

Numerický model výrobku z elastomeru

Bc. Miroslav Vaňhara

Diplomová práce
2018



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická
Ústav výrobního inženýrství
akademický rok: 2017/2018

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Miroslav Vaňhara**
Osobní číslo: **T16223**
Studijní program: **N3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Řízení jakosti**
Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Numerický model výrobku z elastomeru**

Zásady pro vypracování:

1. Literární přehled
2. Návrh numerického modelu
3. Řešení modelu
4. Vyhodnocení modelu

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

Dle doporučení vedoucího diplomové práce

Vedoucí diplomové práce:

doc. Ing. Jakub Javořík, Ph.D.

Ústav výrobního inženýrství

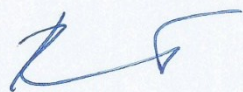
Datum zadání diplomové práce:

2. ledna 2018

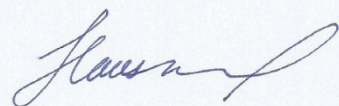
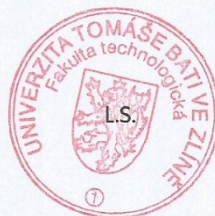
Termín odevzdání diplomové práce:

18. května 2018

Ve Zlíně dne 2. února 2018



doc. Ing. František Buňka, Ph.D.
děkan



prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D.
ředitel ústavu

Příjmení a jméno: VANHARA MIROSLAV

Obor: ŘÍZENÍ JAKOSTI

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby ¹⁾;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3 ²⁾;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně 3.5.2018

Vanhara Miroslav

¹⁾ zákon č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, § 47 Zveřejňování závěrečných prací:

(1) Vysoká škola nevdělečně zveřejňuje disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce, u kterých proběhla obhajoba, včetně posudků oponentů a výsledku obhajoby prostřednictvím databáze kvalifikačních prací, kterou spravuje. Způsob zveřejnění stanoví vnitřní předpis vysoké školy.

(2) Disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce odevzdané uchazečem k obhajobě musí být též nejméně pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněny k nahlížení veřejnosti v místě určeném vnitřním předpisem vysoké školy nebo není-li tak určeno, v místě pracoviště vysoké školy, kde se má konat obhajoba práce. Každý si může ze zveřejněné práce pořizovat na své náklady výpisy, opisy nebo rozmnoženiny.

(3) Platí, že odevzdáním práce autor souhlasí se zveřejněním své práce podle tohoto zákona, bez ohledu na výsledek obhajoby.

²⁾ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 35 odst. 3:

(3) Do práva autorského také nezasahuje škola nebo školské či vzdělávací zařízení, užije-li nikoli za účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obchodního prospěchu k výuce nebo k vlastní potřebě dílo vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacímu zařízení (školní dílo).

³⁾ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 60 Školní dílo:

(1) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení mají za obvyklých podmínek právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla (§ 35 odst. 3). Odpírá-li autor takového díla udělit svolení bez vážného důvodu, mohou se tyto osoby domáhat nahrazení chybějícího projevu jeho vůle u soudu. Ustanovení § 35 odst. 3 zůstává nedotčeno.

(2) Není-li sjednáno jinak, může autor školního díla své dílo užít či poskytnout jinému licenci, není-li to v rozporu s oprávněnými zájmy školy nebo školského či vzdělávacího zařízení.

(3) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení jsou oprávněny požadovat, aby jim autor školního díla z výdělku jím dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence podle odstavce 2 přiměřeně přispěl na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložily, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přihlídí k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

ABSTRAKT

Cílem této práce bylo vytvořit konečně prvkový model elastomerního výrobku. Jedná se o trubkový dopravní pás, který se používá pro uzavřenou dopravu materiálů.

Teoretická část se zabývá základní terminologií dopravních pásů, vysvětlením hyperelastivity a materiálovou podstatou elastomerů.

Praktická část řeší analýzu dopravního pásu. Konstrukce dopravního pásu byla navržena tak, aby docházelo k optimálnímu sbalení do tvaru trubky. Byla zkoumána optimální poloha výztuží a optimální poloha úhlu výztuží.

Numerická analýza probíhala v softwarech od firmy MSC, byl použit software MSC. Patran 2017 a MSC. Marc Mentat 2017.

Klíčová slova: Numerická analýza, hyperelastivita, MSC, Marc Mentat, Patran, trubkový dopravní pás

ABSTRACT

The aim of this study was to create finite element model of an elastomeric model. It is a tubular conveyor belt, which is used for the closed transport of materials.

The theoretical part deals with basic terminology of conveyor belts, explanation of hyperelastics and material essence of elastomers.

The practical part solves the analysis of the conveyor belt. The construction of the conveyor belt was designed to optimally shaped the pipe. The optimal position of the reinforcement and the optimal position of the reinforcement angle were investigated.

Numerical analysis was carried out in MSC software, MSC software was used. Patran 2017 and MSC. Marc Mentat 2017.

Keywords: Numerical analysis, Hyperelasticity, MSC, Marc Mentat, Patran, Tubular Conveyor Belt

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucímu této diplomové práce doc. Ing. Jakubovi Javoříkovi, Ph.D za spolupráci, příkladné vedení, ochotu a čas, který mi při vypracování věnoval. Dále bych chtěl poděkovat své rodině, přátelům a kolegům za podporu.

Prohlašuji, že odevzdaná verze bakalářské/diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

OBSAH

ÚVOD	9
I TEORETICKÁ ČÁST	10
1 DOPRAVNÍ PÁSY	11
1.1 DOPRAVNÍ PÁSY BEZ KOSTRY	11
1.2 DOPRAVNÍ PÁSY S KOSTROU.....	11
1.2.1 Dopravní pásy s textilní kostrou	12
1.2.2 Dopravní pásy s ocelovou kostrou	14
1.3 POJENÍ PRYŽE S KOVEM.....	15
1.3.1 Typy vazeb	16
1.4 TRUBKOVÉ DOPRAVNÍ PÁSY	16
1.5 KONSTRUKCE TRUBKOVÝCH DOPRAVNÍCH PÁSŮ.....	17
1.5.1 Výpočet parametrů trubkového dopravního pásu	18
1.5.2 Návrh konstrukce	20
1.6 MECHANICKÉ CHOVÁNÍ DOPRAVNÍCH PÁSŮ	21
2 MECHANIKA KOMPOZITŮ	22
2.1 KOMPOZITY VYZTUŽENÉ JEDNOSMĚRNÝMI DLOUHÝMI VLÁKNY	22
2.2 KOMPOZITY S ORIENTOVANÝMI VLÁKNY	23
2.3 MATICE TUHOSTI A PODDAJNOSTI PRO ORTOTROPNÍ MATERIÁLY	24
3 HYPERELASTICITA	26
3.1 HYPERELASTICKÉ MODELÝ	27
3.1.1 Hyperelastické modely založené na mikro-mechanické vnitřní struktúře.....	28
3.1.2 Hyperelastické modely fenomenologické	28
3.1.3 Materiálové konstanty hyperelastických modelů.....	30
3.1.4 Zkouška jednoosým tahem.....	31
3.1.5 Biaxiální zkouška	32
3.1.6 Zkouška čistým smykem.....	32
4 ELASTOMERY	33
4.1 KAUKUKOVÉ SMĚSI	33
4.1.1 Polymery v kaučukové směsi.....	34
4.1.2 Plnicí systém	37
4.1.3 Stabilizační systém.....	37
4.1.4 Vulkanizační systém	38
4.1.5 Speciální přísady	39
4.2 VULKANIZACE.....	39
4.2.1 Vliv vulkanizace na vlastnosti vulkanizátu.....	40
4.2.2 Průběh vulkanizace	40
4.2.3 Optimum vulkanizace	41
4.2.4 Vulkanizace dopravních pásů	41
5 VÝZTUŽE	42

5.1	POŽADAVKY NA VÝZTUŽE	42
5.2	KORDOVÁ TKANINA	42
5.3	MATERIÁLY TKANIN.....	43
II	PRAKTICKÁ ČÁST	44
6	CÍL PRÁCE	45
7	KONSTRUKCE PÁSU	46
8	ANALÝZA – PREPROCESSING	47
8.1	TVORBA SÍTĚ – SÍŤOVÁNÍ MODELU	47
8.2	TVORBA SÍTĚ – TYP ELEMENTŮ	48
8.3	MATERIÁL.....	49
8.3.1	Elastomerní matrice	49
8.3.2	Ocelové výztuže	51
8.4	DEFINICE VÝZTUŽÍ – FUNKCE REBAR	51
8.5	OKRAJOVÉ PODMÍNKY	53
9	ANALÝZA – SOLVER.....	57
10	METODIKA MĚŘENÍ.....	58
10.1	MĚŘENÍ POLOMĚRU KRUŽNICE SBALENÉHO PÁSU	58
10.1.1	Měření reakční síly.....	59
10.2	STANOVENÍ OPTIMÁLNÍ POLOHY VÝZTUŽÍ.....	60
10.3	STANOVENÍ OPTIMÁLNÍ POLOHY ÚHLU VÝZTUŽÍ	60
11	VÝSLEDKY MĚŘENÍ	61
11.1	VÝSLEDKY ANALÝZY PRO STANOVENÍ OPTIMÁLNÍHO ÚHLU VÝZTUŽÍ	61
11.2	VÝSLEDKY ANALÝZY PRO STANOVENÍ OPTIMÁLNÍ POLOHY VÝZTUŽÍ.....	64
11.2.1	Výsledky pro úhel 30 ° při protažení o 12,5 %.....	64
11.2.2	Výsledky pro úhel 30 ° při protažení o 4 %.....	66
11.2.3	Výsledky pro úhel 45 ° při protažení o 12,5 %.....	68
11.3	SROVNÁNÍ A DISKUZE VÝSLEDKŮ.....	69
	ZÁVĚR	75
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	76
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	78
	SEZNAM OBRÁZKŮ	80
	SEZNAM TABULEK.....	82
	SEZNAM PŘÍLOH.....	83

ÚVOD

Výrobky z elastomerů patří svou materiálovou podstatou do specifické skupiny, jenž vykazuje hyperelastické chování. Elastomerní materiály jsou velmi pružné a poddajné. Pro přesné popsání takovýchto materiálu byla zavedena celá řada nelineárních materiálových modelů, které jsou založeny na vztahu pro hustotu deformační energie.

