestavě, případně i materiálové vlastnosti nadsestavy.

Obě víka byla spojena pomocí vazby *MPC bonded*⁴ na dělicí rovině v okolí děr pro šrouby. Na zbylé ploše není definována vazba, ani kontakt. Model tedy umožňuje penetraci obou vík do sebe, protože na zbylé ploše dělicí roviny není definována vazba ani kontakt. Tato penetrace se předpokládá jako velice malá, a proto je kontaktní úloha pro tento případ zanedbána (tato by případně způsobila nárůst napětí v místě styku obou vík). Obr. 5.4 ukazuje fixní vazbu mezi víky.



Obr. 5.4: aplikace fixních vazbových podmínek mezi víky – červeně, resp. modře zvýrazněno (víka v rozpuštěném pohledu)

⁴ Vazba MPC bonded napevno spojuje vybrané plochy těles



Obr. 5.5: aplikace fixních okrajových podmínek na skříň víka

Pro tento případ byly aplikovány okrajové podmínky dle poskytnutých informací. Použití pevných okrajových podmínek je na obr. 5.5. Tři otvory na přírubě a dva otvory na skříňi jsou uchyceny pevnou vazbou.

4.2 Výsledky simulací varianty A

Výše představený MKP model skříňe převodovky byl staticky zatížen. Cílem vyhodnocení bylo posoudit vzniklá napětí, posuvy středů ložisek a tuhosti uložení hřídelů. Napětí byla posuzována podle dvou hypotéz – energetické a maximálních smykových napětí.

4.2.1 Energetická hypotéza napětí

Kritérií pro vyhodnocení napětí bylo odvozeno několik, jako např. energetická hypotéza HMH, dále hypotéza maximálních smykových napětí, také například hypotéza Mohrova aj. Každá z těchto hypotéz je vhodná pro jiný typ materiálu a namáhání. V této části je uvažována právě energetická hypotéza HMH vhodná pro houževnaté materiály, které jsou vystaveny víceosému zatížení.

Název energetická pochází od deformační energie akumulované v materiálu, který je vystaven deformování. Teorie říká, že dojde k porušení materiálu v okamžiku, kdy tato deformační energie v jednotkovém objemu materiálu vystavenému jakémukoli typu zatížení překročí kritickou deformační energii v jednotkovém objemu materiálu vystavenému jednoosému zatížení. [14] Vztah (5 – 1), podle kterého lze určit toto napětí ve vyšetřovaném bodě, má tvar:

$$\sigma_{red}^{HMH} = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2}{2}} \leq R_{p0,2}, \quad [\text{MPa}] \quad (5 - 1)$$

kde σ_1 , σ_2 a σ_3 jsou velikosti hlavních napětí a $R_{p0,2}$ značí mez kluzu, vůči které je redukované napětí posuzováno. Bezpečnost k vůči mezi kluzu lze získat obecně ze vztahu (5 – 2):

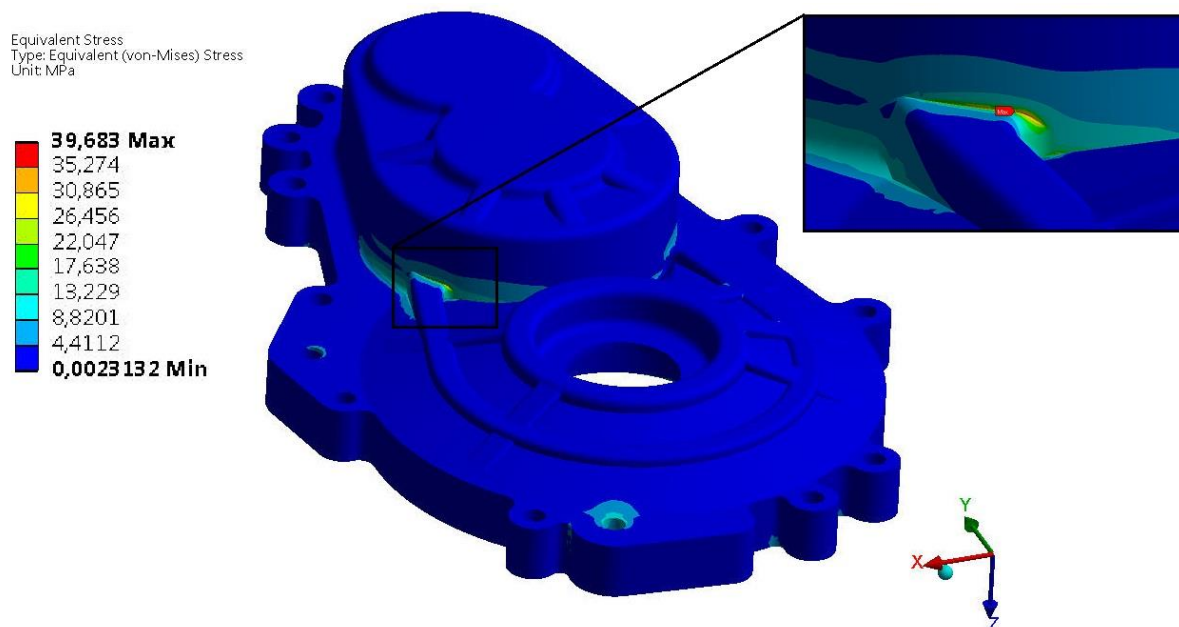
$$k = \frac{R_{p0,2}}{\sigma_{red}} \quad [-] \quad (5 - 2)$$

4.2.2 Vyhodnocení napětí podle energetické hypotézy

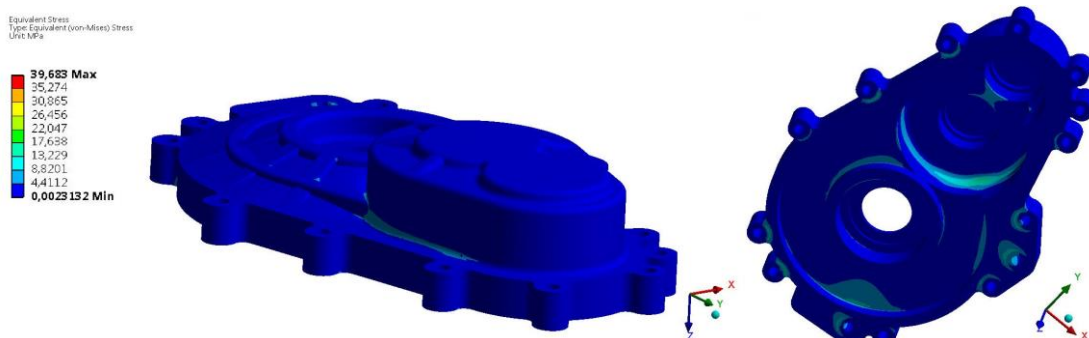
Podle výše zmíněné energetické hypotézy byla provedena simulace a zjištěny následující napětí na horním víku. V sestavě skříně byla zatížena pouze lůžka horního víka. Výsledná napětí jsou zobrazeny na *obr. 5.6*. Spodní víko není na obrázku uvedeno.

Z *obr. 5.6* je patrné, že maximum nastává v místě přechodu žebra a domku, a to přesně v rohu. V rozích konstrukcí bývají kritická místa v důsledku koncentrace napětí, jak platí i v tomto případě. Podle energetické hypotézy činí napětí v tomto místě 39,683 MPa. Na stejném obrázku si lze dále v přední části povšimnout zvýšeného napětí kolem díry s fixní okrajovou podmínkou (konkrétně 12,4 MPa).

Velmi ostrý gradient napětí v oblasti s nejvyšším napětím vypovídá o dobré hustotě použité sítě.



Obr. 5.6: výsledky simulace napětí skříně varianty A podle hypotézy HMM (detailní pohled na místo s maximálním napětím)



Obr. 5.7: výsledky simulace napětí skříňě varianty A podle hypotézy HMM (vlevo – pohled na zadní část víka, vpravo – pohled na spodní část víka)

Na obr. 5.7 vpravo je zřetelné zvýšené namáhání v okolí děr pro šrouby. Toto namáhání vzniká na dělicí rovině víka v místech, kde fixní vazby mezi víky skokově přechází v plochu bez vazeb. Dochází zde proto k přídavnému namáhání. V reálném případě budou napětí v těchto místech nižší.

Zjištěná statická bezpečnost vůči napětí je následující:

$$k = \frac{R_{p0,2}}{\sigma_{red}} = \frac{150 \text{ MPa}}{39,683 \text{ MPa}} = 3,78,$$

což je vyhovující.

4.2.3 Hypotéza maximálních smykových napětí

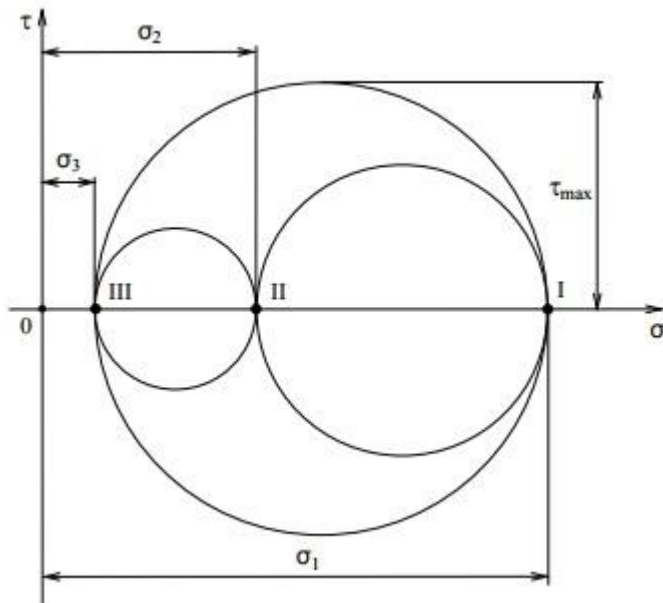
Pro houževnaté materiály, u kterých dochází před porušením k velkým plastickým deformacím, lze také použít vyhodnocení napětí pomocí hypotézy maximálních smykových napětí (též nazývané jako Trescova nebo Guestova hypotéza). Tato hypotéza říká, že o pevnosti součásti rozhoduje velikost maximálního smykového napětí. [15] Toto napětí se vypočítá podle vztahu (5 – 3).

Výpočet pomocí programu ANSYS Mechanical udává výsledky právě smykového napětí τ . Aby byla Trescova hypotéza porovnatelná s energetickou, je nutné znát rovněž redukované napětí podle této hypotézy, které se spočte podle vztahu (5 – 4).

$$\tau_{max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \leq \tau_D \quad [\text{MPa}] \quad (5 - 3)$$

$$\sigma_{red}^{\tau \text{ max}} = \sigma_1 - \sigma_3 = 2 \tau_{max} \leq R_{p0,2} \quad [\text{MPa}] \quad (5 - 4)$$

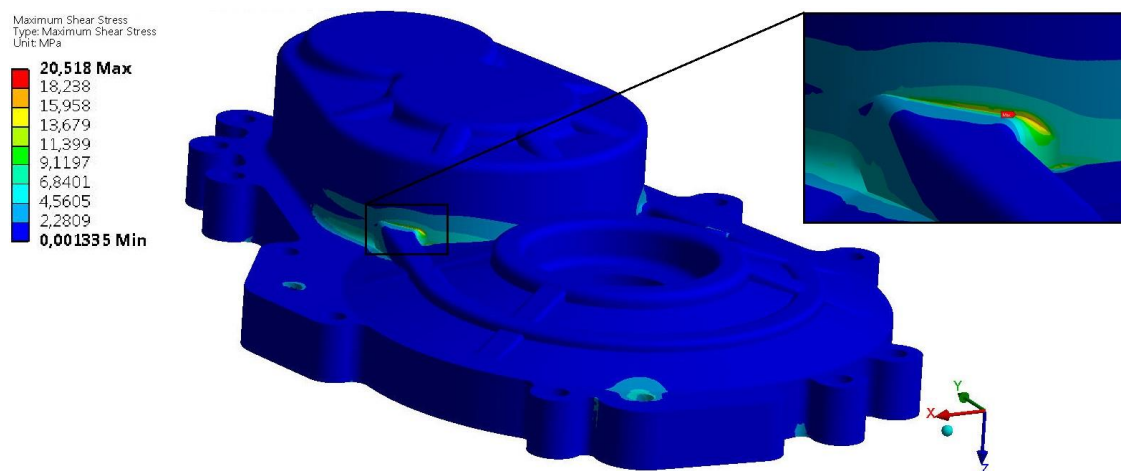
Kde σ_1 a σ_3 jsou opět hlavní napětí, τ_{max} je maximální smykové napětí. τ_D je smykové napětí při jednoosé napjatosti odpovídající dovolenému namáhání. [15] Názorně je tento princip pro trojosou napjatost zobrazen na obr. 5.8.



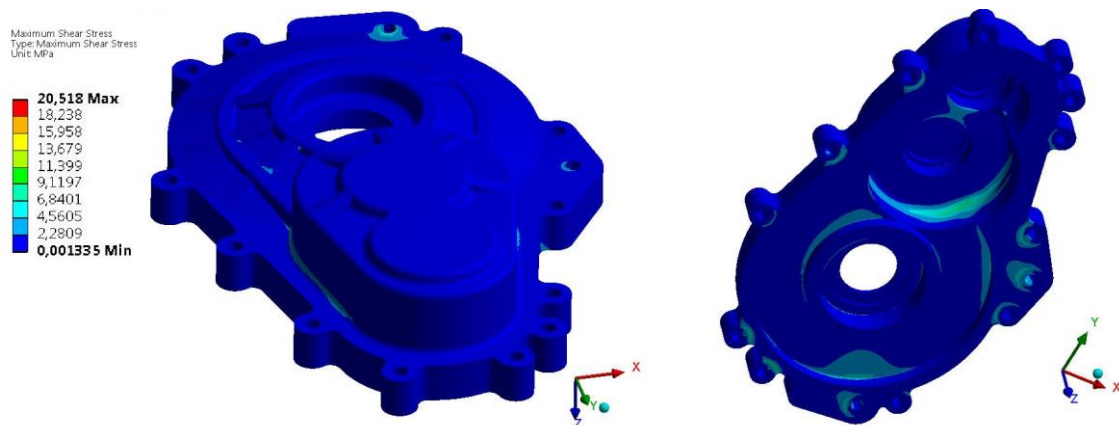
Obr 5.8: Mohrův diagram s vyznačeným maximálním smykovým napětím pro trojosou napjatost [14]

4.2.4 Vyhodnocení napětí podle hypotézy maximálních smykových napětí

Nyní následuje ve stručnosti shrnutí maximálních smykových napětí skříně. Obr. 5.9 a 5.10 obsahují výsledky simulace podle této hypotézy.