Pro numerické modely elastomerních výrobků je nutno využít sofistikované programy, které dokáží nejlépe simulovat nelinearitu závislosti napětí na deformaci. V této práci je použit program Marc Mentat od firmy MSC, který nabízí široké spektrum funkcí a dává tak možnost přesných návrhů modelů. Možnost simulace chování materiálu umožňuje zrychlit a značně snížit cenu za celkový vývoj výrobku. Pro řešení a výpočty je vyvinuta celá řada metod. Mezi nejznámější patří metoda konečných prvků - FEM analýza.

V této práci je řešena numerická analýza trubkového dopravního pásu. Tento pás je výhodně využíván pro dopravu sypkých materiálů. Tyto pásy jsou využívány v těžkých podmínkách, poskytují uzavřenou dopravu materiálů, vzduchotěsnost a prachotěsnost, jsou schopny dopravovat materiál i na velké vzdálenosti. Speciální konstrukce pásu umožňuje sbalení pásu při dopravování materiálu a rozevření pásu pouze při nakládání nebo vykládání. Pro funkčnost je pás po obvodu opatřen nosnými válečky.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 DOPRAVNÍ PÁSY

Dopravní pásy jsou výrobky, které patří do skupiny tažných prvků tvořících nekonečnou smyčku, a které se používají pro klasické způsoby dopravy břemen, sypkých materiálů, apod. Tažný prvek tvoří u dopravního stroje funkci nosnou, tažnou nebo současně obě funkce. Dopravníky můžeme zařadit do několika skupin, a to pásové dopravníky, lano-pásové dopravníky, korečkové elevátory a speciální pásové dopravníky. [1]

Norma ČSN 26 0001 uvádí rozlišení dopravních pásů podle druhu a provedení na tyto typy pásů:

- ***Dopravní pásy s kostrou:***

- Ocelovou,
- Textilní,
- Speciální,

- ***Dopravní pásy bez kostry:***

- Ocelové pásy,
- Textilní pásy,
- Drátové pásy.

[1]

1.1 Dopravní pásy bez kostry

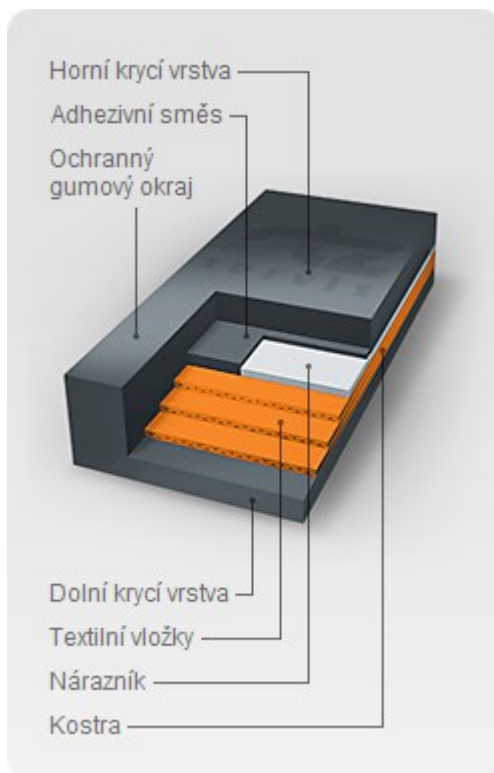
Tento typ pásů je materiálově homogenní. Materiál udává pevnost pásu i ostatní požadované vlastnosti. Tyto pásy slouží k technologické mezioperační manipulaci, pro přepravu kusového materiálu. Tento typ pásu lze používat pouze na malé dopravní vzdálenosti, na větší vzdálenosti by byl tento pás velmi neekonomický a téměř nepoužitelný. [1]

1.2 Dopravní pásy s kostrou

Tento typ pásu je tvořen nosnou kostrou a krycím elastomerním materiálem, jak můžeme vidět na Obr. 10. Elastomerní materiál slouží jako ochranné a pružné spojení, které musí vlastnostmi splňovat požadavky, které jsou na dopravní pás kladeny dopravovaným materiálem a prostředím, ve kterém pás pracuje. Tyto vlastnosti jsou například odolnost vůči zvýšeným teplotám, odolnost vůči olejům, otěruvzdornost, zdravotní nezávadnost. Kostra musí přenášet veškeré zatěžující síly působící na dopravník a udává tak pevnost pásu jako celku. Materiál kostry může být textilní nebo ocelový. [1]

1.2.1 Dopravní pásy s textilní kostrou

Základem pro tento typ výztuží je nosná kostra složená z jedné nebo několika textilních vložek, které obaluje adhezivní směs (mezivrstva). Samotnou kostru chrání proti poškození krycí vrstvy z elastického materiálu. Kostra bývá také chráněna nárazníky, které slouží za účelem zmírnění nárazových účinků dopadajícího materiálu na pás. Struktura tohoto typu pásu je znázorněna na Obr. 1.



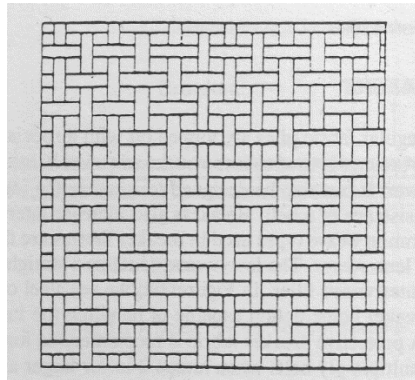
Obr. 1. Struktura dopravního pásu vyztuženého textilní kostrou [1]

Konstrukce textilních výztuží

Konstrukce je složena z podélných nosných nití vyráběných z velmi pevného materiálu. Tyto nitě, přenášející tahové síly, se nazývají osnova. Osnovu spojují příčné nitě, které utváří pevnost kostry (materiál dopadající na pás). Nazýváme je jako útek. Útek nepřenáší tahové síly a materiál, ze kterého je vyroben, bývá totožný s materiálem osnovy, případně jej tvoří materiály nižších pevností. Provázané nitě útku a osnovy tvoří tkaninu. Mezi provázanými nitěmi vzniká textilní vazba. [1]

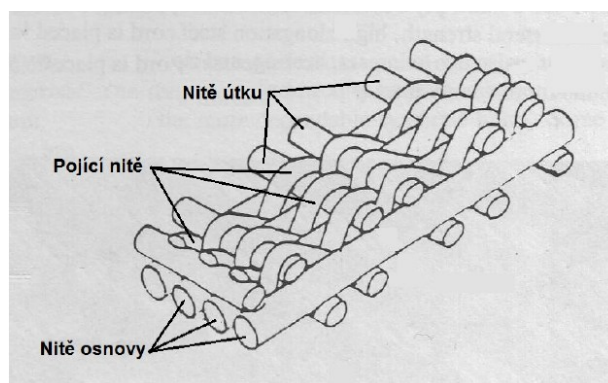
Nejvyskytovanější textilní vazby:

- Prostá vazba (Obr. 2) – tento typ vazby je nejstarší a také nejpoužívanější. Nítě útku a osnovy přes sebe přecházejí a kříží se, což má za následek zvlnění. Toto zvlnění zapříčiňuje roztažení útkových nití při napínání, což bývá často negativním jevem. Výhodou této vazby je jednoduchost konstrukce a snadné spojování. [1]



Obr. 2. Prostá vazba [1]

- Vazba s přímou osnovou (Obr. 3) – u tohoto typu vazby je oproti prosté vazbě eliminováno vlnění nití osnovy a útku pomocí pojících nití. Tato eliminace dodává tkanině dobrou rozměrovou stabilitu a je zamezeno podélnému geometrickému roztahování, výztuž má lepší příčnou podporu vůči zatížení. Výhodou tohoto typu vazby je větší pevnost. Nevýhodou je pak náročnější a drahá výroba. Využití nalézá v oblasti větších tahů v páse. [1]



Obr. 3. Vazba s přímou osnovou [1]

V dopravních páslech se vyskytuje zpravidla 1 až 6 vrstev vložkových výztuží. Tkaniny utkané pomocí pevné vazby se užívají u pásů s jednou vložkou. Tkaniny utkané prostou vazbou nebo vazbou s přímou osnovou se užívají u více vložkových dopravních pásů. Platí pravidlo, že se zvyšujícím se počtem textilních vložek se zvyšuje pevnost pásu a tím i roste

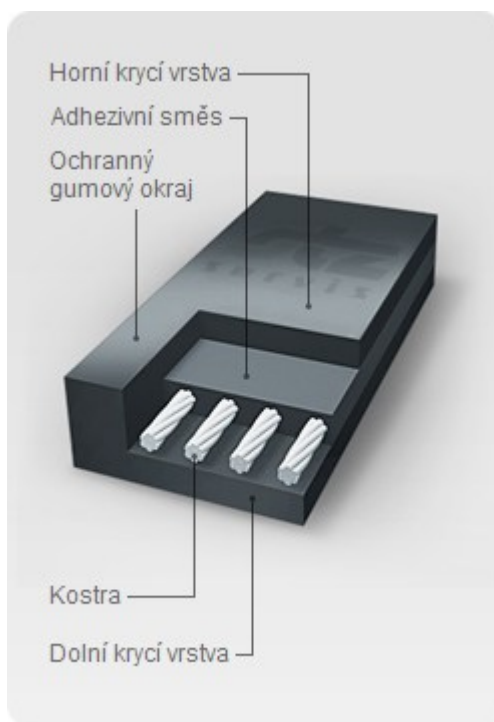
množství materiálu, který je pás schopen přepravovat, ale zároveň klesá pružnost pásu a roste jeho hmotnost. S rostoucím počtem vložek je nutné použít také větší průměr pohánějících bubnů. Průměry bubnů jsou dány normou ČSN 26 0378 a závisí na tloušťce kostry, materiálu a na konstrukci bubnu. [1]

Adhezivní směs

Adhezivní směsí rozumíme vrstvu materiálu, která pojí vložky dopravního pásu tak, aby se na přenosu tahu podílely jako jeden celek, přičemž pevnost pásu tato směs nijak neovlivňuje. Zároveň zajišťuje to, aby se jednotlivé vložky vzájemně neposouvaly během chodu dopravníku. Kdyby nebylo zamezeno pohybu jednotlivých vrstev, vznikalo by teplo vlivem tření a vložky by degradovaly. Tato směs bývá z elastomerního materiálu. [1]

1.2.2 Dopravní pásy s ocelovou kostrou

U těchto typů dopravních pásů je kostra vytvořená ocelovým materiálem. Kostra je tvořena ocelovými pásy, lany, tkaninami a tyto ocelové prvky obaluje krycí vrstva elastického materiálu (Obr. 4). Oproti některým textilním kostrám má ocel výhodu v tom, že neadsorbuje vodu a pásy jsou velmi pevné a málo se protahují. Nejčastěji se používá kostra z ocelových lan a pásy označujeme jako ocelokordové. Použití je v pásech pracujících v náročných podmínkách. [1]



Obr. 4. Struktura pásu s ocelovými výztužemi [1]

Kostra tohoto typu pásu se skládá z řady vysoce pevnostních lan, které jsou vyrobené z oceli a jsou uloženy v jádrové adhezivní směsi. Pevnost pásu se odvíjí podle průměru a počtu lan a pohybuje se v rozmezí od $1000 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-1}$ až do $5000 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-1}$. Příčná tuhost pásů je nízká, a proto se pásy výborně přizpůsobují různým profilům dopravní trasy. Adhezivní pryžová směs slouží zejména k pojení a fixuje vzájemnou polohu ocelových kordů. Součástí pásu jsou vždy také krycí vrstvy. [1]

Krycí vrstva dopravních pásů

Krycí vrstva slouží k ochraně kostry před poškozením od materiálu, který se pomocí pásu dopravuje. Chrání jej tedy před poškozením mechanických a poškozením vlivem působení pracovního prostředí. Ne vždy je však pás složen ze všech vrstev (pásy kryté, řezané, nekryté).

- Horní krycí vrstva – Vrstva, která je ve styku s dopravovaným materiálem. Nejvíce namáhaná část mechanickým opotřebením (dopadem materiálu na pás a abrazivními účinky), je potřeba zvolit větší tloušťku této vrstvy.
- Dolní krycí vrstva – Vrstva, která chrání kostru před mechanickým poškozením (přejíždění pásu přes nosné válečky). Tloušťka je menší než u horní krycí vrstvy.
- Boční ochranné okraje – Chrání okraje kostry před působením okolí. [1]

1.3 Pojení pryže s kovem

Na výrobky, které tvoří spojení pryže a kovu, jsou kladeny poměrně vysoké nároky. Spoj musí splňovat:

- Odolnost vůči působení chemikálií
- Šetrnost vůči životnímu prostředí
- Vyšší pevnost než je u samotné pryže
- Dobrá odolnost vůči okolním vlivům (teplo, ozon, UV) [2]

Rozlišujeme více typů spojení a to dle 3 různých faktorů:

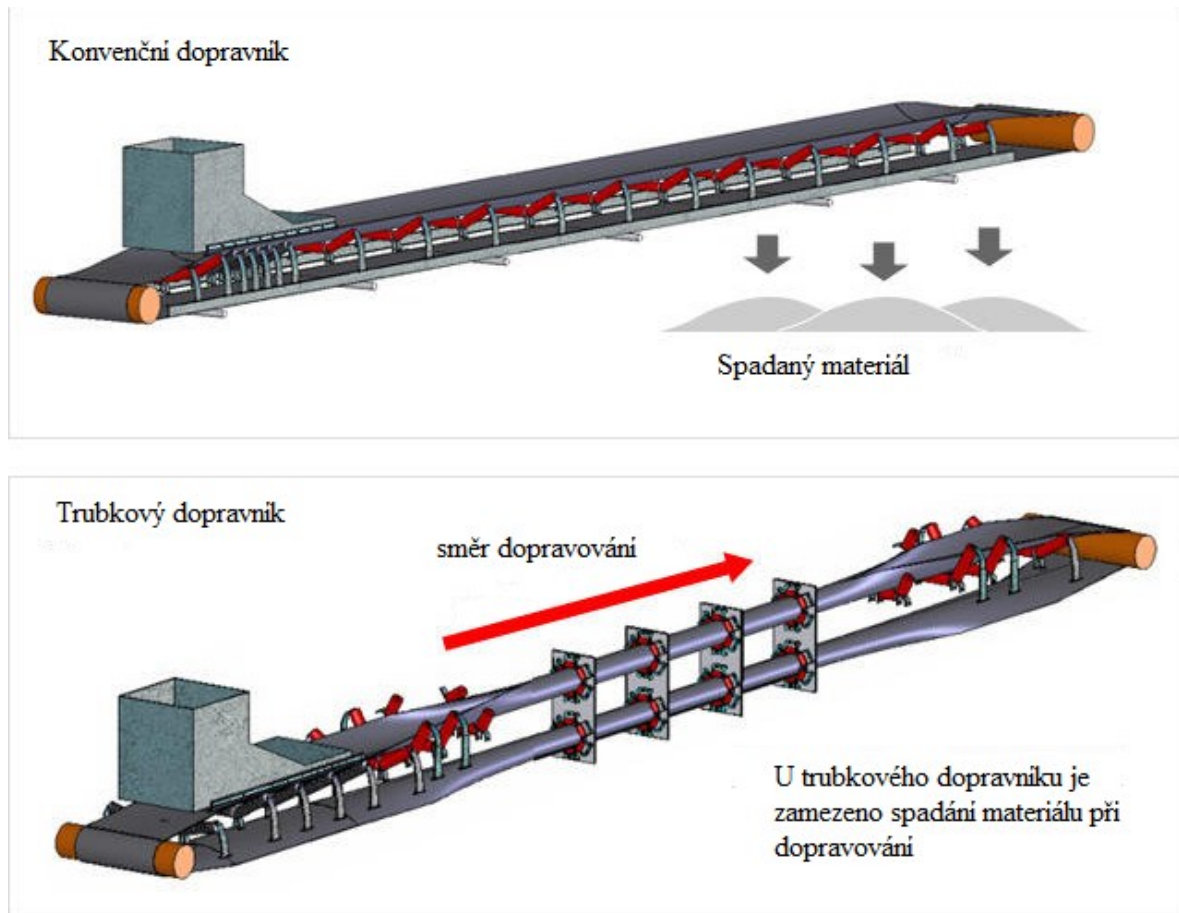
- Pevnost spoje
- Typ vytvořené vazby
- Technologie vytváření vazby [2]