Obr. 5.9: výsledky simulace napětí skříně varianty A podle hypotézy maximálních smykových napětí (pohled na místo s maximálním napětím)



Obr. 5.10: výsledky simulace napětí skříně varianty A podle hypotézy maximálních smykových napětí (vlevo – pohled na zadní část víka, vpravo – pohled na spodní část víka)

Maximum nastává ve stejném místě, jako u energetické hypotézy (přesný bod se však může lišit). V tomto místě je redukované napětí dvojnásobkem maximálního smykového napětí získaného ze simulace a dle následujícího výpočtu má hodnotu 41,036 MPa (o 3,4 % více než podle hypotézy HMH).

$$\sigma_{red}^{\tau max} = \sigma_1 - \sigma_3 = 2 \tau_{max} = 2 \cdot 20,518 = 41,036 \text{ MPa}$$

Výsledná statická bezpečnost je následující:

$$k = \frac{R_{p0,2}}{\sigma_{red}} = \frac{150 \text{ MPa}}{41,036 \text{ MPa}} = 3,66,$$

což rovněž vyhovuje.

4.2.5 Vyhodnocení posuvů středů ložisek

Maximální dovolené posuvy ložisek nejsou od zadavatele k dispozici. Lze ovšem předpokládat, že tato varianta skříně povolené posuvy při aplikaci totožných sil a okrajových podmínek splňuje. V tab. 5.3 jsou uvedeny výsledky posuvů středů ložisek v absolutním souřadnicovém systému.

Vyhodnocování posuvů hraje v této práci významnější roli než napětí, proto byl proveden výpočet i pro hrubší síť 5 mm, aby se zjistila závislost na velikosti elementů. V tab. 5.4 jsou uvedeny hodnoty posuvů pro výpočtovou síť 5 mm a procentuální srovnání se sítí o velikosti 3 mm. Je patrné, že rozdíl celkových posuvů se liší o 0,8 až 1,4 %. Pro opětovné výpočty je vhodné kvůli zkrácení výpočetního času použít hrubší síť.

Posuv [mm]	Střed ložiska		
	B1L	B2L	B3L
u	-5,64E-04	-1,85E-03	-3,09E-03
v	1,83E-03	1,19E-03	3,17E-03
w	-2,72E-03	-7,36E-03	-9,24E-03
Celkový	3,33E-03	7,68E-03	1,02E-02

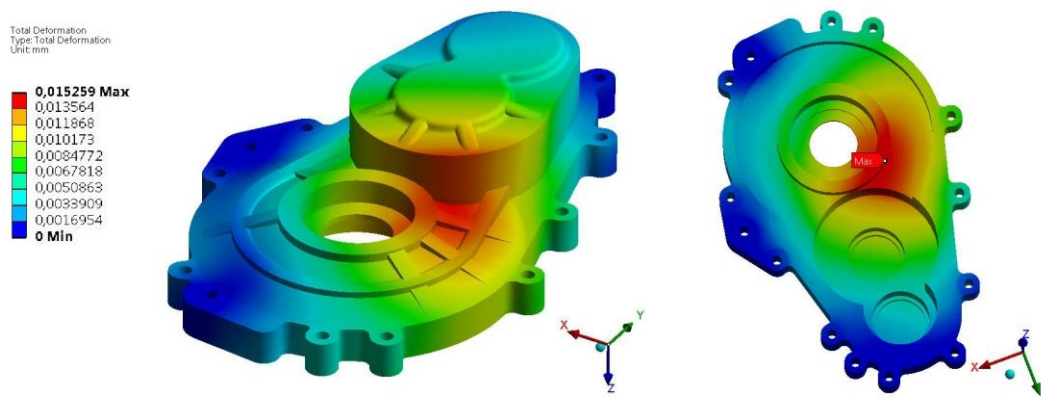
Tab. 5.3: hodnoty posuvů středů ložisek pro skříň varianty A (sít velikosti 3 mm)

Posuv [mm]	Střed ložiska		
	B1L	B2L	B3L
u	-5,60E-04	-1,84E-03	-3,07E-03
v	1,80E-03	1,17E-03	3,16E-03
w	-2,71E-03	-7,30E-03	-9,10E-03
Celkový	3,30E-03	7,62E-03	1,01E-02
Změna oproti síti 3 mm [%]			
u	0,7	0,7	0,7
v	1,5	1,7	0,4
w	0,5	0,9	1,6
Celkový	0,8	0,9	1,4

Tab. 5.4: hodnoty posuvů středů ložisek pro skříň varianty A (sít velikosti 5 mm)

4.2.6 Vyhodnocení posuvů skříně

Kromě posuvů středů ložek je zmíněna celková deformace víka. Tato je zobrazena na obr. 5.11.



Obr. 5.11: barevné zobrazení celkových deformací skříně varianty A (vlevo – horní pohled, vpravo – dolní pohled s vyznačeným bodem maximálního posuvu)

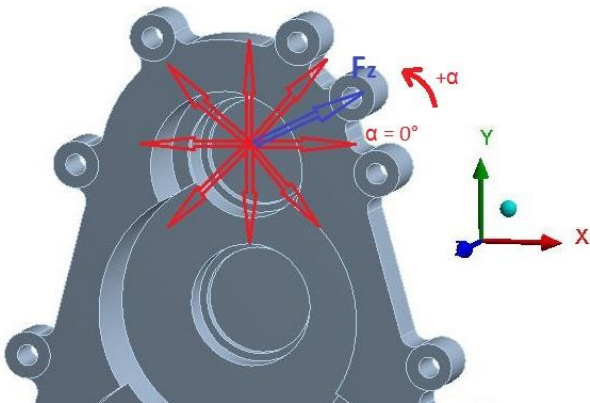
Porovná-li se obr. 5.11 celkových deformací s obr. 5.3 aplikovaných sil, nachází se oblast s vyššími posuvy ve směru sil aplikovaných v B2L (3413 N) a B3L (5780,9 N).

4.2.7 Vyhodnocení směrových tuhostí

Pro správnou funkci stroje je vždy důležitá jeho tuhost. Výpočet směrových tuhostí byl proveden následovně. Do určitého směru ve středu analyzovaného lůžka byla aplikována známá síla F a změřen celkový posuv u_{celk} tohoto bodu. Následně byla podle vztahu (5 – 5) získána hodnota tuhosti.

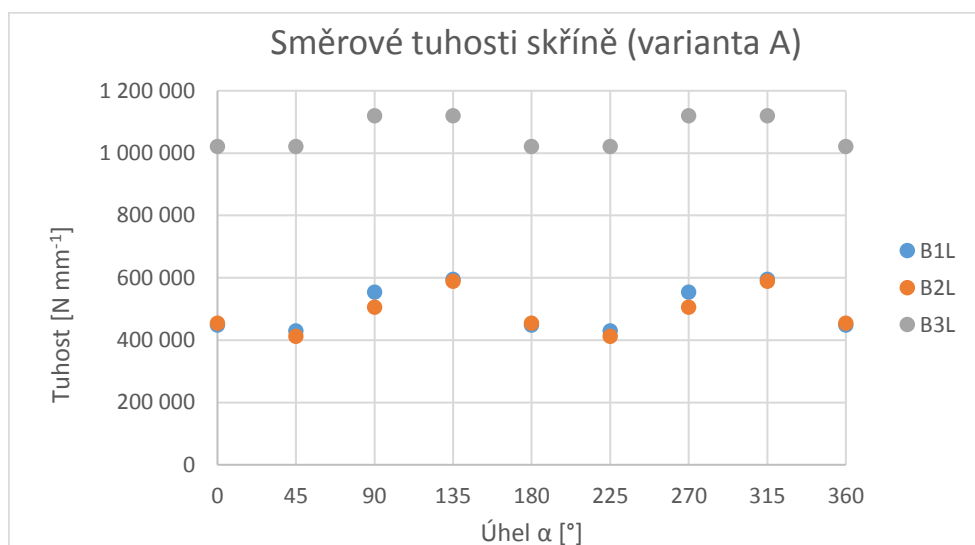
$$k = \frac{F}{u_{celk}}. \quad (5 - 5)$$

Obr. 5.12 ukazuje orientaci úhlu α .



Obr. 5.12: orientace úhlu α směrových tuhostí (zde pro lůžko B1L)

Získané hodnoty směrových tuhostí v tab. 5.5 byly vyneseny do následujícího grafu 5.1.



Graf 5.1: směrové tuhosti skříně varianty A (věnce B1L, B2L a B3L)

Z grafu 5.1 je zřetelná podobnost tuhostí věnců B1L a B2L nacházejících se ve společném domku. Věnc B3L naproti tomu vykazuje podstatně vyšší tuhost (neplatí ale pro axiální směr). Konstrukce domku pravděpodobně snižuje tuhost uložení. Velký vliv na tuhost má i pozice okrajových podmínek skříně. Ložiska B1L a B2L se nacházejí od pevně uchycených děr příruby přibližně ve stejné vzdálenosti, jako ložisko B3L od dvou fixně upevněných děr horního víka. Proto rozhoduje v tomto případě o nižší tuhosti pravděpodobně konstrukce domku.

Tab. 5.5 obsahuje dále výsledky axiálních tuhostí. Maximální tuhost vykazují naopak lůžka B1L a B2L v domku, nejnižší lůžko B3L.

Lůžko	Úhel α [°]	Tuhost k [N mm ⁻¹]
B1L	0	447 727
	45	429 665
	90	554 338
	135	594 719
	180	447 727
	225	429 665
	270	554 338
	315	594 719
	360	447 727
	Axiální (osa z)	570 949
B2L	0	453 848
	45	411 959
	90	505 333
	135	589 281
	180	453 848
	225	411 959
	270	505 333
	315	589 281
	360	453 848
	Axiální (osa z)	289 387
B3L	0	1 021 733
	45	1 021 486
	90	1 119 458
	135	1 119 402
	180	1 021 733
	225	1 021 486
	270	1 119 458
	315	1 119 402
	360	1 021 733
	Axiální (osa z)	231 259

Tab. 5.5: výsledky směrových tuhostí skříně varianty A

4.3 Stavba MKP modelu duralové skříně (varianta B)

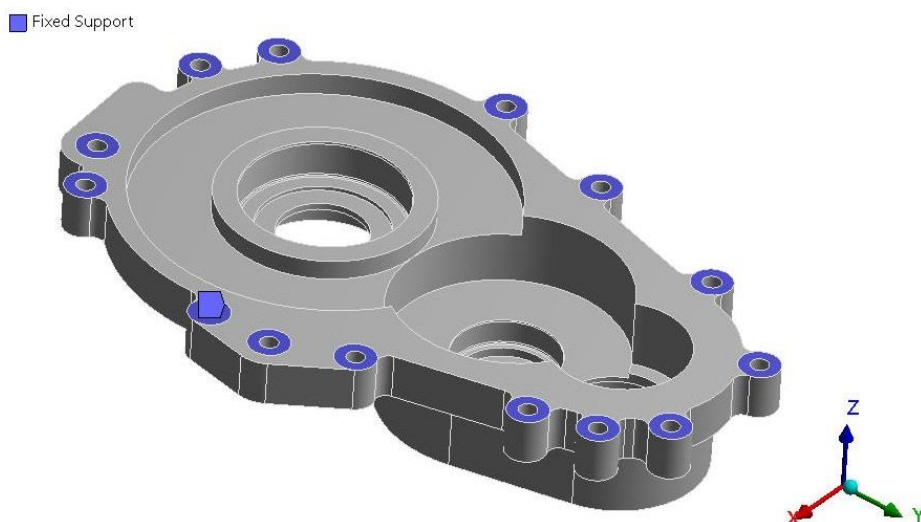
V předešlé podkapitole 5.2 byla podrobena simulaci celá skříně převodovky. Tato podkapitola je zaměřena pouze na horní víko, které je simulováno samostatně a je označeno jako varianta B. Zde stojí za připomenutí cíl práce, a tím je návrh kompozitové varianty horního víka. Proto je nyní zaměřeno pouze na tento díl, zatím v duralové verzi. Úkolem bylo opět určit a vyhodnotit vzniklá napětí a posuvy středů ložisek, resp. tuhosti. Tyto výsledky dále slouží v kapitolách 7 a 8 při analýze získaných hodnot kompozitové verze jako porovnávací údaje.

4.3.1 Tvorba MKP sítě, aplikace sil a okrajové podmínky

Výpočetní MKP model byl proveden analogicky, jako model celé skříně, pouze s odlišnými okrajovými podmínkami.

Pro výpočet napětí byla použita totožná výpočetní síť, jak lze vidět na dříve uvedeném *obr. 5.1* (i se stejným umístěním zjemněné sítě). Pro výpočet tuhostí a posuvů je použita dále stejná síť, jako v případě varianty A. Jedná se vždy o kvadratickou tetragonální síť (pro výpočet tuhostí a posuvů navíc zcela uniformní síť).

Aplikace okrajových podmínek probíhala podle *obr. 5.13*. Okolí děr pro šrouby, které byly u varianty A připevněny ke spodnímu víku vazbou *MPC bonded*, jsou nyní nehybně upevněny okrajovou podmínkou.



Obr. 5.13: aplikace fixních okrajových podmínek pro simulaci horního duralového víka převodovky varianty B

Volba okrajových podmínek je problematická, jelikož odebráním spodního víka byly odstraněny tři pevně uchycené díry příruby a tím porušen stav blízký se provoznímu. Musel být nalezen

kompromis. Oním kompromisem bylo pevné ukotvení kruhových okolí děr na průměru 18 mm fixní vazbou (průměr děr je 8 mm).

Síly byly aplikovány stejným způsobem, jako u varianty A.

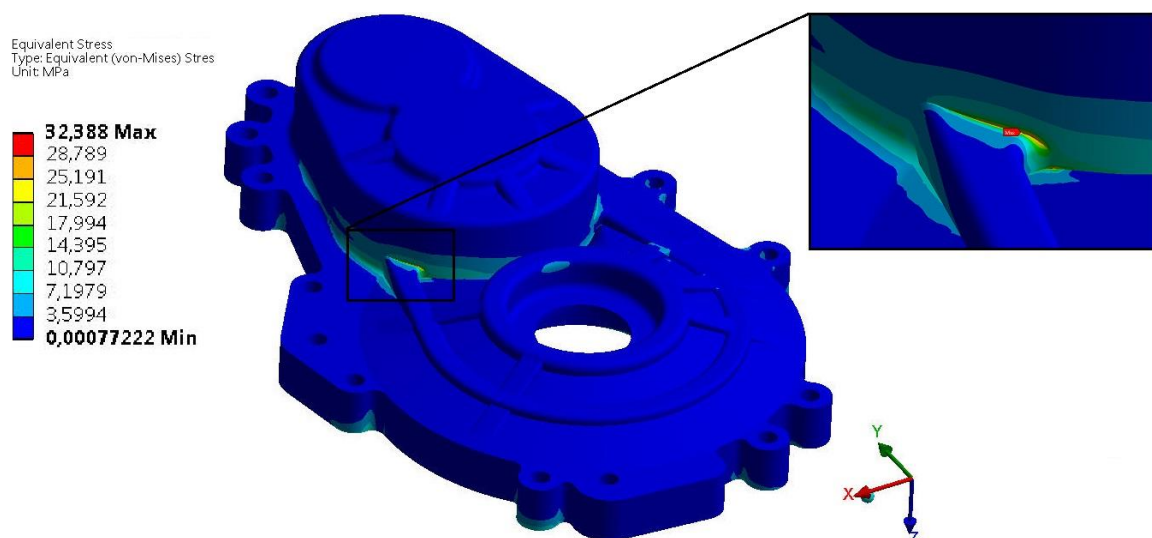
V další podkapitole následuje vyhodnocení simulace varianty B.

4.4 Výsledky simulací varianty B

Analogicky, jako v případě A, bylo provedeno vyhodnocení skříně i pro variantu B. Výsledky jsou uvedeny v následujících podkapitolách.

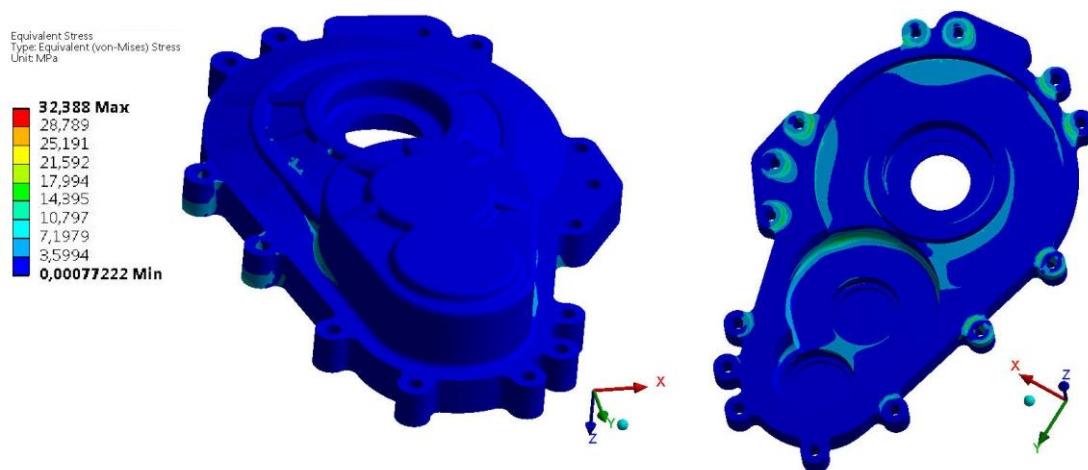
4.4.1 Vyhodnocení napětí podle energetické hypotézy

Nejprve je ukázán výsledek simulace na *obr. 5.14*. Poloha nejvíce zatěžovaného místa je totožná jako u varianty A. Maximální redukované napětí v tomto bodě se liší. Jeho hodnota je 32,388 MPa (oproti 39,683 MPa u varianty A, tedy o 18,4 % méně). Použití pevných okrajových podmínek podle *obr. 5.13* vede ke snížení napětí. Celé víko je pevněji uchyceno v prostoru.



Obr. 5.14: výsledky simulace napětí skříně varianty B podle hypotézy HMM (pohled na místo s maximálním napětím)

Na *obr. 5.15* je pohled na zadní a spodní část víka. Na tomto obrázku vpravo je opět zřetelné zvýšené napětí v místech děr pro šrouby, které je způsobeno pevnými okrajovými podmínkami a v reálném případě bude nižší.



Obr. 5.15: výsledky simulace napětí skříně varianty B podle hypotézy HMM (vlevo – pohled na zadní část víka, vpravo – pohled na spodní část víka)

Statická bezpečnost vůči mezi kluzu byla zjištěna i pro tento případ a je následovná:

$$k = \frac{R_{p0,2}}{\sigma_{red}} = \frac{150 \text{ MPa}}{32,388 \text{ MPa}} = 4,63.$$

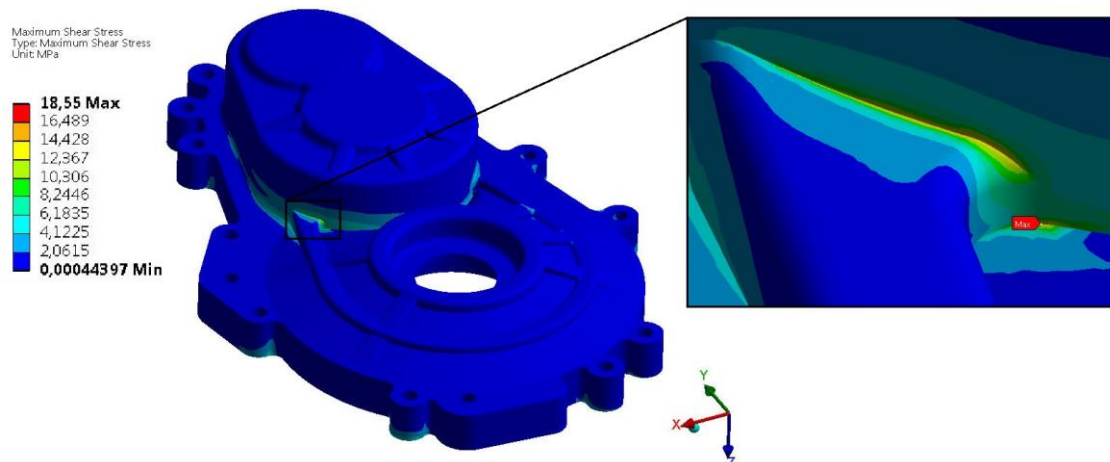
4.4.2 Vyhodnocení napětí podle hypotézy maximálních smykových napětí

Podle obr. 5.16 dochází k maximálnímu napětí opět v místě styku žebra a domku. Na rozdíl od minulých případů je však toto místo posunuto a nenachází se na čele žebra, ale na jeho patě v rohu. Podle výpočtu je maximální redukované napětí v tomto místě 37,1 MPa (oproti 41,036 MPa u varianty A, tedy o 9,6% méně). Při srovnání s energetickou hypotézou varianty B je redukované napětí o 14,5 % vyšší.

$$\sigma_{red}^{\tau max} = \sigma_1 - \sigma_3 = 2 \tau_{max} = 2 \cdot 18,550 = 37,1 \text{ MPa}$$

Statická bezpečnost vychází následovně:

$$k = \frac{R_{p0,2}}{\sigma_{red}} = \frac{150 \text{ MPa}}{37,1 \text{ MPa}} = 4,04.$$



Obr. 5.16: výsledky simulace napětí skříňe varianty B podle hypotézy maximálních smykových napětí (pohled na místo s maximálním napětím)

4.4.3 Vyhodnocení posuvů středů ložisek

V tab. 5.6 jsou uvedeny výsledky posuvů středů ložisek v absolutním souřadnicovém systému pro variantu B. Srovnání s předešlou variantou a diskuse budou následovat v podkapitole 5.5.

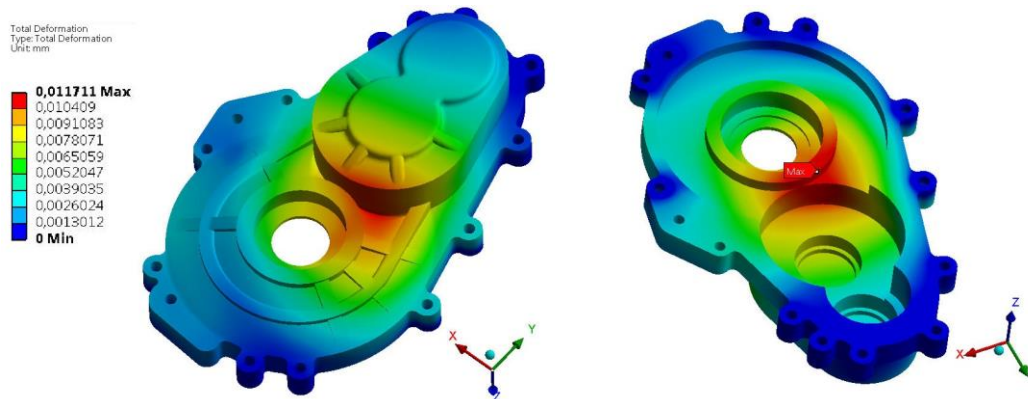
Posuv [mm]	Střed ložiska		
	B1L	B2L	B3L
u	-1,05E-03	-2,45E-03	-3,18E-03
v	5,61E-04	-9,34E-05	2,82E-03
w	-1,05E-03	-4,10E-03	-4,90E-03
Celkový	1,59E-03	4,78E-03	6,49E-03

Tab. 5.6: hodnoty posuvů středů ložisek pro skříň varianty B

Tyto hodnoty slouží jako referenční a jsou k nim vztaženy posuvy při navrhování a optimalizaci kompozitového víka v kapitolách 7 a 8.

4.4.4 Vyhodnocení posuvů skříňe

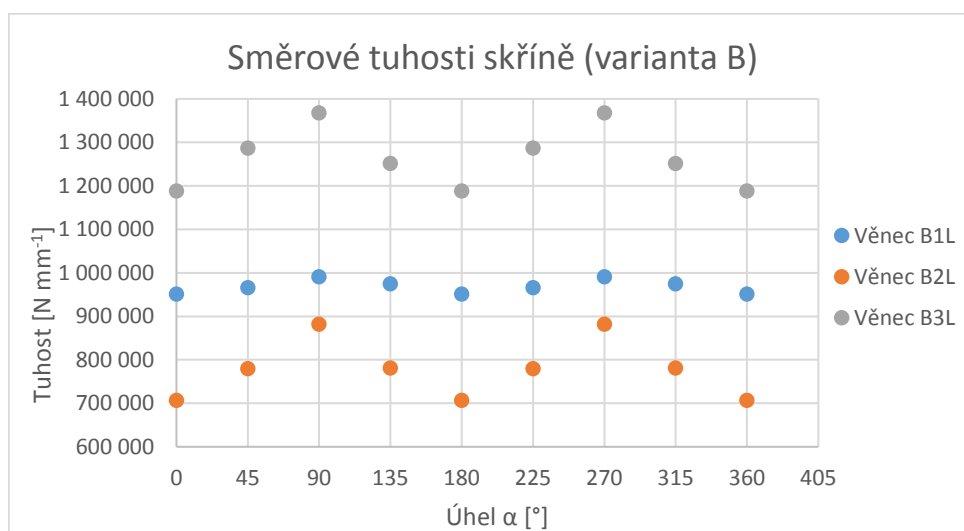
Stejně jako v případě A, nastává maximum posuvu na rohu věnce B3L. Porovná-li se obr. 5.17 s obr. 5.11, je v tomto případě vidět posun bodu více do středu víka (i celá červená oblast). Jelikož jsou pevně uchyceny plochy všech děr pro šrouby, není povolena taková deformace směrem do strany, nýbrž se přesunuje více do středu víka. Maximální deformace je v tomto případě 0,0117 mm (v případě verze A je tomu 0,0153 mm, tedy o 30,8 % více).



Obr. 5.17: barevné zobrazení celkových deformací skříňě varianty B (vlevo – horní pohled, vpravo – dolní pohled s vyznačeným bodem maximálního posuvu)

4.4.5 Výsledky směrových tuhostí

V následujícím grafu 5.2 jsou vyneseny směrové tuhosti středů ložek pro variantu B. Přesné hodnoty se nachází v tab 5.7.



Graf 5.2: směrové tuhosti skříňě varianty B (věnce B1L, B2L a B3L)

Z grafu 5.2 je viditelná periodičnost tuhosti pro $\alpha \pm 180^\circ$. Ta je dána izotropií duralu. Aplikuje-li se síla ve směru úhlu 0° , má opačný směr než ve směru 180° . V jednom případě je v materiálu vyvolán tlak, v opačném případě tah. Tuhosti jsou tímto totožné pro úhel $\alpha \pm 180^\circ$. V grafu 5.1 toto na první pohled viditelné není.

Lůžko	Úhel α [°]	Tuhost k [N mm ⁻¹]
B1L	0	951 374
	45	966 283
	90	990 786
	135	975 030
	180	951 374
	225	966 283
	270	990 786
	315	975 030
	360	951 374
	Axiální (osa z)	1 101 911
B2L	0	707 207
	45	779 525
	90	881 981
	135	781 272
	180	707 207
	225	779 525
	270	881 981
	315	781 272
	360	707 207
	Axiální (osa z)	510 343
B3L	0	1 188 322
	45	1 287 236
	90	1 368 204
	135	1 251 497
	180	1 188 322
	225	1 287 236
	270	1 368 204
	315	1 251 497
	360	1 188 322
	Axiální (osa z)	475 448

Tab. 5.7: výsledky směrových tuhostí skříně varianty B

4.5 Srovnání výsledků varianty A a B

V poslední podkapitole MKP modelu duralové skříně převodovky je srovnáno, jak se liší posuvy středů ložisek za použití dvou odlišných okrajových podmínek. Porovnání ukazuje, jak se změna okrajových podmínek projeví na posuvech středů lůžek a zda je vhodné toto zjednodušení použít.

Výsledky srovnání, jak se změnily posuvy verze B oproti verzi A, jsou uvedeny v *tab. 5.8*.