1.3.1 Typy vazeb

- **Mechanická vazba** – Pojená pryž se zachytává v prolisech nebo otvorech zálisku a pevnost spoje výrobku je závislá na tření a mechanické pevnosti pryže, která protéká otvory zálisku. Mezi kontaktními plochami zálisku a výlisku nevznikají žádné fyzikální ani chemické vazby.
- **Lepená vazba** – Pryž a kov spojujeme dodatečně a to pomocí lepidla. Oba spojované prvky je nutné před lepením vhodně upravit. Důležité je dbát i na vhodný typ lepidla, které vybíráme podle spojovaných materiálů. Oproti předchozímu způsobu u tohoto typu vzniká mezi spojovanými prvky chemická a fyzikální vazba. Tento spoj vykazuje dobrou pevnost.
- **Vulkanizace** – Kov je pojen s pryží přímo při vulkanizaci ve formě pomocí speciálního postupu. Při tomto způsobu pojení vznikají mezi prvky opět chemické a fyzikální vazby. Tento typ pojení je svým charakterem nejpevnější ze všech uvedených typů. [2]

1.4 Trubkové dopravní pásy

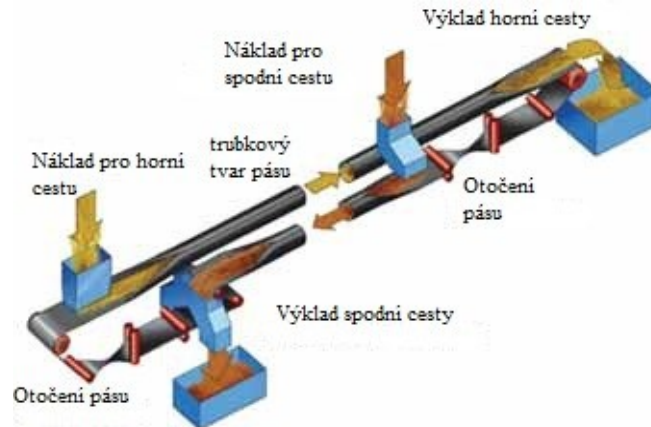
Trubkové dopravní pásy patří mezi poměrně nové typy dopravníků, které jsou na bázi dopravních pásů, majících kompaktní strukturu, malý průřez, ekonomický prostor a hlavní výhodou je možnost přenášení materiálu po křivkové trajektorii. Dopravování materiálu tímto způsobem je šetrnější k životnímu prostředí. Funguje jako kontinuální potrubí, které chrání materiál od vnějšího prostředí a naopak. Vysoké uplatnění tento typ pásu nachází v přístavech, hutnictví, dopravování stavebních syvkých materiálů, s výhodou se pomocí nich dopravuje uhlí, koks do elektráren a vesměs všechny syvké materiály. Na světě existuje téměř 190 km různých dopravních cest pomocí těchto dopravníků. Dopravníky nejsou při dopravování materiálu příliš stabilní, problémy vznikají na podpurných válečcích, kde se často dopravní pásy deformují a poškozují. [3]



Obr. 5. Rozdíl mezi konvenčním a trubkovým dopravováním [4]

1.5 Konstrukce trubkových dopravních pásů

Při přepravování materiálu u tohoto typu dopravníku se materiál nakládá na začátek pásu, kdy je pás plochý. Poté je realizováno sbalení pásu pomocí podpurných válečků a je utvořena vzduchotěsnost uvnitř pásu sbaleného do trubky. Na konci se pás opět rozkládá do plochého tvaru a náklad se vysypává. Na konci pásu musí být opět podpurné válečky tak, aby byla zajištěna stabilita plochého tvaru. Materiál lze dopravovat pod úhlem stoupání až 30° , což umožňuje tření mezi dopravovaným materiálem a trubkovým tvarem pásu. U konvenčních typů je možné dopravovat pouze do úhlu stoupání 18° . Konstrukce umožňuje dopravovat i dvoucestně, tedy dopravník může dopravovat materiál i při cestě zpět. V tomto případě je nutné pouze dovybavit konstrukci o speciální podavač materiálu a sklápěcí zařízení (Obr. 6). [5]



Obr. 6. Dvoucestný trubkový dopravník [5]

1.5.1 Výpočet parametrů trubkového dopravního pásu

Parametry, které ovlivňují návrh pásu, jsou průtok materiálu, šířka pásu, rychlost pásu a výkon. Výrobní průtok materiálu je vždy zadán. [5]

- **Průtok materiálu**

Pro výpočet průtoku materiálu musíme znát rychlost pásu, průřez plochy pásu, hustotu materiálu a musíme znát, jak moc se pás plní. Koeficient plnění se určí z Tab. 1. [5]

Tab. 1. Tabulka pro určení koeficientu plnění [5]

Podíl naplnění materiálem vzhledem k průměru pásu [-]	ϕ [-]
$< \frac{1}{3}$	0,8
$\frac{1}{3}$	0,75
$\frac{1}{2}$	0,58
$\frac{2}{3}$	0,44

Průtok materiálu je pak definován jako:

$$Q = 3600 \cdot v \cdot S \cdot \rho \cdot \phi \quad (1)$$

- **Rychlost pásu**

Rychlost pásu je určující hodnotou pro volbu dopravovaného materiálu, průtok materiálu, šířku pásu a pro návrh konstrukce pásu. Obecně lze konstatovat, že čím vyšší je rychlost pásu, tím nižší je šířka a napětí v pásu, pokud je průtok materiálu konstantní. Takto lze snížit investice do pásu a spotřeba energie. Rychlost pásu bývá mezi 2~5 m·s⁻¹. [5]

- **Průměr pásu**

Průměr lze vypočítat z průtoku materiálu jako:

$$d = \sqrt{\frac{41400 \cdot v \cdot \rho \cdot \phi}{\pi}} \quad (2)$$

- **Šířka pásu**

Šířka pásu se určuje podle zaplnění pásu materiálem a podle průměru. Pokud předpokládáme kruhový průřez pásu, dostáváme z každé strany naplněného materiálu vzdálenost k průměru pásu. Šířku lze pak definovat jako: [5]

$$B = \left(\pi + \left(\frac{1}{3} \sim \frac{1}{2} \right) \right) \cdot d \quad (3)$$

- **Odpor pásu proti pohybu**

Metoda výpočtu není odlišná od výpočtu konvenčního typu dopravníku. Napětí v pásu je v každém bodě jiné, proto se musí počítat pro jednotlivý bod zvlášť. Jedná se de facto o sílu, kterou je nutné překonat pro rozběhnutí pásu. Pro pás naplněný materiálem se vypočítá z rovnice: [5]

$$\dot{W} = (q_0 + q_1 + q_2) \cdot \omega \cdot g \cdot l \cdot \cos \beta \pm (q_0 + q_1) \cdot H \cdot g \quad (4)$$

Pro nezatížený pás pak z rovnice:

$$\dot{W} = (q_0 + q_3) \cdot \omega \cdot g \cdot l \cdot \cos \beta \pm q_0 \cdot H \cdot g \quad (5)$$

, kde q jsou průměrné hmotnosti pásu (q₀), podpěrných válečků v zatížené části dopravníku (q₂), množství materiálu v pásu (q₁), podpěrných válečků v nezatížené části dopravníku na jednotku délky. Je nutné definovat koeficient odporu ω, který je tabelován. [5]

- **Napnutí pásu**

Napnutí pásu se dá určit v jakémkoliv bodě pásu, jak již bylo zmíněno. Určuje se podle rovnice:

$$S_i = S_{i-1} + W_{(i-1) \sim i} \quad (6)$$

napnutí v bodě i je tedy součtem napnutí v předchozím bodě a odporu proti pohybu mezi body $(i-1)$ a i . Takto lze určit napnutí na začátku pásu a na konci pásu. Lze pak definovat obvodovou sílu, která je na hnacím válci z rovnice: [5]

$$P = S_n - S_1 \quad (7)$$

- **Pohon**

Pohon má největší výkon při rozjezdu pásu. Velká spotřeba energie je také při překonávání určitého sklonu pásu. Potřebný výkon na hřídeli se vypočítá dle rovnice: [5]

$$N_0 = \frac{P \cdot v}{1000} \quad (8)$$

a výkon motoru pak dle rovnice:

$$N = \frac{k \cdot N_0}{\eta} \quad (9)$$

1.5.2 Návrh konstrukce

- **Délka přechodové části**

Přechodová část je ta část dopravníku, kde se pás z plochého tvaru balí do trubkového tvaru. Je nutné zvolit správnou délku této části, protože je-li úsek příliš krátký, budou napětí a deformace na obou stranách příliš velké. To způsobí poškození pásu. Pokud bude přechodový úsek příliš dlouhý, zkrátí se trubková část dopravníku. Obecně se pro textilní výztuže volí délka přechodové části jako dvaceti pětinásobek průměru pásu a pro ocelové lana se volí jako padesátinásobek průměru pásu. [5]

1.6 Mechanické chování dopravních pásů

Jak již bylo zmíněno výše, dopravní pás je v podstatě kompozit, složený z ocelových kordů nebo tkaniny a pryžové ochranné vrstvy. Ocelové kordy přenášejí podélné napětí, zatímco pryžová ochranná vrstva slouží k udržení příčného řezu ohýbaného pásu. Dopravní pás má tři základní mechanické vlastnosti. První z nich je, že pás je v podstatě ortotropní s různou tuhostí v podélném a příčném směru. Druhá vlastnost je viskozita, kterou způsobuje elastomerní vrstva, a která umožňuje rozptylovat energii při dynamickém namáhání pásu. Třetí vlastnost je nerovnoměrná ohybová tuhost po šířce pásu. Na základě těchto úvah se používá pro řešení laminátový konstitutivní model. [4]