Změna posuvu verze B oproti A [%]	Střed ložiska		
	B1L	B2L	B3L
u	86	32	3
v	-69	-108	-11
w	-61	-44	-47
Celkový	-52	-38	-37

Tab. 5.8: srovnání posuvů duralové skříňě varianty A a B

Hodnoty byly získány podle vztahu (5 – 6):

$$\text{Změna posuvu} = \frac{\text{posuv}_B - \text{posuv}_A}{\text{posuv}_A} 100. \quad [\%] \quad (5 - 6)$$

Z porovnaných výsledků v tab. 5.8 jsou změny celkových posuvů -37% pro B3L až -52% pro B1L. Posuvy u ve směru osy x vykazují naopak nárůst. Tento nárůst je pravděpodobně kompenzací omezení posuvů v a w .

Ačkoli okrajové podmínky přibližně o jednu třetinu až jednu polovinu omezily pohyb středů ložisek, bude kompozitové víko v kapitole 7 simulováno podle stejných podmínek a srovnáváno s variantou B. Bude se předpokládat, že výsledky získávané při tomto srovnávání budou přenositelné na reálný stav zatížení.

V tab. 5.9 jsou dále porovnána napětí a statické bezpečnosti vůči mezi kluzu obou variant.

		Verze A	Verze B
Maximální redukované napětí σ_{red} podle teorie [MPa]	HMH	39,683	32,388
	τ_{max}	41,036	37,100
Bezpečnost k podle teorie [-]	HMH	3,78	4,63
	τ_{max}	3,66	4,04

Tab. 5.9: porovnání bezpečností a redukovaných napětí variant A a B

V posledním jsou srovnány tuhosti verze B oproti A. O změně tuhostí vypovídá tab. 5.10.

Lůžko	Úhel α [°]	Změna tuhosti [%]
B1L	0	112,5
	45	124,9
	90	78,7
	135	63,9
	180	112,5
	225	124,9
	270	78,7
	315	63,9
	360	112,5
	Axiální	93,0
B2L	0	55,8
	45	89,2
	90	74,5
	135	32,6
	180	55,8
	225	89,2
	270	74,5
	315	32,6
	360	55,8
	Axiální	76,4
B3L	0	16,3
	45	26,0
	90	22,2
	135	11,8
	180	16,3
	225	26,0
	270	22,2
	315	11,8
	360	16,3
	Axiální	105,6

Tab 5.10: změna tuhosti skříňě varianty B oproti A

Poměrně vysoké odlišnosti tuhostí (i posuvů středů ložisek) nevypovídají o tom, že zjednodušený postup výpočtu horního víka (kdy je navrhováno samostatně, a nikoli v sestavě celé skříňě), povede ke špatným výsledkům. Předpoklad je takový, že takové relativní rozdíly, které bude vykazovat kompozitové víko za použití okrajových podmínek z varianty B, bude vykazovat i za použití okrajových podmínek uvedených u varianty A. Jinak řečeno, že by mělo obdobné chování. Porovnání vypovídá pouze o významu změny okrajových podmínek, která v tomto případě způsobuje odlišnosti v tuhostech převyšující místy 100%. Srovnáním zjištěných výsledků je možné přejít k představení a tvorbě kompozitového víka, čemuž je věnována druhá polovina práce.

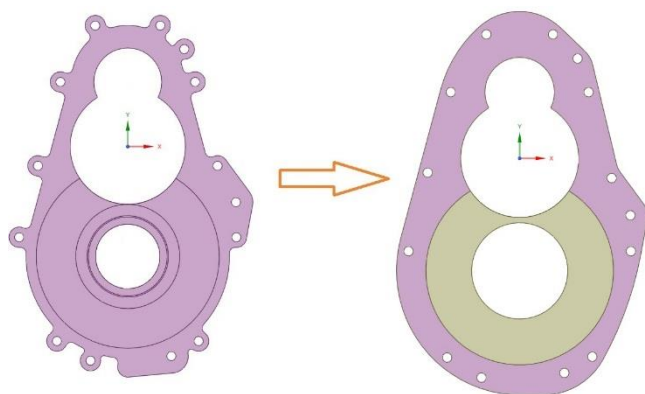
5. Tvorba 3D modelu kompozitového víka

Návrh geometrických úprav a tvorba 3D modelu pro MKP výpočty probíhala úpravou geometrie duralového víka. Předpokládanou metodou výroby byla zvolena technologie kontaktní laminací a tomu odpovídal od počátku i návrh úprav tvaru horního víka převodovky. Základ výroby tvoří výroba tlustostěnné desky s různým odstupňováním tlouštěk stěn a integrováním kovových (duralových) věnců pro uložení ložisek hřídelů. Tvarově složitý odlitek musí být při aplikaci technologie laminace vrstev geometricky „zjednodušen“ a další tvarové změny budou realizovány jeho obrobením (frézováním, vrtáním otvorů atp.). Odtud vycházejí i navržené změny. „Oka“ s dírami pro šrouby byla olemována do základní desky víka, byla odstraněna vyztužovací žebra, která mohou být poté nahrazena např. aplikací výztuh z vysokomodulového vlákna (viz výše popsaná technologie Biontec) a též byl pozměněn kuželový přechod v oblasti ložiska B3L.

5.1 Úprava geometrie

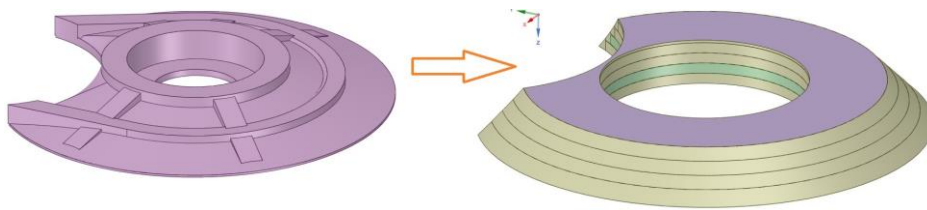
Na následujících obrázcích (*obr. 6.1, 6.2 a 6.3*) je uvedeno, jak byla měněna geometrie duralového víka na geometrii kompozitového víka.

Obr. 6.1 ukazuje změnu geometrie desky horního víka. Tloušťka zůstala nezměněna.



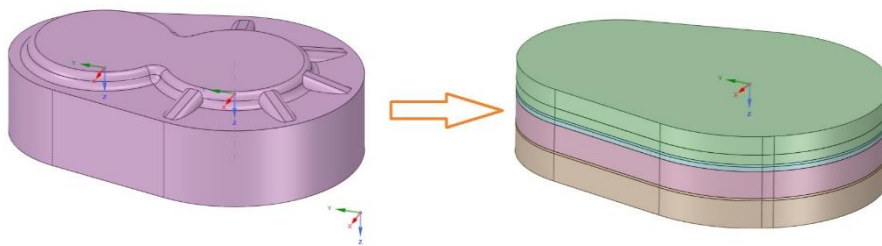
Obr. 6.1: změna geometrie desky horního víka; tloušťka nezměněna

Další *obr. 6.2* popisuje změnu geometrie kuželovité plochy na vnější straně víka v oblasti ložiska B3L. Pro získání dostatečné tuhosti byl přidán materiál, výška zůstala nezměněna.



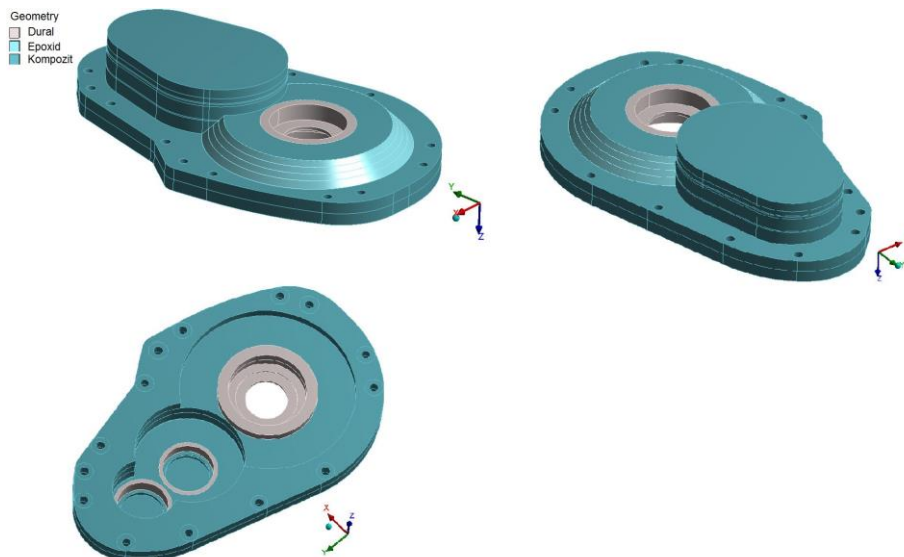
Obr. 6.2: změna geometrie kuželovité plochy na vnější straně víka v okolo ložiska B3L

Poslední výraznější úpravou prošel domek pro ložiska B1L a B2L. Vrchní žebra s výstupky byla zapuštěna a tloušťka svislé stěny domku byla zvětšena o 3 mm. Výsledek je možné vidět na obr. 6.3.



Obr. 6.3: změna geometrie domku

Výsledná geometrie víka je shrnuta na obr. 6.4. Víko je již doplněno o duralová lůžka pro ložiska. Vnitřní rozměry víka zůstaly nezměněny.

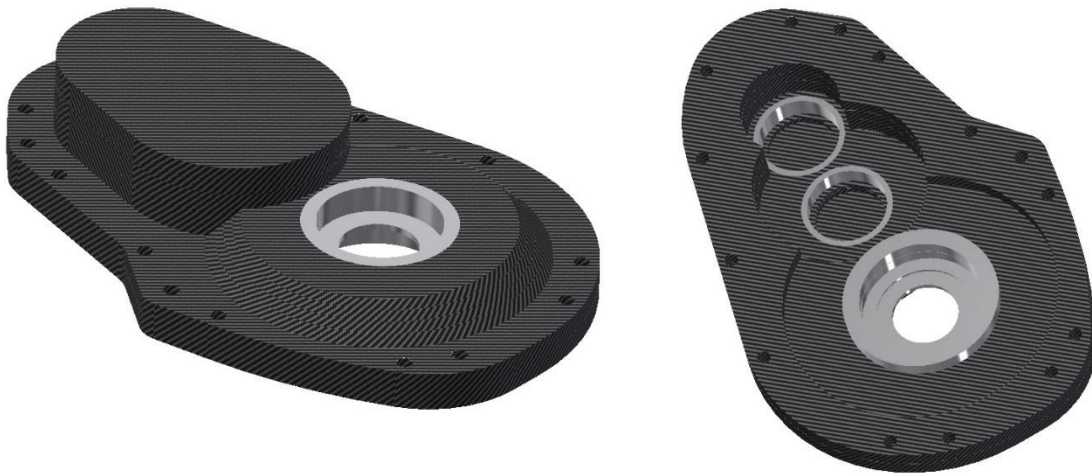


Obr. 6.4: geometrie hybridního víka; věnce ložisek zhotoveny z duralu (vlevo nahoře – šikmý přední horní pohled, vpravo nahoře – šikmý zadní horní pohled, vlevo dole – šikmý dolní pohled)

Jak lze na *obr. 6.4* pozorovat, nejedná se o zcela kompozitový návrh, nýbrž o hybridní. Těleso víka je složeno z kompozitu a věnců ložisek z duralu. Spojení věnců s tělesem víka bude při výrobě provedeno pomocí lepidla. V simulaci je pro spoje použita opět vazba *MPC bonded*, tedy „napevno spojeno“ (viz. následující kapitole 7).

5.2 Vizualizace

Pro názornost, jak bude vypadat hybridní víko v reálném provedení, byla provedena vizualizace s použitými materiály. Tuto vizualizaci je možné vidět na *obr. 6.5*.



Obr. 6.5: grafická vizualizace hybridního víka

6. MKP modely kompozitové varianty horního víka převodovky

V předchozím byly posouzeny posuvy skříně a horního víka převodovky a zjištěny tuhosti lůžek ložisek. Tato kapitola navazuje návrhem kompozitového horního víka, přičemž získané hodnoty ze simulací duralové verze víka slouží jako porovnávací.

6.1 Materiálové vlastnosti kompozitů

V následujících tabulkách (*tab. 7.1, 7.2 a 7.3*) jsou uvedeny materiálové vlastnosti použitého kompozitu (s objemovým podílem vláken 44%) a epoxidu, a v dalších verzích aplikované výztuhy Biontec. Mechanické vlastnosti Biontecu byly uvedeny již v podkapitole 1.4, zde jsou v *tab. 7.2* pro přehlednost zopakovány.

E_x [kN mm ⁻²]	E_y [kN mm ⁻²]	E_z [kN mm ⁻²]	$G_{ \perp}$ [kN mm ⁻²]	$\vartheta_{ \perp}$ [-]	$\vartheta_{\perp }$ [-]	ρ [kg m ⁻³]
54,4500	48,9400	4,0000	4,7300	0,2	0,06	1429,6

Tab. 7.1: mechanické vlastnosti kompozitu (tkaniny) pro simulaci horního víka převodovky

$E_{ }$ [kN mm ⁻²]	E_{\perp} [kN mm ⁻²]	$G_{ \perp}$ [kN mm ⁻²]	$\vartheta_{ \perp}$ [-]	$\vartheta_{\perp }$ [-]
289,5400	3,4913	2,7304	0,376	0,005

Tab. 7.2: mechanické vlastnosti Biontecu (výztuže)

E [kN mm ⁻²]	G [kN mm ⁻²]	ϑ
3	1,1538	0,3

Tab. 7.3: mechanické vlastnosti epoxidu

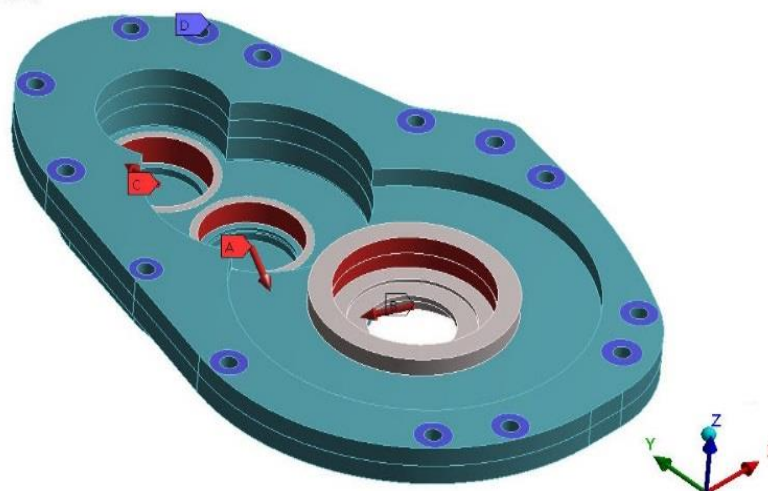
6.2 MKP model kompozitového víka bez výztuhy

Tato část se zaměřuje na tvorbu MKP modelu kompozitového víka bez výztuhy. Jsou vysvětleny aplikace okrajových podmínek, tvorba sítě a způsob sestavení výpočtu pomocí APDL příkazů.

6.2.1 Okrajové podmínky a aplikace sil

U simulace duralového víka byly použity fixní okrajové podmínky na kruhové plochy v okolí děr pro šrouby (*obr. 5.13*) o průměru 18 mm. Pro porovnatelnost výsledků jsou v případě kompozitového víka použity identické okrajové podmínky, jak ukazuje následující *obr. 7.1*.

- A** Remote Force B2L: 3411,8 N
- B** Remote Force B3L: 5780,9 N
- C** Remote Forc B1L: 1372,6 N
- D** Fixed Support

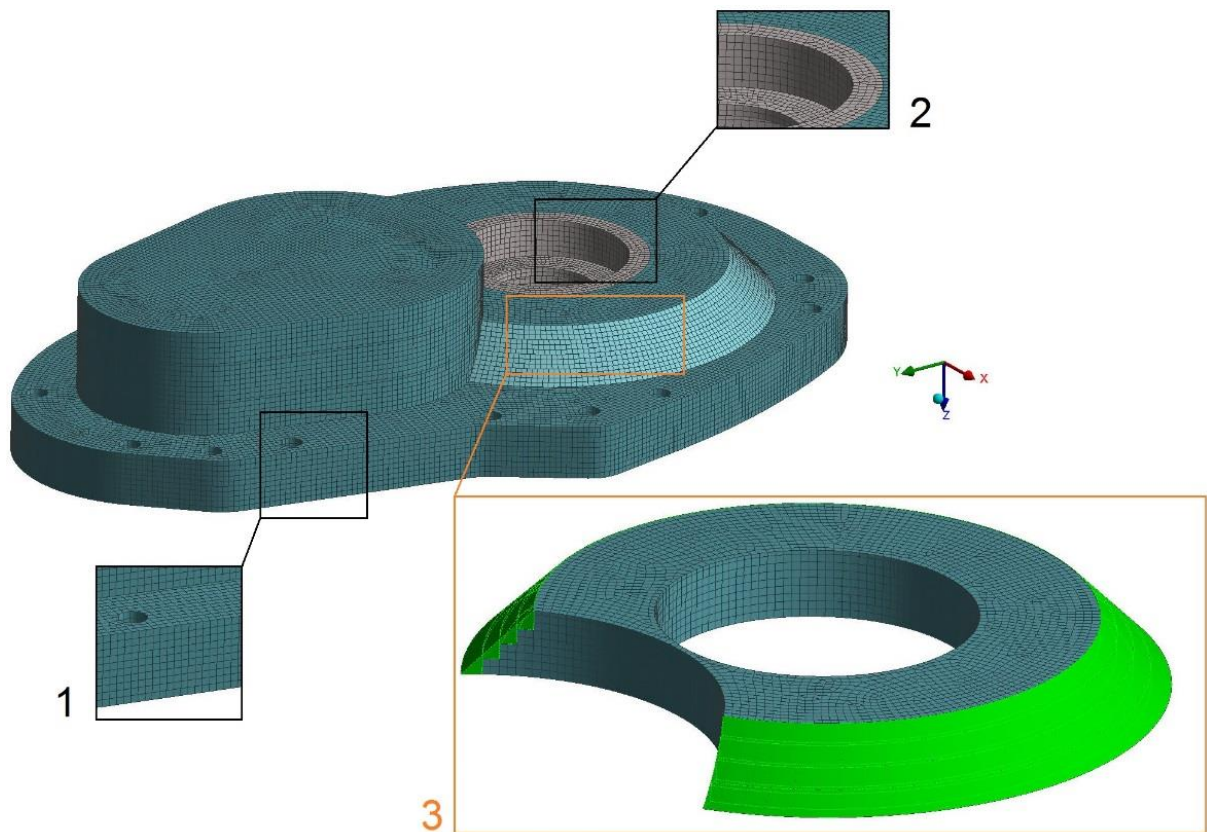


Obr. 7.1: aplikace fixních okrajových podmínek na kruhové plochy děr (modře) na dělicí rovině kompozitového horního víka a aplikace sil do lůžek ložisek (červeně)

6.2.2 Tvorba výpočtové sítě

Jak je možné vidět na předchozím obr. 7.1, je těleso víka rozděleno („rozřezáno“) na desky. Tento postup je nezbytný před samotnou tvorbou sítě, aby mohlo být víko „vysítováno“ metodou *sweep manual thin*. Takto vzniklá výpočtová síť je vyobrazena na obr. 7.2. Na tomto obrázku je na detailu 3 zobrazena náhrada schodovité části izotropním epoxidem (vlastnosti epoxidu uvedeny v tab. 7.3 výše). Toto je provedeno pouze kvůli výpočtu, v reálném výrobku bude tato část tvořit jednolitý díl z kompozitu jako zbytek víka. Kuželovitou část nelze vytvořit metodou *sweep manual thin*, nelze jí tedy přiřadit typ elementů *solid shell* (objemová skořepina) a provést správné vrstvení kompozitových vrstev.

Tvorba sítě jednotlivých vytvořených desek víka probíhá ve směru osy z (probíhá tak zároveň i skládání vrstev kompozitu). Vrstvy kompozitu jsou tedy pokládány do roviny xy.



Obr. 7.2: výpočtová síť metodou *sweep manual thin* (solid shell elementy pro kompozitní materiál, solid elementy pro duralová lůžka)

Detail 1: vrstvení elementů o výšce 2 mm ve směru osy z (elementy solid shell)

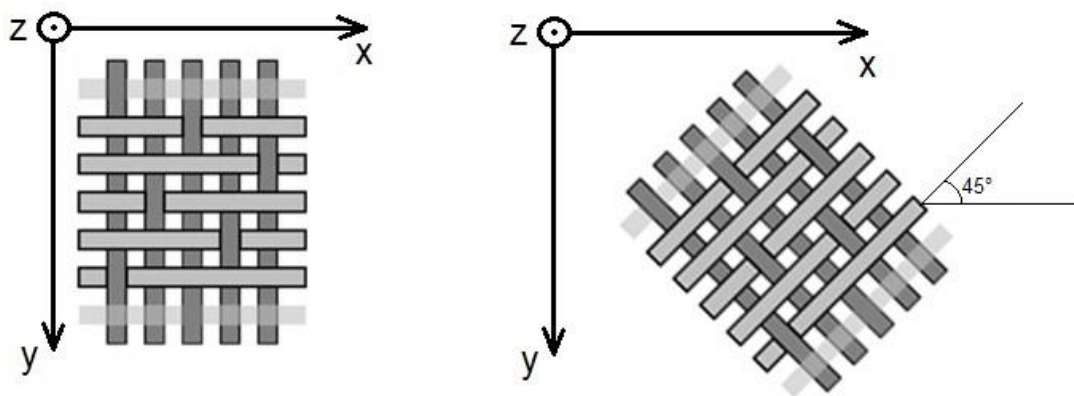
Detail 2: síť duralového lůžka B3L (elementy solid)

Detail 3: sytě zeleně vyznačena náhrada epoxidem (elementy solid)

6.2.3 Definování materiálů a souřadnicového systému tkanin

Postup definování materiálových vlastností probíhá u kompozitních součástí odlišně než u součástí z izotropních materiálů. V případě kompozitních vrstev bylo použito APDL příkazů (příloha 2), propojení s modelem bylo provedeno pomocí *named selection* (odkazování se na pojmenované díly).

Dále je u kompozitních dílů nezbytné definování souřadnicového systému tkaniny, tedy směr tkaniny x (směr prvních vláken), kolmý směr y (směr druhých vláken) a normála z (kolmá na tato vlákna). Tímto souřadnicovým systémem se následně řídí příslušné zadané materiálové údaje. Příklad souřadnicového systému tkaniny je ukázán na obr. 7.3.

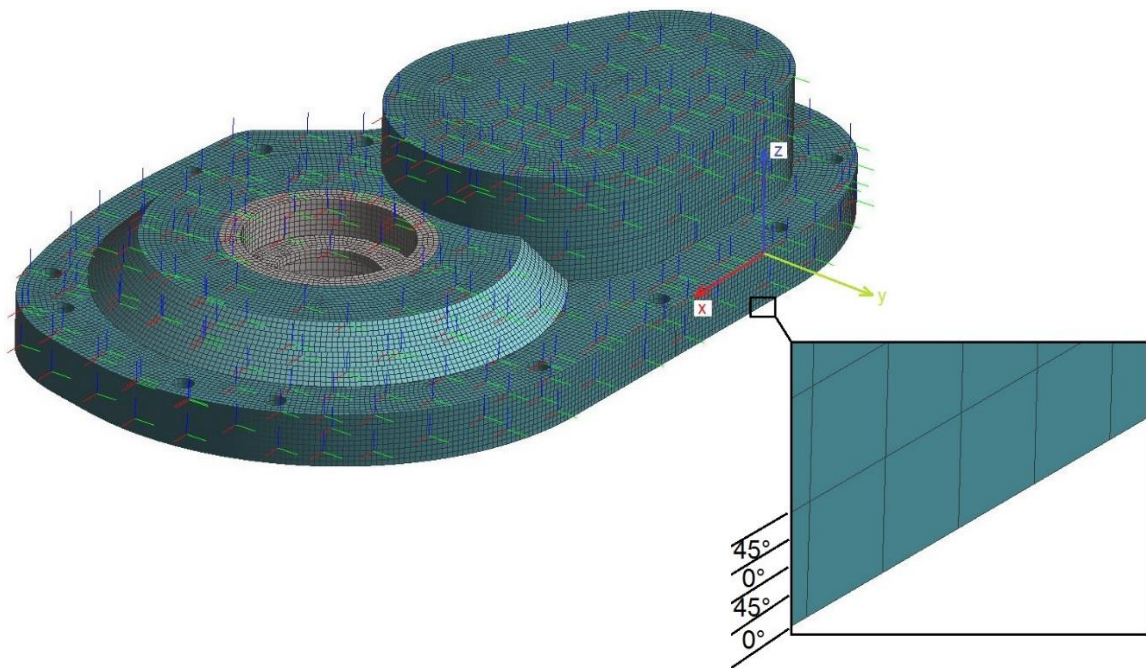


Obr. 7.3: znázornění souřadnicového systému tkaniny (vlevo – natočení tkaniny o úhel 0° , vpravo – natočení tkaniny o úhel 45°)

Po vysvětlení principu souřadnicového systému tkaniny je nyní ukázáno, jak byl souřadnicový systém volen pro případ kompozitového víka. Na obr. 7.4 lze vidět, že osa x je volena podél jedné hrany hlavní desky víka, osa y je na tuto osu kolmá a rovnoběžná s rovinou desky, osa z je následně kolmá na rovinu desky (v ose z je vrstven kompozit).

Jak již bylo řečeno, vrstvení kompozitu probíhá podél osy z (viz. souřadnicový systém v obr. 7.4). Natočení vrstev (0° , 45°) je počítáno od osy x v rovině xy . Důležitou roli hraje výška elementu podél osy z , jelikož program pomocí APDL příkazů skládá vrstvy v přesném pořadí a poměrovém zastoupení. Pro víko bylo zvoleno střídání těchto vrstev: 0° a 45° (vrstva jedné tkaniny je 0,5 mm). Elementu o výšce 2 mm se podle tohoto pravidla přiřadily vrstvy 0° , 45° , 0° a 45° ve směru osy z .

Souřadnicový systém byl volen pro celé víko jednotný a vyhovuje metodě výroby kontaktní laminací. Je vhodné zmínit, že souřadnicový systém pro víko jako těleso je odlišný než pro směry tkanin.



Obr. 7.4: znázornění souřadnicového systému tkaniny kompozitu (osa x leží přímo na hraně hlavní desky víka, osa z je kolmá k rovině desky a osa y kolmá k osám x a z ; stupně natočení tkaniny na detailu jsou počítány od osy x v rovině xy)

Definicí materiálu a souřadnicového systému tkanin končí část tvorby MKP modelu a je možné přejít na samotné vyhodnocení výsledků výpočtu, čímž se zabývá následující podkapitola 7.3.

6.3 Vyhodnocení výsledků kompozitového víka bez výztuhy

Výše uvedený MKP model byl podroben výpočtu. Byly analyzovány jak posuvy středů ložisek pro maximální zadané síly, tak směrové tuhosti, podobně jako u výpočtů duralové varianty víka převodovky. Analýzou napětí kompozitového víka se tato práce nezabývá. Pro posouzení porušování a pevnosti kompozitu není v tuto chvíli dostatek experimentálně určených údajů a pro rozhodnutí o možnosti aplikace kompozitní náhrady víka je nyní důležitější posouzení tuhosti kompozitového víka.

6.3.1 Vyhodnocení posuvů středů ložisek

Výsledky posuvů středů ložisek z této simulace jsou uvedeny v *tab. 7.4*. V tabulce jsou zároveň uvedena srovnání posuvů vůči duralové verzi B.

Posuv [mm]	Střed ložiska		
	B1L	B2L	B3L
<i>u</i>	-3,73E-03	-6,57E-03	-8,30E-03
<i>v</i>	1,76E-03	7,94E-04	6,86E-03
<i>w</i>	-6,36E-03	-1,58E-02	-1,53E-02
Celkový	7,58E-03	1,71E-02	1,87E-02
Změna (zhoršení) oproti duralové verzi B [%]			
<i>u</i>	256	168	161
<i>v</i>	214	-950	143
<i>w</i>	505	284	211
Celkový	378	258	188

Tab. 7.4: posuvy středů ložisek kompozitového víka bez výztuhy a procentuální srovnání s duralovou verzí z tabulky 5.3

U procentuálních srovnání je důležité upozornit, že hodnoty neznamenají „kolikrát“ se posuv zhoršil oproti duralové verzi, nýbrž „o kolik“ se zhoršil. Zhoršení celkového posuvu například pro střed ložiska B1L je 378 %, to znamená 4,78 x větší posuv než pro duralovou verzi víka. Z tabulky lze učinit následující závěr.