2 MECHANIKA KOMPOZITŮ

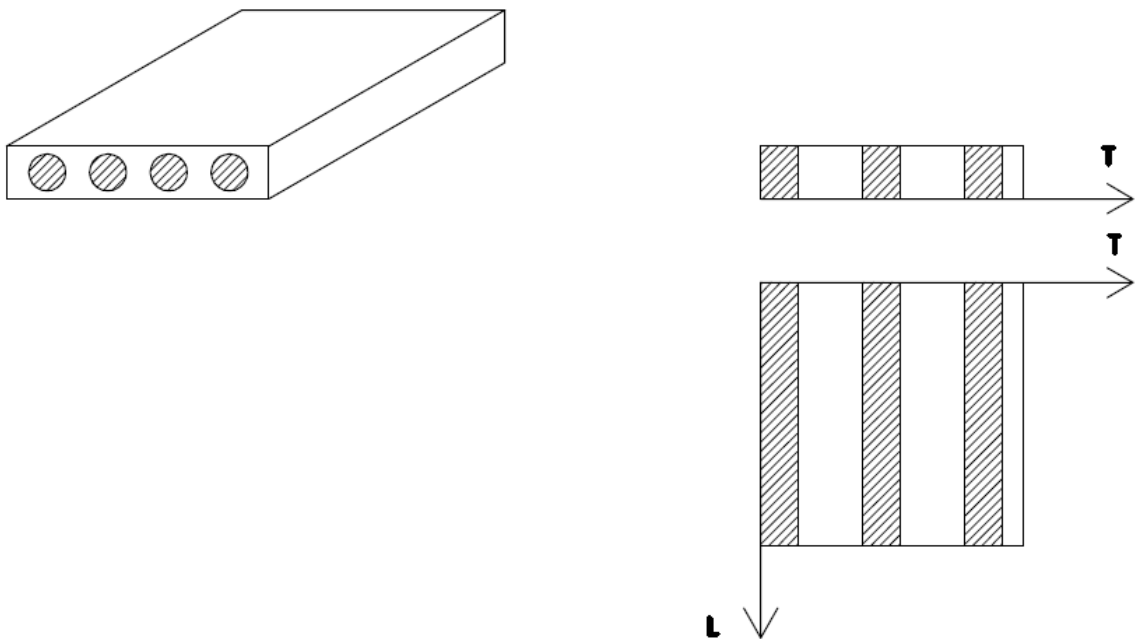
Výsledné mechanické vlastnosti kompozitního materiálu jsou obecně závislé na typu použitého materiálu pro výztuž a matici.

2.1 Kompozity vyztužené jednosměrnými dlouhými vlákny

Máme-li plošnou strukturu vyztuženou jednosměrnými kontinuálními vlákny, můžeme tvrdit, že se jedná o plošně ortotropní prvky s elastickými konstantami, které tvoří matici poddajnosti definovanou jako: [6]

$$[C] = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_L} & -\frac{\nu_T}{E_T} & 0 \\ -\frac{\nu_L}{E_L} & \frac{1}{E_T} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{2G_{LT}} \end{bmatrix} \quad (10)$$

Ve 2D je tak elastické chování dáno čtyřmi nezávislými konstantami. Pro vyjádření těchto konstant lze použít idealizovaný ortogonální model (Obr. 7.)



Obr. 7. Model dlouho vláknové struktury [6]

Tloušťka je jednotková, plocha je tedy dána délkou dílčích částí c , osa L představuje podélný směr vláknové výztuže, osa T směr příčný. Zatížíme-li tento model vnějším normálovým napětím σ_L , vyvolá toto napětí normálové prodloužení ε_L . Podílem normálového napětí a normálového prodloužení můžeme definovat efektivní modul pružnosti E_L . Podmínka rovnováhy je pak: [6]

$$c_1 \cdot \sigma_{L1} + c_2 \cdot \sigma_{L2} = \sigma_L \quad (11)$$

Dosadíme-li za napětí součin modulu a prodloužení a zahrneme-li deformační podmínku, že celkové prodloužení vlákna i matrice je totožné, dostaneme:

$$E_L = E_1 \cdot c_1 + E_2 \cdot c_2 \quad (12)$$

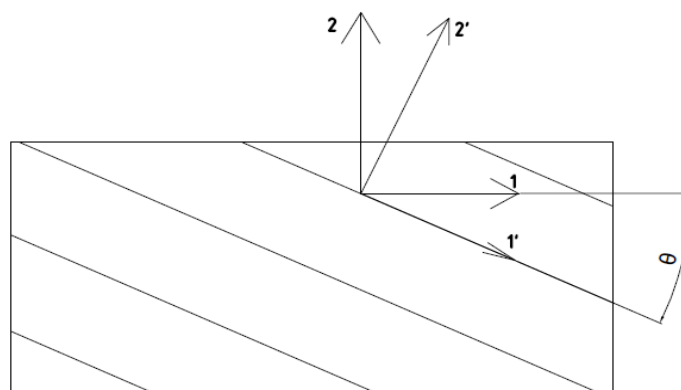
Efektivní Poissonův poměr určíme ze směšovacího pravidla:

$$\nu_L = c_1 \cdot \nu_1 + c_2 \cdot \nu_2 \quad (13)$$

Zatížíme-li model v příčném směru, dostáváme analogicky hodnoty efektivního modulu a Poissonova poměru pro příčný směr. Platí symetrie z výše zmíněné matice poddajnosti, tedy podíly Poissonova poměru a efektivního modulu jsou v příčném a podélném směru shodné. [6]

2.2 Kompozity s orientovanými vlákny

Máme-li vlákna orientovaná pod různými úhly, používá se pro výpočet napětí a deformací transformační matice. [7]



Obr. 8. Schéma orientovaného kompozitu [7]

Transformační matice je definována jako:

$$[T] = \begin{bmatrix} c^2 & s^2 & 2sc \\ s^2 & c^2 & -2sc \\ -sc & sc & c^2 - s^2 \end{bmatrix} \quad (14)$$

a složky této matice jsou pak dány úhlem natočení (Obr. 8.), tedy: [7]

$$c = \cos \theta \quad (15)$$

$$s = \sin \theta \quad (16)$$

Napětí v orientovaných vláknech se pak dá transformovat do hlavního souřadného systému jako: [7]

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = [T]^{-1} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_{12} \end{bmatrix} \quad (17)$$

2.3 Matice tuhosti a poddajnosti pro ortotropní materiály

Matice poddajnosti je pro ortotropní materiál definována: [7]

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/E & -\nu/E & -\nu/E & 0 & 0 & 0 \\ -\nu/E & 1/E & -\nu/E & 0 & 0 & 0 \\ -\nu/E & -\nu/E & 1/E & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/G & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} \quad (18)$$

Matice tuhosti je pak definována: [7]

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{E(1-\nu)}{(1-2\nu)(1+\nu)} & \frac{\nu E}{(1-2\nu)(1+\nu)} & \frac{\nu E}{(1-2\nu)(1+\nu)} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\nu E}{(1-2\nu)(1+\nu)} & \frac{E(1-\nu)}{(1-2\nu)(1+\nu)} & \frac{\nu E}{(1-2\nu)(1+\nu)} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\nu E}{(1-2\nu)(1+\nu)} & \frac{\nu E}{(1-2\nu)(1+\nu)} & \frac{E(1-\nu)}{(1-2\nu)(1+\nu)} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & G & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & G & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & G \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} \quad (19)$$

Smykový modul G je funkcí dvou elastických konstant, dle rovnice:

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (20)$$

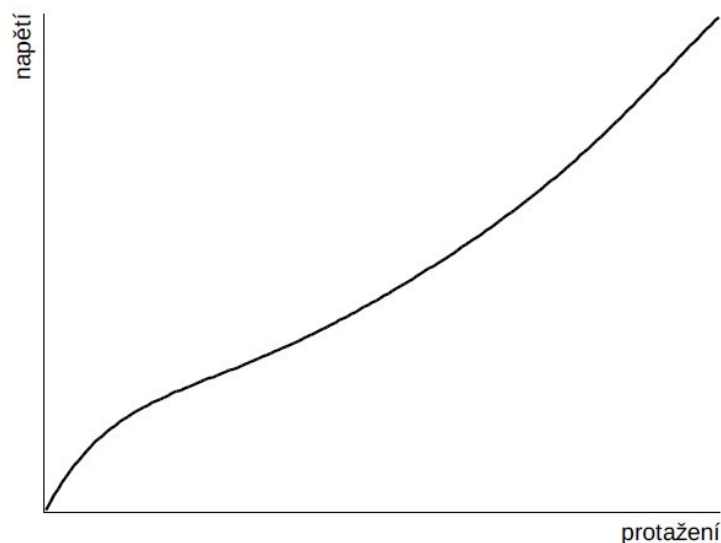
U ortotropních materiálů je obecně definováno 9 nezávislých konstant.