V tabulce mohou být některé procentuální srovnání záporné. To neznamená zlepšení posuvu, ale že posuv porovnávaných směrů a středů ložisek měl opačný směr. Tento jev je poměrně zajímavý, neb za stejných okrajových podmínek, mírně upravené geometrie a za použití kompozitního materiálu došlo u posuvu *v* v opačném směru pro střed ložiska B2L.

Výpočet procentuálních srovnání vycházel ze vztahu 7 – 1:

$$\text{Změna posuvu} = \frac{\text{posuv}_{\text{kompoz}} - \text{posuv}_{\text{dural}}}{\text{posuv}_{\text{dural}}} 100. \quad [\%] \quad (7 - 1)$$

Nyní bude proveden krátký rozbor tabulky. Je patrné, že až na posuv *w* středu věnce B1L a posuv *v* ložiska B2L jsou rozdíly oproti duralové verzi mezi hodnotami 143 % až 284 %. Rozdíly celkových posuvů potom mezi 188 % a 378 %. Pro deformaci *w* hraje u kompozitu roli plocha průřezu domku a Youngův modul *E* matrice kompozitu (deformace *w* je kolmá ke tkanině kompozitu. Proto rozhoduje o této deformaci především Youngův modul matrice a zatížená plocha. Jistý vliv mají i smykové vlastnosti v rovinách *xz* a *yz*. Youngův modul v tomto směru je pro použitý kompozit pouze

4 GPa oproti 72 GPa u izotropního duralu. Tento jev nízké tuhosti ve směru osy z lze zmírnit pouze návrhem výztuh orientovaných v tomto směru (viz další varianty výpočtů).

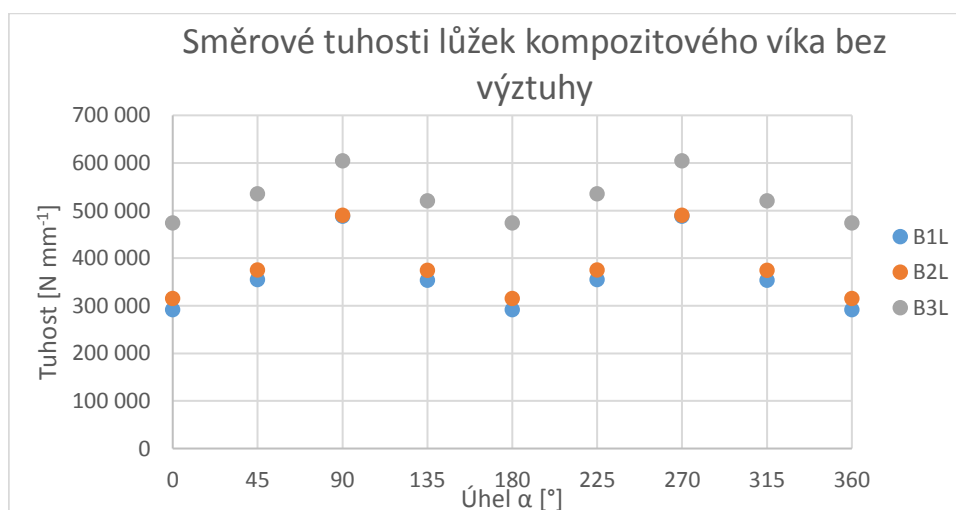
Pro posuvy u a v (nachází se v rovině xy) jsou rozhodujícími faktory moduly pružnosti v tahu ve směrech vláken tkaniny a modul ve smyku. Youngovy moduly vláken jsou oproti modulu ve smyku ekvivalentní. Modul ve smyku je pouze 4,73 GPa oproti 27,692 GPa u duralu. Jelikož v rovinách rovnoběžných s rovinami vrstvených tkanin působí značné síly, dochází i ke zvýšenému smyku (jak bylo zmíněno již u aplikace sil v kapitole 5.1.2).

Posuvy středu ložiska B3L vykazují obecně nejmenší hodnoty rozdílů oproti duralové verzi. To je způsobeno značnou úpravou geometrie kolem duralového věnce ložiska B3L na vnější straně víka.

6.3.2 Vyhodnocení směrových tuhostí

Stejně jako byly v kapitole 5.4.5 zjištěny výsledky směrových tuhostí pro duralové víko B, jsou pro srovnání zjištěny i v tomto případě. Tato práce se může zdát nadbytečná, jelikož procentuálním porovnáním maximálních posuvů získáme zároveň procentuální srovnání tuhostí (hodnoty budou totožné). Nicméně toto bude platit pouze pro tuhosti při maximálním zatížení. Směrové tuhosti kompozitového víka jsou vyneseny do *grafu 7.1*. Číselné hodnoty jsou následně uvedeny v *tab. 7.5*. Procentuální srovnání oproti duralové verzi byly vypočítány podle vztahu 7 – 2:

$$\text{Srovnání tuhostí} = \frac{\text{tuhost}_{\text{kompoz}}}{\text{tuhost}_{\text{dural}}} 100. \quad [\%] \quad (7 - 2)$$



Graf 7.1: směrové tuhosti horního kompozitového víka bez výztuhy

Hodnoty vynesené v *grafu 7.1* ukazují velmi podobné hodnoty pro věnce B1L a B2L nacházející se ve společném domku. Velká podobnost tuhostí je s největší pravděpodobností opět zapříčiněna dominantním smykem a stejně jako u duralové verze B (*graf 5.2*) se hodnoty těchto dvou lůžek směrem k úhlům 90° a 270° přibližují.

Lůžko	Úhel α [°]	Tuhost k [N mm ⁻¹]	Kolik [%] tuhosti vykazuje oproti duralové verzi
B1L	0	291 866	31
	45	355 182	37
	90	488 089	49
	135	353 442	36
	180	291 863	31
	225	355 172	37
	270	488 066	49
	315	353 439	36
	360	291 866	31
	Axiální (směr +z)	191 430	17
	Axiální (směr -z)	191 444	17
B2L	0	315 158	45
	45	375 322	48
	90	490 486	56
	135	374 727	48
	180	315 154	45
	225	375 306	48
	270	490 449	56
	315	374 720	48
	360	315 158	45
	Axiální (směr +z)	146 904	29
	Axiální (směr -z)	146 917	29
B3L	0	474 096	40
	45	535 399	42
	90	604 830	44
	135	520 449	42
	180	474 093	40
	225	535 380	42
	270	604 798	44
	315	520 437	42
	360	474 096	40
	Axiální (směr +z)	171 455	36
	Axiální (směr -z)	171 463	36

Tab. 7.5: směrové tuhosti kompozitového víka bez výztuhy a srovnání s duralovou verzí

Z *tab. 7.5* je zřejmé, že směrové tuhosti ložisek vykazují pouze třetinové až poloviční hodnoty duralové verze. Hodnota axiální tuhost lůžka B1L je dokonce šestinová. Tento nepříznivý stav je možné vylepšit použitím výztuh z vysokomodulových uhlíkových vláken – aplikací technologie Biontec. Tím se zabývá následující kapitola 8. Lůžka B1L a B2L mají podobné tuhosti, jak je vidět i v *grafu 7.1*. Dále je i v tomto případě patrné, že směrové tuhosti se pro úhel $\alpha \pm 180$ opakují. Axiální tuhosti středů věnců jsou též pro kladný i záporný směr osy z totožné.

Po provedení analýzy kompozitového víka je možné přejít k následujícím modifikacím. Právě analyzované víko je v kapitole 8 zpevněno pomocí vysokomodulových uhlíkových vláken.

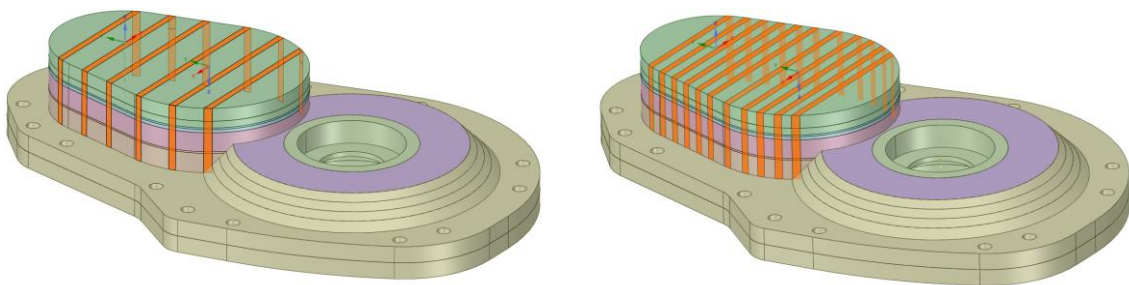
7. Modifikace kompozitového víka zpevněného pomocí vysokomodulových uhlíkových vláken (technologie Biontec)

Po simulaci a vyhodnocení výsledků kompozitového víka bez výztuže je v následujícím toto víko zpevněno pásy vysokomodulových uhlíkových vláken, zde označovaných jako technologie Biontec. Byly zkoumány vlivy počtu pásů na posuvy středů ložisek a srovnávány s duralovou verzí. Počet pásů hraje z ekonomického hlediska důležitou roli. Frézování drážek a lepení Biontecu je časově a tedy i ekonomicky náročné a je vhodné zjistit vliv zpevnění na posuvy věnců ložisek.

Vliv výztuže byl zkoumán pro dva hlavní případy. Prvním je vyztužení domku s lůžky ložisek B1L a B2L a druhým je vyztužení kolem lůžka B3L. Z předešlých simulací bylo zjištěno, že se tyto dvě skupiny navzájem významně neovlivňují a proto jsou posuzovány samostatně. V kapitole 9 jsou uvedeny a diskutovány výsledky posuvů.

8.1 Aplikace pásů Biontecu na domek víka a výsledky posuvů

V tomto případě, který je zobrazen na *obr. 8.1*, je domek zpevněn šesti, resp. jedenácti příčnými pásy Biontecu.



Obr. 8.1: aplikace Biontecu na domek víka (vlevo – šest pásů (rozteč 20 mm), vpravo – jedenáct pásů (rozteč 10 mm))

V *tab. 8.1* a *8.2* jsou uvedeny výsledky posuvů věnců B1L a B2L při maximálním zatížení pro tyto dva případy.

Posuv [mm]	Střed ložiska		
	B1L	B2L	B3L
u	-3,54E-03	-6,37E-03	
v	1,84E-03	8,69E-04	
w	-5,91E-03	-1,51E-02	
Celkový	7,13E-03	1,64E-02	
Změna (zhoršení) posuvu oproti duralové verzi B [%]			
u	238	160	
v	228	-1030	
w	463	268	
Celkový	350	243	

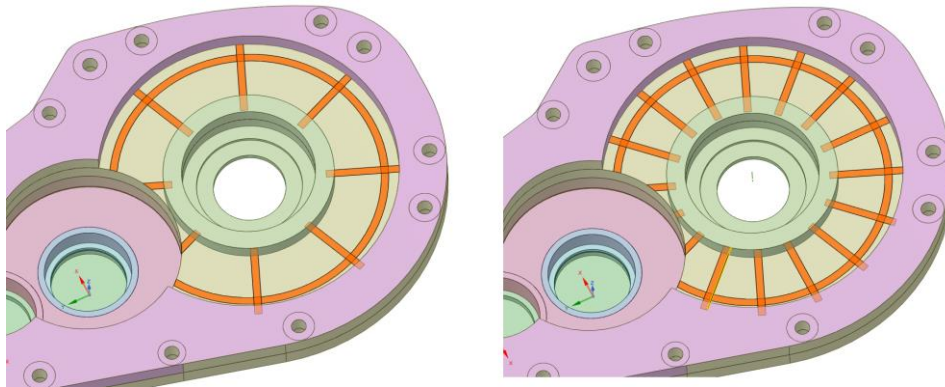
Tab. 8.1: výsledky posuvů středů věnců B1L a B2L při aplikaci šesti pásů Biontecu a srovnání s duralovou verzí

Posuv [mm]	Střed ložiska		
	B1L	B2L	B3L
u	-3,46E-03	-6,27E-03	
v	1,87E-03	9,01E-04	
w	-5,58E-03	-1,45E-02	
Celkový	6,83E-03	1,58E-02	
Změna (zhoršení) posuvu oproti duralové verzi B [%]			
u	230	156	
v	234	-1064	
w	431	254	
Celkový	331	232	

Tab. 8.2: výsledky posuvů středů věnců B1L a B2L při aplikaci jedenácti pásů Biontecu a srovnání s duralovou verzí

8.2 Aplikace Biontecu kolem ložiska B3L a výsledky posuvů

Při zvyšování tuhosti věnce ložiska B3L byl aplikován Biontec rovnoměrně paprskovitě na vnitřní plochu desky víka. Výsledný návrh je zobrazen na *obr. 8.2*. Bylo použito 8, resp. 16 paprsků a 1 kruhová výztuž.



Obr. 8.2: aplikace Biontecu na vnitřní plochu desky víka; zpevnění lůžka ložiska B3L (vlevo: 8 paprsků + 1 kruhová výztuž, vpravo: 16 paprsků + 1 kruhová výztuž)

V *tab. 8.3* a *8.4* jsou uvedeny výsledky posuvů středu věnce B3L pro tyto dva případy.