- E_1, E_2, E_3
- G_{12}, G_{23}, G_{13}
- $\mu_{12}, \mu_{23}, \mu_{13}$ [7]

3 HYPERELASTICITA

Elastomerní materiály se vyznačují charakteristickými rysy, kterými se výrazně odlišují od většiny ostatních materiálů. Souhrn těchto rysů se označuje jako hyperelasticita. Hlavními rysy hyperelasticity jsou:

- Velké vratné deformace, mnohonásobně vyšší než u ostatních materiálů. Tažnost dosahuje několika set procent původní délky
- Silná nelinearita závislosti napětí na deformaci. Závislost má esovitý průběh, jak je možno vidět na Obr. 9.
- Materiál je deformovatelný účinkem malých sil. Poměr mezi napětím a deformací je v oblasti malých deformací přibližně deset tisíckrát menší než u ostatních (ideálně elastických) látek.
- Objemová tuhost je velmi vysoká. Objemový modul pružnosti dosahuje stovek až tisíců MPa. Pokud platí přechozí bod je patrné, že Poissonův poměr se blíží hodnotě $\mu = 0,5$. Elastomery lze tedy považovat za objemově nestlačitelné materiály.
- Deformace je časově závislá, deformační přeměny probíhají zpožděně, protože jsou brzděny vnitřními viskózními odpory uvnitř kaučukové hmoty. Deformační chování má projev elastický i viskózní, označujeme ho jako viskoelastické chování.
- Mechanické chování elastomerů je silně závislé na teplotě. Za nízkých teplot (pod 50 °C) se tuhost materiálu blíží vlastnostem kovu. Při vysokých teplotách (nad 100 °C) tuhost naopak výrazně klesá. [8,9]



Obr. 9. Závislost napětí na deformaci elastomerů [8]

Z definice hyperelastického chování je patrné, že platnost Hookeova zákona není splněna, neplatí lineární závislost napětí na deformaci a deformace jsou velké. Přesto lze Hookeův zákon použít v aplikacích, kde velké deformace nepředpokládáme. Pokud však chceme přesné výpočty, je nutno použít nelineární popis závislosti napětí na deformaci.

Pro popis nelineárního chování bylo vyvinuto mnoho hyperelastických modelů. Modely jsou založeny na definici vztahů pro potenciál deformační energie W . [8]

3.1 Hyperelastické modely

Existuje celá řada hyperelastických modelů. První část je založena na mikro-mechanické vnitřní struktuře (Arruda-Boyce, Gent), druhá část jsou modely fenomenologické, ty vychází z deformačně napěťového chování elastomerů na makroskopické úrovni (Neo-Hookean, Mooney, Signiorini, Polynomický, Yeoh. [9])

Používané hyperelastické modely definují vztah pro hustotu deformačního potenciálu ve tvaru:

$$W = W(I_1, I_2, I_3 \{M\}) \quad (21)$$

Jednotlivé invarianty jsou definovány rovnicemi:

$$I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 \quad (22)$$

$$I_2 = \lambda_1^2 \cdot \lambda_2^2 + \lambda_2^2 \cdot \lambda_3^2 + \lambda_1^2 \cdot \lambda_3^2 \quad (23)$$

$$I_3 = \lambda_1^2 \cdot \lambda_2^2 \cdot \lambda_3^2 \quad (24)$$

A protažení pak rovnicí:

$$\lambda_i = \frac{l_i}{l_{oi}} \quad (25)$$

Pro nestlačitelné materiály je třetí invariant $I_3 = 1$. [8]

3.1.1 Hyperelastické modely založené na mikro-mechanické vnitřní struktuře

- **Arruda-Boyce model:**

Tento model se dá považovat jako rozšíření modelu Yeoh (odstraňuje jeho nepřesnosti pro nízké hodnoty deformace). Arruda-Boyce model je vhodný pro deformace do 300 %. Je definován rovnicí: [9]

$$W = n \cdot k \cdot T \left[\frac{1}{2} (I_1 - 3) + \frac{1}{20\lambda_L^2} (I_1^2 - 9) + \frac{11}{1050\lambda_L^4} (I_1^3 - 27) + \frac{19}{7000\lambda_L^6} (I_1^4 - 81) + \frac{519}{673750\lambda_L^8} (I_1^5 - 243) \right] \quad (26)$$

- **Gent model:**

Tento model je podobný jako model Arruda-Boyce, protože také užívá limitního síťového protažení λ_L , které popisuje stav, při kterém se síť už dál neprotahuje a napětí roste do nekonečna. Výhody modelu spočívají v jednoduchosti a schopnosti vystihnout fázi závěrečného vyztužování napěťově deformační odezvy. Je definován rovnicí: [8, 9]

$$W = -\frac{E \cdot I_m}{6} \cdot \ln\left(1 - \frac{I_1 - 3}{I_m}\right) \quad (27)$$

Pro nestlačitelné materiály je hodnota počátečního modulu:

$$E = 3 \cdot n \cdot k \cdot T \quad (28)$$

3.1.2 Hyperelastické modely fenomenologické

- **Neo-Hookean model**

Jedná se o nejstarší a nejjednodušší model. Svou podstatou je schopen postihnout deformace do 40 % v jednoosém namáhání a 90 % v prostém smyku. Vychází z termodynamického principu a principu statistického modelování. Model není schopný postihnout závěrečnou vyztužovací fázi napěťově deformační odezvy elastomerů. Je definován rovnicí: [8]

$$W = \frac{\mu}{2} \cdot (I_1 - 3) \quad (29)$$

- **Mooney-Rivlin model**

Původní model navrhl Mooney ve formě dvou parametrů, které jsou založené na předpokladu linearitu vztahu mezi zatížením a smykem během prosté smykové deformace. Rivlin tento model modifikoval pomocí deformačního invariantů. Obecně jsou formulovány vztahy pro dvou, tří, pěti a devíti parametrové modely, z nichž nejpoužívanější je model dvouparametrový, definovaný ve formě rovnice: [8]

$$W = c_{10} \cdot (I_1 - 3) + c_{01} \cdot (I_2 - 3) \quad (30)$$

Tento model je používán pro tahovou deformaci do 90 % až 100 %, nevýhodou je, že nemusí dobře charakterizovat chování materiálu při stlačování. [8]

- **Polynomický model**

Tento model je založený na prvním a druhém deformačním invariantu. Model je dostatečný pro deformace dosahující až 300 %. Je definován rovnicí ve tvaru: [8]

$$W = \sum_{i+j=1}^N [c_{ij} \cdot (I_1 - 3)^i \cdot (I_2 - 3)^j] \quad (31)$$

Hodnota N se dosazuje od jedné až do nekonečna, zpravidla však nebývá tato hodnota vyšší než 3. [8]

- **Ogden model**

Ogden model je považován jako výchozí pro modely Mooney-Rivlin a Neo-Hookean. Model poskytuje přesné výsledky až do oblasti 700 % protažení při jednoosém tahu. Je definován rovnicí: [9]

$$W = \sum_{i=1}^n \frac{\mu_n}{\alpha_n} \cdot J^{-\frac{\alpha_n}{3}} (\lambda_1^{\alpha_n} + \lambda_2^{\alpha_n} + \lambda_3^{\alpha_n} - 3) + 4,5 \cdot K \cdot \left(J^{-\frac{1}{3}} - 1 \right)^2 \quad (32)$$

- **Third Order Deformation**

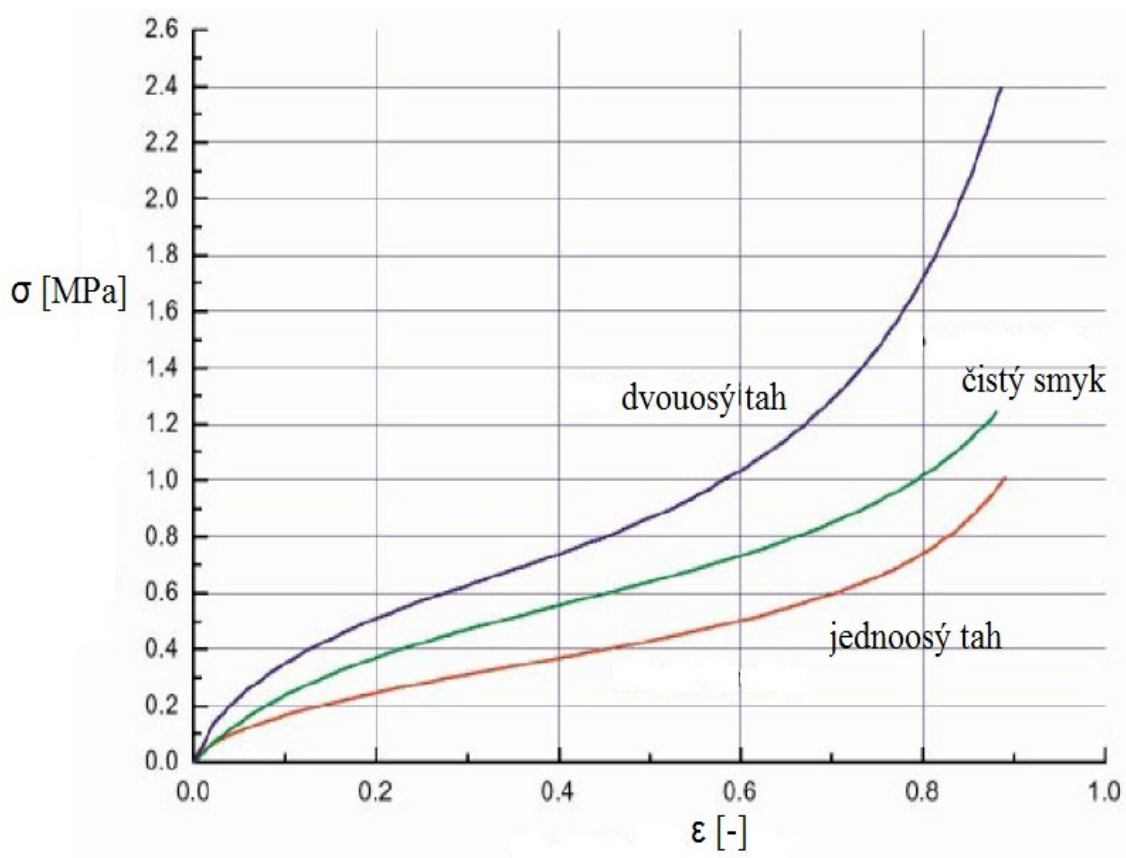
Tento model je speciálním vyjádřením polynomického modelu. Smykový model v tomto typu modelu není konstantní. Je nutné věnovat pozor tomu, aby se údaje v rovnici shodovali s naměřenými daty a aby nebyla ovlivněna stabilita energetické funkce. Model je definován následující rovnicí: [9]

$$W = c_{10} \cdot (I_1 - 3) + c_{01} \cdot (I_2 - 3) + c_{11} \cdot (I_1 - 3) \cdot (I_2 - 3) + c_{20} \cdot (I_1 - 3)^2 + c_{30} \cdot (I_1 - 3)^3 \quad (33)$$

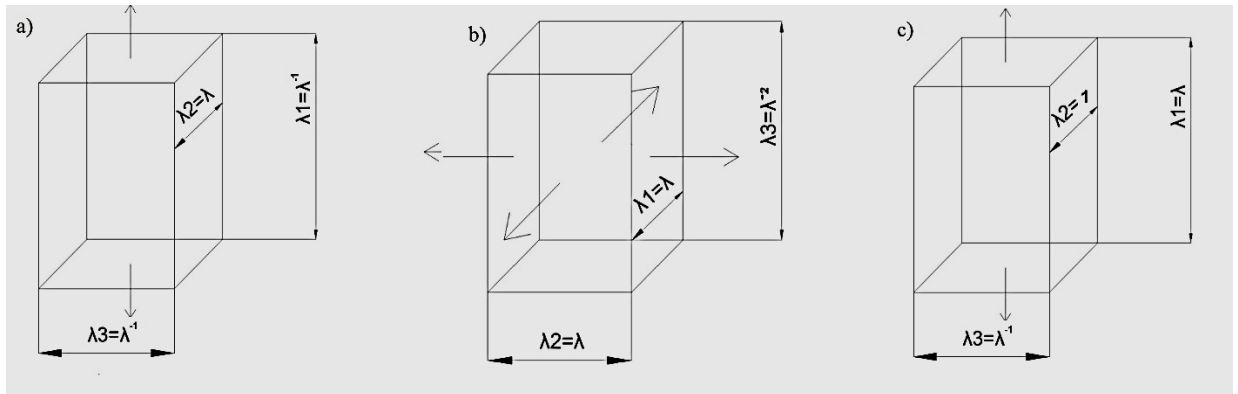
3.1.3 Materiálové konstanty hyperelastických modelů

Jednoduché modely jsou založeny pouze na Poissonově konstantě a na modulu pružnosti. Tyto konstanty není obtížné získat z jednoduchých standardizovaných zkušebních zařízení. Pro hyperelastické modely nám však nevystačí pouze zmíněné konstanty, musíme zjistit chování a provést zkoušky i při dalších typech namáhání. Pro tyto zkoušky už je nutno použít specializované zařízení a vybavení.

Je nutno provádět zkoušky v jednoosém tahu, v biaxiálním namáhání a v namáhání čistým smykem (Obr. 11.). Protože každý elastomerní materiál je jiný, je nutno pro každou analýzu přesně stanovit i konstanty daného materiálu. Do modelů se pak vkládá celá křivka závislosti napětí na deformaci pro každý ze způsobů zatěžování. Na Obr. 10. jsou vyobrazeny jednotlivé křivky a je patrné, že při jednoosém namáhání máme hodnoty napětí nejnižší a při biaxiálním namáhání jsou naměřené hodnoty nejvyšší. Je patrný také typický esovitý průběh napětí na deformaci. [8]



Obr. 10. Závislost napětí na deformaci pro základní typy namáhání [8]

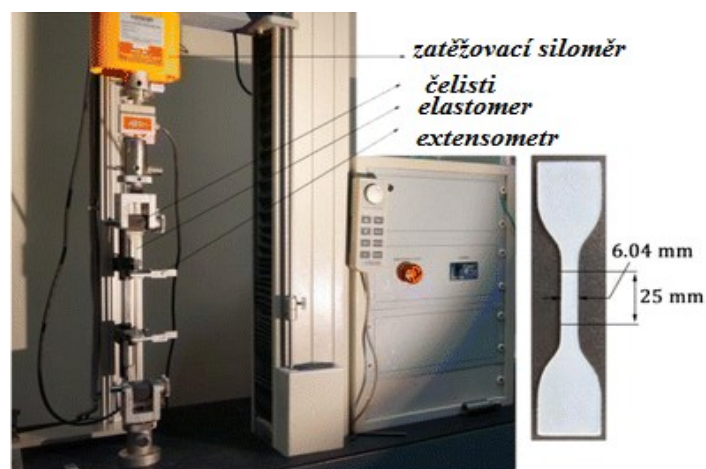


Obr. 11. a) jednoosý tah, b) dvouosý tah, c) čistý smyk [8]

3.1.4 Zkouška jednoosým tahem

Tato zkouška je prováděna na trhacích zařízeních, přičemž se zkušební těleso natahuje konstantní rychlostí a zaznamenává se průběh sledovaných veličin. U elastomerů je také nutné dbát na teplotu zkoušky, protože při různé teplotě by byly naměřeny různé veličiny. Obecně průběh zkoušky předepisuje norma ČSN ISO 37. Výstupem provedené zkoušky je síla a závisle na ní pak prodloužení tělíska. Dále se stanovuje: [8, 10]

- Smluvní napětí v tahu σ [MPa] – určujeme z podílu natahovací síly F a původního průřezu S_0
- Poměrné prodloužení ϵ [%] – vypočítáváme jako procentuální poměr difference délky k původní délce
- Tažnost ϵ_p [%] – jedná se o poměrné prodloužení v bodě přetržení [8]

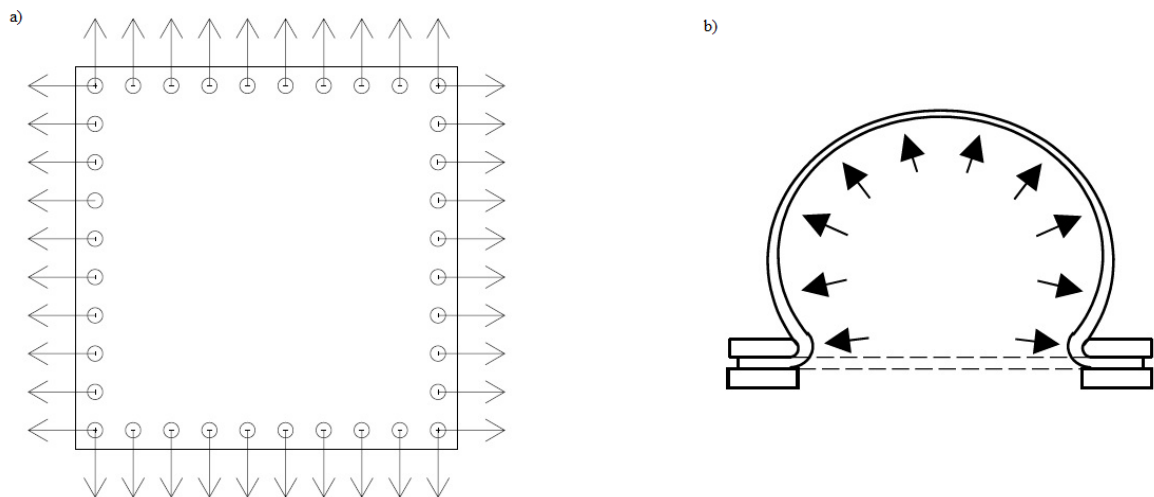


Obr. 12. Zkouška jednoosým tahem (zařízení a tvar zkušebního tělíska) [10]