Posuv [mm]	Střed ložiska		
	B1L	B2L	B3L
u			-7,68E-03
v			6,48E-03
w			-1,48E-02
Celkový			1,79E-02
Změna (zhoršení) oproti duralové verzi B [%]			
u			142
v			130
w			203
Celkový			176

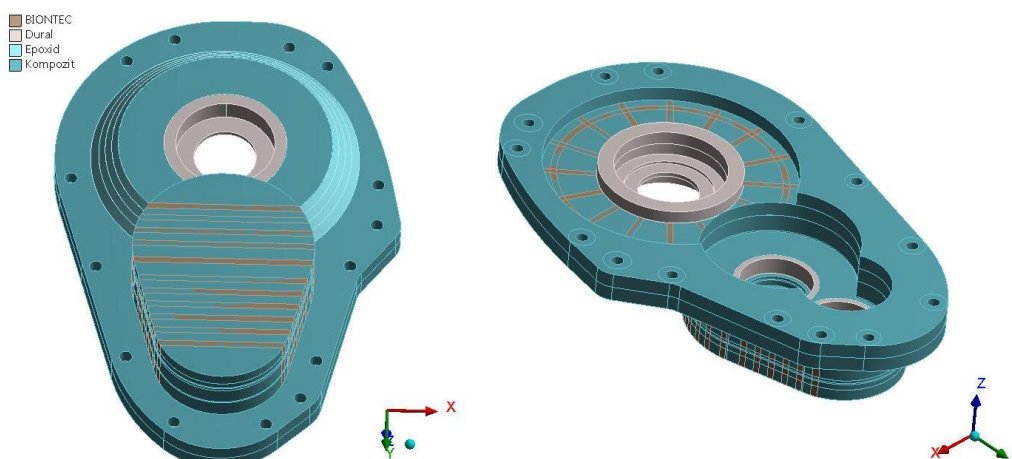
Tab. 8.3: výsledky posuvů středu věnce B3L při použití osmi paprsků a jedné kruhové výztuže Biontecu a srovnání s duralovou verzí

Posuv [mm]	Střed ložiska		
	B1L	B2L	B3L
u			-7,38E-03
v			6,28E-03
w			-1,46E-02
Celkový			1,75E-02
Změna (zhoršení) oproti duralové verzi [%]			
u			132
v			123
w			197
Celkový			170

Tab. 8.4: výsledky posuvů středu věnce B3L při použití šestnácti paprsků a jedné kruhové výztuže Biontecu a srovnání s duralovou verzí

8.3 Aplikace Biontecu na celé víko

V posledním zkoumaném případě byl proveden výpočet posuvů středů lůžek pro případ aplikace maximálního počtu výše zmíněných paprsků Biontecu. Na obr. 8.3 je uvedeno víko s použitím všech výše zmíněných výztuží najednou.



Obr. 8.3: aplikace jedenácti pruhů Biontecu na domku a osmnácti paprsků na vnitřní straně kolem lůžka B3L a jedné kruhové výztuže

Výsledky simulace jsou uvedeny v *tab. 8.5*.

Posuv [mm]	Střed ložiska		
	B1L	B2L	B3L
<i>u</i>	-3,44E-03	-6,08E-03	-7,30E-03
<i>v</i>	1,63E-03	6,74E-04	6,17E-03
<i>w</i>	-5,67E-03	-1,42E-02	-1,43E-02
Celkový	6,83E-03	1,54E-02	1,72E-02
Změna (zhoršení) oproti duralové verzi [%]			
<i>u</i>	229	149	130
<i>v</i>	190	-821	119
<i>w</i>	439	246	191
Celkový	330	223	165

Tab. 8.5: výsledky posuvů středů věnců ložisek při aplikaci všech pruhů Biontecu a srovnání s duralovou verzí

Tímto byly provedeny a vyhodnoceny simulace kompozitového víka vyztuženého vysokomodulovými uhlíkovými vlákny – Biontecem. V následující podkapitole 8.4 jsou výsledky diskutovány.

8.4 Porovnání výsledků jednotlivých variant a jejich diskuse

Na závěr jsou zjištěné vlivy výtuzí srovnány. Následující *tab. 8.6* shrnuje srovnání celkových posuvů středů věnců ložisek B1L, B2L a B3L vůči duralové verzi.

Z *tab. 8.6* je možné učinit následující závěry. Při aplikaci maximálního uvažovaného počtu pásů Biontecu (dolní řádek) se modifikovaný model kompozitového víka přiblížil k duralové verzi následovně: lůžko B1L na 330 % (z 378 % bez Biontecu), B2L na 223 % (z 258 % bez Biontecu) a B3L na 165 % (ze 188 % bez Biontecu). Aplikace pásů Biontecu vykazuje u všech lůžek významné zlepšení. Počet aplikovaných pásů je na druhou stranu vysoký (celkem 38). Smyku, který nastává na víku velmi lokálně, tyto výtuzě již významněji nezabrání.

	Typ aplikace Biontecu	Střed ložiska		
		B1L	B2L	B3L
Zhoršení celkového posuvu oproti duralové verzi [%]	Žádný	378	258	188
	6 pásů na domku	350	243	
	11 pásů na domku	331	232	
	8 paprsků kolem věnce B3L, 1 kruhová výztuž			176
	16 paprsků kolem věnce B3L, 1 kruhová výztuž			170
	11 pásů na domku; 16 paprsků kolem věnce B3L, 1 kruhová výztuž	330	223	165

Tab. 8.6: srovnání celkových posuvů středů lůžek ložisek pro různé aplikace Biontecu

9 úspora hmotnosti a další možnosti optimalizace

Návrh víka byl tvořen především na maximální tuhost, která se měla přiblížit duralové verzi. Kromě zvýšení tuhosti bylo cílem práce dosáhnout snížení hmotnosti, které se podařilo splnit.

Jak již bylo zmíněno v úvodu práce, hmotnost duralové varianty víka činí 2460 g. Vypočítaná hmotnost hybridního víka je 1847 g. (1610 g kompozit, 237 g duralové věnce). Uspořená hmotnost je tímto 24,9 %. V této fázi by bylo vhodné provést optimalizaci jednotlivých částí víka (tloušťky desky, tloušťky stěny domku, tloušťky stěn duralových věnců) pro další úsporu hmotnosti. Dále by mohl být zjištěn vliv zarovnání obvodové kontury s dírami. Pokud by uchycení mírně vyčnívaly z obvodové kontury, jako je tomu v případě duralového víka, došlo by dále ke značné úspoře hmotnosti. Takovou úpravu lze vytvořit např. frézováním víka.

Dalším návrhem na optimalizaci je změna zastoupení jednotlivých vrstev kompozitu (zde byl volen poměr 50 % směr 0° a 50 % směr 45°). Jinou variantou je možnost střídání vrstev s rozdílnou tuhostí i pevností tkanin.

Při provedení série optimalizací je otevřen významný prostor pro další snížení jak poddajnosti, tak hmotnosti.

10 Závěr

Cílem této práce bylo navrhnout hybridní víko pro převodovku elektromobilu, které by mělo ekvivalentní nebo lepší vlastnosti než duralová varianta. Před samotným návrhem víka byla provedena analýza tuhostí, posuvů a napětí duralové verze.

Vyhodnocená maximální redukovaná napětí se pohybují v rozmezí 32,388 MPa až 41,036 MPa. Z napětí plynoucí statické bezpečnosti vůči mezi kluzu, která je pro zvolený materiál (dural) 150 MPa, se pohybují v rozmezí 3,66 až 4,66 podle simulované varianty víka A nebo B a aplikované hypotézy napětí (HMH nebo maximálních smykových napětí). Rozdíl mezi napětími je způsoben použitím rozdílných okrajových podmínek, kdy se přešlo od simulace celé skříně pouze k simulaci horního víka, a posuzoval se vliv tohoto přechodu. Přechod ke zjednodušenému modelu byl proveden kvůli snížení výpočetního času. Podle zjednodušeného modelu byla v druhé polovině práce prováděna simulace navrhovaného hybridního víka.

Kritéria pro návrh hybridní verze byla snížení hmotnosti a dosažení ekvivalentní nebo vyšší tuhosti oproti duralové verzi. První úkol se podařilo docílit, avšak tuhost se i po zpevnění vysokomodulovými vlákny nepodařilo plně zachovat ani vylepšit. To ovšem neznamená, že je hybridní víko s takto navrženou tuhostí nevyhovující, neboť nejsou známy limity maximálních přípustných deformací hřídelů převodovky. K ověření by mělo dojít při zkouškách prototypu hybridní skříně. Celkové posuvy středů ložisek po maximálním zpevnění Biontecem vycházely 2,65x až 4,3x (bez zpevnění 2,88x až 4,78) větší ve srovnání s duralovou verzí. Vyztužení Biontecem mělo nižší efekt, než jaký byl očekáván. Toto je přisuzováno lokálním smykům, které ve víku dochází, a které povrchové vyztužení Biontecem významně neovlivní. Hmotnost víka byla snížena o 24,9 % z 2460 g na 1847 g. Dalšího snížení hmotnosti lze docílit po provedení optimalizací, jako např. tloušťky desky, tlouštěk stěny domku, tloušťky stěn duralových věnců apod. Tuhost by mohla být mírně zvýšena optimalizací pokládaných vrstev kompozitu, kdy by byly kombinovány vrstvy o jiném procentuálním zastoupení (zde bylo použito 50% a 50% pro směry 0° a 45°).

Pro návrh víka bylo zadáno výrobní kritérium, kdy jednotlivé části musí být vyrobitelné metodou kontaktní laminace. Aby se otevřela cesta pro další zvýšení tuhosti, bude zapotřebí dále využít metodu navíjení, která umožňuje výrobu rotačních součástí. Tomu je otevřena cesta v dalším návrhu modifikace víka.

Po konzultacích se došlo prozatím k závěru, že dosažené posuvy středů ložisek jsou přijatelné a nižší dosažená tuhost nemusí správnou funkčnost převodovky omezit.

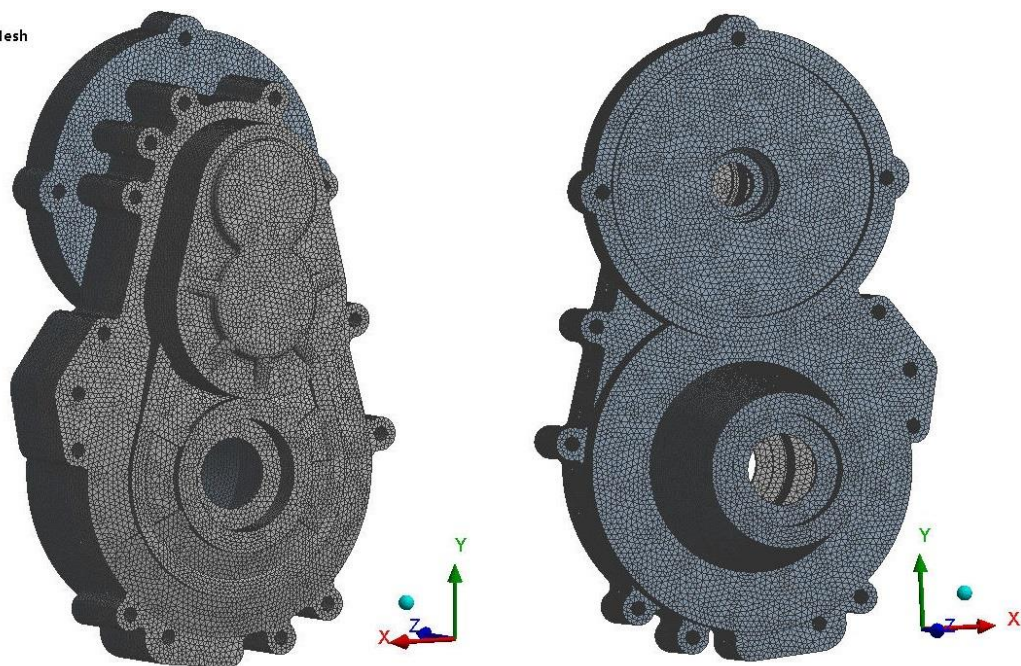
Použitá literatura a další zdroje

- [1] BARBERO, Ever J. *Introduction to Composite Materials Design*. 2. vyd. Boca Raton: Taylor & Francis, 2011. 520 s. ISBN 978 -1-4200-7915-9.
- [2] Filament Winding. *nuplex* [online]. © Allnex. [cit. 10. ledna 2018]. Dostupné s WWW: <<http://www.nuplex.com/composites/processes/filament-winding>>.
- [3] EHRENSTEIN, Gottfried W. *Polymerní kompozitní materiály*. 1. vyd. Praha: Scientia, 2009. 341 s. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [4] Cavette, CHRIS. *Carbon Fiber* [online]. [cit. 10. ledna 2018]. Dostupné z WWW: <<http://www.madehow.com/Volume-4/Carbon-Fiber.html>>.
- [5] Carbon Fiber Cloth Plain Weave. *totalboat* [online]. [cit. 10. ledna 2018]. Dostupné z WWW: <<http://www.totalboat.com/product/carbon-fiber-cloth/>>.
- [6] Glass Fiber. *dir.indiamart* [online]. [cit. 10. ledna 2018]. Dostupné z WWW: <<https://dir.indiamart.com/chennai/glass-fiber.html>>.
- [7] SOLLER, Jon. *Choosing the Appropriate Resin* [online]. [cit. 10. ledna 2018]. Dostupné z WWW: <<http://www.sollercomposites.com/epoxyresinchoice.html>>.
- [8] ACMA. *Volvo Uses Recycled Carbon Fiber Composites to Cut Truck Weight* [online]. [cit. 10. ledna 2018]. Dostupné z WWW: <<http://compositeslab.com/volvo-uses-recycled-carbon-fiber-composites-to-cut-truck-weight/>>.
- [9] Islam, FAISAL. *What Are Advantages And Disadvantages of Using Composite Materials in Aircraft?* [online]. [cit. 10. ledna 2018]. Dostupné z WWW: <<https://www.quora.com/What-are-the-advantages-and-disadvantages-of-using-composite-materials-in-an-aircraft>>.
- [10] Premix Inc. *Advantages of Composites* [online]. [cit. 10. ledna]. Dostupné z WWW: <<https://www.premix.com/why-composites/adv-composites.php>>.
- [11] Jacob, AMANDA. *Electric cars need lightweight composites* [online]. [cit. 10. ledna 2018]. Dostupné z WWW: <<https://www.materialstoday.com/composite-applications/news/electric-cars-need-lightweight-composites/>>.
- [12] Caliendo, HEATHER. *New carbon fiber electric car arrives in the U.S.* [online]. [cit. 10. ledna 2018]. Dostupné z WWW: <<https://www.compositesworld.com/news/new-carbon-fiber-electric-car-arrives-in-the-us>>.
- [13] Katalog z internetové stránky společnosti Biontec [online]. [cit. 10. ledna 2018]. Dostupné z WWW: <[file:///C:/Users/Ondra/Downloads/BIONTEC_Prospekt%20Sport_DE%20\(2\).pdf](file:///C:/Users/Ondra/Downloads/BIONTEC_Prospekt%20Sport_DE%20(2).pdf)>.

- [14] Siddharth, SHARMA. *What is the difference between von Mises Stress and Max Principal Stress?* [online]. [cit. 10. ledna 2018]. Dostupné z WWW: <<https://www.quora.com/What-is-the-difference-between-von-Mises-Stress-and-Max-Principal-Stress>>.
- [15] MICHALEC, Jiří. *Pružnost a pevnost I*. 3. vyd. Praha: ČVUT, 2009. 308 s. ISBN 978-80-01-04224-3.

Seznam příloh

Mesh



Příloha 1: MKP model duralové skříně převodovky; použití tetragonální uniformní sítě 3 mm

```

/prep7

xpom=mpinqr(0,0,14)      !max definovany material
xpom2=sectinqr(0,14)    !max definovany section

!kompozit_HS (Vf~0.4)
uimp,xpom+1,ex,ey,ez,54450,48940,4000      !definice modulu pruznosti v tahu Ex,
Ey, Ez
uimp,xpom+1,gxy,gyz,gxz,4730,4730,4730      !definice modulu pruznosti ve smyku Gxy,
Gyz, Gxz
uimp,xpom+1,prxy,pryz,prxz,0.005,0.376,0.005 !definice Poissonovych konstant nu_xy,
nu_yz, nu_xz
uimp,xpom+1,dens,,1429.6e-12                !definice hustoty

!***DEFINICE Sekci solidshellu***

!*****
!***ELEMENTY O VYSCE 2MM*****
!*****

sect,xpom2+1,shell,,
secdata, 0.5,xpom+1,0,3
secdata, 0.5,xpom+1,45,3
secdata, 0.5,xpom+1,0,3
secdata, 0.5,xpom+1,45,3
secoffset,MID

!*****
!***ELEMENTY O VYSCE 1MM*****
!*****

sect,xpom2+2,shell,,
secdata, 0.5,xpom+1,0,3
secdata, 0.5,xpom+1,45,3
secoffset,MID

cmsel,s,kompozitove_dily_2mm
emodif,all,secnum,xpom2+1
allsel

cmsel,s,kompozitove_dily_1mm
emodif,all,secnum,xpom2+2
allsel

finish
/solu

```

Příloha 2: APDL příkazy pro materiálové vlastnosti použitého kompozitu a definice vrstev na výšku elementu

Seznam obrázků

Obr. 1.1: tkanina z uhlíkových vláken [5]	10
Obr. 1.2: tkanina ze skleněných vláken [6]	12
Obr. 1.3: brzdové páčky jízdního kola z kompozitu Biontec [13]	14
Obr. 1.4: charakteristické hodnoty elastických vlastností vlákna [3].....	16
Obr. 3.1: schéma metody ručního kladení [1].....	19
Obr. 3.2: schéma procesu navíjení [2]	21
Obr. 4.1 a): náhled na vnější část horního víka převodovky	24
Obr. 4.1 b): náhled na vnitřní část horního víka převodovky.....	24
Obr. 4.2 a): náhled na vnější část dolního víka převodovky.....	25
Obr. 4.2 b): náhled na vnitřní část dolního víka převodovky	26
Obr. 4.3: výsledný 3D model sestavy duralové skříně převodovky	27
Obr. 5.1: MKP model duralové skříně převodovky pro výpočet napětí.....	29
Obr. 5.2: řez skříní převodovky s okótovanými pozicemi ložisek.....	30
Obr. 5.3: znázornění vektorů sil aplikovaných ve středech jednotlivých lůžek ložisek.....	30
Obr. 5.4: aplikace fixních vazbových podmínek mezi víky – červeně, resp. modře zvýrazněno (víka v rozpojeném pohledu)	31
Obr. 5.5: aplikace fixních okrajových podmínek na skříní víka	32
Obr. 5.6: výsledky simulace napětí skříně varianty A podle hypotézy HMM (detailní pohled na místo s maximálním napětím).....	33
Obr. 5.7: výsledky simulace napětí skříně varianty A podle hypotézy HMM (vlevo – pohled na zadní část víka, vpravo – pohled na spodní část víka)	34
Obr. 5.8: Mohrův diagram s vyznačeným maximálním smykovým napětím pro trojosou napjatost [14]	35
Obr. 5.9: výsledky simulace napětí skříně varianty A podle hypotézy maximálních smykových napětí (pohled na místo s maximálním napětím)	35

Obr. 5.10: výsledky simulace napětí skříně varianty A podle hypotézy maximálních smykových napětí	36
Obr. 5.11: barevné zobrazení celkových deformací skříně varianty A.....	37
Obr. 5.12: orientace úhlu α směrových tuhostí (zde pro lůžko B1L)	38
Obr. 5.13: aplikace fixních okrajových podmínek pro simulaci horního duralového víka převodovky varianty B	40
Obr. 5.14: výsledky simulace napětí skříně varianty B podle hypotézy HMM (pohled na místo s maximálním napětím).....	41
Obr. 5.15: výsledky simulace napětí skříně varianty B podle hypotézy HMM (vlevo – pohled na zadní část víka, vpravo – pohled na spodní část víka)	42
Obr. 5.16: výsledky simulace napětí skříně varianty B podle hypotézy maximálních smykových napětí (pohled na místo s maximálním napětím)	43
Obr. 5.17: barevné zobrazení celkových deformací skříně varianty B.....	44
Obr. 6.1: změna geometrie desky horního víka; tloušťka nezměněna	48
Obr. 6.2: změna geometrie kuželovité plochy na vnější straně víka v okolo ložiska B3L.....	49
Obr. 6.3: změna geometrie domku	49
Obr. 6.4: geometrie hybridního víka; věnce ložisek zhotoveny z duralu	49
Obr. 6.5: grafická vizualizace hybridního víka.....	50
Obr. 7.1: aplikace fixních okrajových podmínek na kruhové plochy děr (modře) na dělicí rovině kompozitového horního víka a aplikace sil do lůžek ložisek (červeně).....	52
Obr. 7.2: výpočtová síť metodou sweep manual thin.....	53
Obr. 7.3: znázornění souřadnicového systému tkaniny.....	54
Obr. 7.4: znázornění souřadnicového systému tkaniny kompozitu.....	55
Obr. 8.1: aplikace Biontecu na domek víka (vlevo – šest pásů (rozteč 20 mm), vpravo – jedenáct pásů (rozteč 10 mm)).....	60
Obr. 8.2: aplikace Biontecu na vnitřní plochu desky víka; zpevnění lůžka ložiska B3L	62
Obr. 8.3: aplikace jedenácti pruhů Biontecu na domku a osmnácti paprsků na vnitřní straně kolem lůžka B3L a jedné kruhové výztuže.....	63

Seznam grafů

Graf 1.1: rozdělení uhlíkových vláken (ve stavu bezprostředně po výrobě).....	11
Graf 1.2: závislost poměrné meze pevnosti v tahu na teplotě pro jednotlivé typy vláken [3]	15
Graf 5.1: směrové tuhosti skříně varianty A (věnce B1L, B2L a B3L).....	38
Graf 5.2: směrové tuhosti skříně varianty B (věnce B1L, B2L a B3L).....	44
Graf 7.1: směrové tuhosti horního kompozitového víka bez výztuhy	57

Seznam tabulek

Tab. 1.1: typické mechanické vlastnosti vysokopevnostních a vysokomodulových uhlíkových vláken [3]	12
Tab. 1.2: typické mechanické vlastnosti skleněných vláken (E-skloviny) [3]	13
Tab. 1.3: srovnání aramidových vláken dle mechanických vlastností [3]	13
Tab. 1.4: vlastnosti vysokomodulového kompozitu od společnosti Biontec	14
Tab. 1.5: srovnání mechanických vlastností skleněných, aramidových a uhlíkových vláken [3]	15
Tab. 3.1: příklady použití kompozitů vyrobených ručním kladením [1].....	19
Tab. 3.2: výhody a nevýhody kompozitů vyrobených ručním kladením [1]	20
Tab. 4.1: rozměry ložisek horního víka převodovky	23
Tab. 5.1: materiálové vlastnosti duralu.....	28
Tab. 5.2 síly přenášené z ozubených kol do ložisek	30
Tab. 5.3: hodnoty posuvů středů ložisek pro skříň varianty A (sít velikosti 3 mm)	37
Tab. 5.4: hodnoty posuvů středů ložisek pro skříň varianty A (sít velikosti 5 mm)	37
Tab. 5.5: výsledky směrových tuhostí skříně varianty A	39
Tab. 5.6: hodnoty posuvů středů ložisek pro skříň varianty B	43
Tab. 5.7: výsledky směrových tuhostí skříně varianty B	45
Tab. 5.8: srovnání posuvů duralové skříně varianty A a B	46
Tab. 5.9: porovnání bezpečností a redukováných napětí variant A a B.....	46
Tab. 7.1: mechanické vlastnosti kompozitu (tkaniny) pro simulaci horního víka převodovky	51
Tab. 7.2: mechanické vlastnosti Biontecu (výztuže)	51
Tab. 7.3: mechanické vlastnosti epoxidu	51
Tab. 7.4: posuvy středů ložisek kompozitového víka bez výztuhy a procentuální srovnání s duralovou verzí z tabulky 5.3.....	56
Tab. 7.5: směrové tuhosti kompozitového víka bez výztuhy a srovnání s duralovou verzí	58

Tab. 8.1: výsledky posuvů středů věnců B1L a B2L při aplikaci šesti pásů Biontecu a srovnání s duralovou verzí	61
Tab. 8.2: výsledky posuvů středů věnců B1L a B2L při aplikaci jedenácti pásů Biontecu a srovnání s duralovou verzí	61
Tab. 8.3: výsledky posuvů středu věnce B3L při použití osmi paprsků a jedné kruhové výztuže Biontecu a srovnání s duralovou verzí	62
Tab. 8.4: výsledky posuvů středu věnce B3L při použití šestnácti paprsků a jedné kruhové výztuže Biontecu a srovnání s duralovou verzí	63
Tab. 8.5: výsledky posuvů středů věnců ložisek při aplikaci všech pruhů Biontecu a srovnání s duralovou verzí	64
Tab. 8.6: srovnání celkových posuvů středů lůžek ložisek pro různé aplikace Biontecu	65

Seznam příloh

Příloha 1: MKP model duralové skříně převodovky; použití tetragonální uniformní sítě 3 mm	70
Příloha 2: APDL příkazy pro materiálové vlastnosti použitého kompozitu a definice vrstev na výšku elementu	71

Obsah

Seznam symbolů	7
Seznam indexů	7
Úvod	8
1 Nejdůležitější druhy vláken pro výrobu kompozitů	10
1.1 Uhlíková vlákna	10
1.1.1 Pevnostní a modulové spektrum.....	11
1.1.2 Vlastnosti uhlíkových vláken [3].....	11
1.2 Skleněná vlákna.....	12
1.2.1 Vlastnosti skleněných vláken [3]	12
1.3 Aramidová vlákna.....	13
1.3.1 Vlastnosti aramidových vláken [3]	13
1.4 Biontec	14
1.5 Porovnání vlastností vláken	14
1.6 Rozsah teplot pro použití vláken.....	15
1.7 Směry elastických vlastností vlákna	16
2 Základní druhy matric	17
1.8 Epoxidové pryskyřice.....	17
1.9 Vinylesterové pryskyřice	17
1.10 Polyesterové pryskyřice	17
2. Způsoby výroby kompozitů	18
2.1 Ruční kladení	18
2.1.1 Gelcoat	19
2.1.2 Příprava materiálu, kladení tkaniny, vytvrzování	20
2.1.3 Ekonomičnost.....	20
2.2 Metoda navíjení	20
2.2.1 Postup výroby metodou navíjení	21

2.2.2	Navíjecí trny.....	21
2.2.3	Omezení metody navíjení	22
3.	Popis stávající převodovky	23
3.1	3D model duralové varianty skříně převodovky	23
3.1.1	Horní víko převodovky	23
3.1.2	Dolní víko převodovky	25
3.1.3	3D model sestavy skříně převodovky	26
3.2	Předpokládané výsledky.....	27
4.	MKP model stávající duralové skříně převodovky	28
4.1	Stavba MKP modelu duralové skříně (varianta A).....	28
4.1.1	Tvorba výpočtové sítě	28
4.1.2	Aplikace sil.....	29
4.1.3	Aplikace okrajových a vazbových podmínek.....	31
4.2	Výsledky simulací varianty A	32
4.2.1	Energetická hypotéza napětí.....	32
4.2.2	Vyhodnocení napětí podle energetické hypotézy.....	33
4.2.3	Hypotéza maximálních smykových napětí	34
4.2.4	Vyhodnocení napětí podle hypotézy maximálních smykových napětí	35
4.2.5	Vyhodnocení posuvů středů ložisek.....	36
4.2.6	Vyhodnocení posuvů skříně	37
4.2.7	Vyhodnocení směrových tuhostí.....	38
4.3	Stavba MKP modelu duralové skříně (varianta B).....	40
4.3.1	Tvorba MKP sítě, aplikace sil a okrajové podmínky	40
4.4	Výsledky simulací varianty B	41
4.4.1	Vyhodnocení napětí podle energetické hypotézy.....	41
4.4.2	Vyhodnocení napětí podle hypotézy maximálních smykových napětí	42
4.4.3	Vyhodnocení posuvů středů ložisek.....	43
4.4.4	Vyhodnocení posuvů skříně	43

4.4.5	Výsledky směrových tuhostí.....	44
4.5	Srovnání výsledků varianty A a B.....	45
5.	Tvorba 3D modelu kompozitového víka	48
5.1	Úprava geometrie	48
5.2	Vizualizace	50
6.	MKP modely kompozitové varianty horního víka převodovky	51
6.1	Materiálové vlastnosti kompozitů.....	51
6.2	MKP model kompozitového víka bez výztuhy.....	51
6.2.1	Okrajové podmínky a aplikace sil.....	51
6.2.2	Tvorba výpočtové sítě	52
6.2.3	Definování materiálů a souřadnicového systému tkanin.....	53
6.3	Vyhodnocení výsledků kompozitového víka bez výztuhy	55
6.3.1	Vyhodnocení posuvů středů ložisek.....	55
6.3.2	Vyhodnocení směrových tuhostí.....	57
7.	Modifikace kompozitového víka zpevněného pomocí vysokomodulových uhlíkových vláken (technologie Biontec)	60
8.1	Aplikace pásů Biontecu na domek víka a výsledky posuvů	60
8.2	Aplikace Biontecu kolem ložiska B3L a výsledky posuvů	62
8.3	Aplikace Biontecu na celé víko	63
8.4	Porovnání výsledků jednotlivých variant a jejich diskuse	64
9	úspora hmotnosti a další možnosti optimalizace.....	66
10	Závěr.....	67
	Použitá literatura a další zdroje.....	68
	Seznam příloh.....	70
	Seznam obrázků	72
	Seznam grafů.....	74
	Seznam tabulek	75