Prodloužení tělíska se také definuje pomocí poměrného protažení λ . Protažení λ_2 je rovno protažení λ , protažení λ_1 a λ_3 je rovno převrácené hodnotě protažení λ . Předpokládáme objemovou nestlačitelnost. [11]

3.1.5 Biaxiální zkouška

Při testování v tomto módu dochází k napínání plochého tělíska ve všech směrech roviny. Zkoušku lze provádět několika způsoby, například nafukováním plochého tělíska stlačeným vzduchem, natahováním čtvercového nebo kruhového tělíska do dvou vzájemně kolmých směrů. Namáhání probíhá dvěma směry, nulová složka deformace je pouze pro σ_3 . Poměrné protažení λ_1 a λ_2 jsou stejné a rovnají se protažení λ . Poměrné protažení λ_3 se rovná druhé mocnině převrácené hodnoty protažení λ . [8,11]



Obr. 13. a) Natahovaný čtvercový vzorek, b) Nafukovaný plochy vzorek [8]

3.1.6 Zkouška čistým smykem

Zkoušku čistým smykem lze provádět na trhacím zařízení, opatřeným speciálními čelistmi. Tělíska má tvar podélného vzorku a jeho výška je nejméně 10x menší než jeho šířka. Toto tělíska pak natahujeme v jednom směru a zabraňujeme roztahování šířky $\lambda_2 = 1$. Poměrné protažení $\lambda_1 = \lambda$ a $\lambda_3 = \lambda^{-1}$ (Obr. 11.). [8,11]

4 ELASTOMERY

Elastomerní výrobky se v průmyslové praxi vyskytují v širokém spektru. Mezi nejznámější a nejprodukovanější výrobky z elastomerů patří výrobky z kaučukových směsí, ze kterých vulkanizací dostáváme pryž. V technické praxi se pak pryž často opatřuje výztužemi a vzniká tak kompozit. Příkladem takových výrobků jsou pak pneumatiky, řemeny, hadice a dopravní pásy. Následující kapitoly pak podrobně rozebírají podstatu a vlastnosti těchto výrobků. [12]

Elastomery jsou amorfní polymery s náhodným uspořádáním molekul. Monomery pro většinu elastomerů se vyskytují v plynném skupenství, proto můžeme elastomery obecně považovat za vysoce kondenzované plyny. Mezi elastomery patří přírodní nebo syntetické kaučuky, které se míchají s dalšími surovinami a vznikají kaučukové směsi. Působením tepla, tlaku a vulkanizační reakce vzniká pryž. [13]

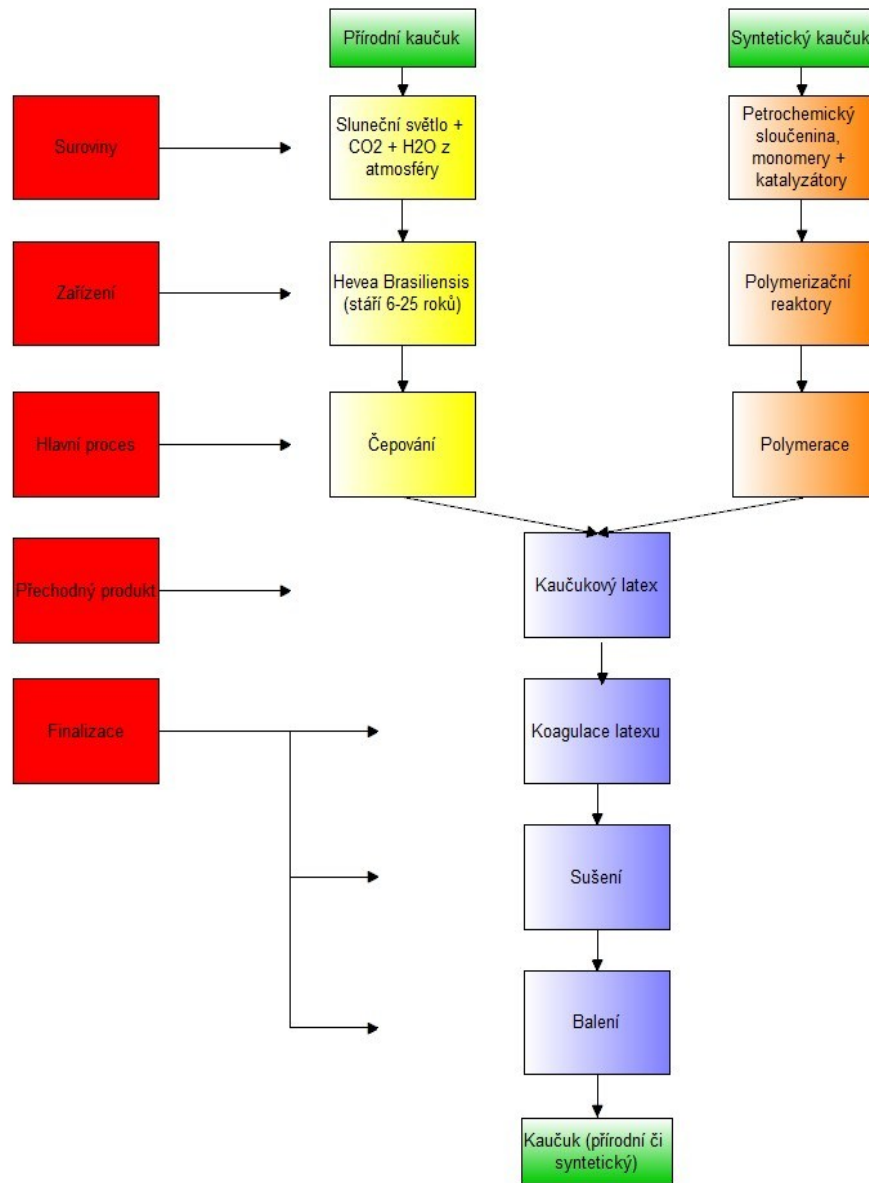
Elastomery jsou vysoce elastické, což je dáno konformací makromolekulárních klubek, jejich vzájemným propletením a volností pohybu segmentů lineární makromolekuly. Tato vlastnost umožňuje deformace v oblasti tisícinásobně vyšší než je u tuhých látek jako jsou kovy. Síla, která je potřebná na stejnou deformaci takových látek je však u elastomerů o 6-7 řádů nižší, protože na změnu konformace molekuly není potřebné vyvinout takovou sílu jako na změnu krystalické mřížky. [14]

4.1 Kaučukové směsi

Aby vznikla pryž, musíme smíchat kaučuk s pomocnými přísadami. Tyto přísady zlepšují zpracovatelnost, umožňují vulkanizaci a udávají vlastnosti pryžového výrobku. Ingredience pro přípravu směsi lze rozdělit do 5 základních kategorií: Polymer (přírodní nebo syntetický kaučuk), Plnicí systém (saze, silika), Stabilizační systém (antioxidanty, antiozonanty), Vulkanizační systém (síra, aktivátory, urychlovače), Speciální přísady (pigmenty, zpracovatelské přísady). V gumárenské technologii se zavádí jednotka DSK, která udává počet dílů na sto dílů kaučuku a používá se pro navažování jednotlivých surovin do směsí. [15]

4.1.1 Polymery v kaučukové směsi

Rozlišujeme přírodní nebo syntetické kaučuky, na Obr. 14. lze vidět rozdíl mezi jejich přípravou.



Obr. 14. Schéma přípravy přírodního a syntetického kaučuku [14]

Přírodní kaučuk

Přírodní kaučuk se označuje zkratkou NR. Vyskytuje se ve formě latexu stromu *Hevea brasiliensis*. Před koagulací se latex stabilizuje pomocí konzervačních látek, jako jsou formaldehyd a siřičitan sodný. Teplota skelného přechodu je $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$. Přírodní kaučuk obsahuje malé množství mastných kyselin a proteinových zbytků, což podporuje sirnou vulkanizaci. [13]

Butadien-styrenový kaučuk

Označuje se zkratkou SBR a jedná se o kopolymer styrenu a butadienu. Styrenový obsah je zpravidla kolem 23 %. Jedná se o nejvíce využívaný syntetický elastomer a jeho produkce je nejvíce objemná. Vzniká emulzní polymerací, která probíhá radikálovým mechanismem, kaučuk vzniká ve formě latexu. Jedná se o nejpoužívanější kaučuk ve výrobě pneumatik.[13]

Většina SBR kaučuků, které se na světě vyrábí, se označuje jako studený SBR, např.: SBR 1500 (Obr. 15.). Vzniká redukčně-oxidační polymerací a polymerační teplota je 5 °C. Při této teplotě vzniká polymer s pravidelnou strukturou a lepšími vlastnostmi než je tomu u tzv. teplého SBR, který se vyrábí pouze v malém objemu. [12]



Obr. 15. SBR kaučuk [16]

Izoprenový kaučuk

Izoprenový kaučuk, který se označuje zkratkou IR, je svými vlastnostmi (lepivost, pevnost, odrazová pružnost, strukturní pevnost za tepla) nejvíce podobný přírodnímu kaučuku. Připravuje se Ziegler-Natta polymerací, takto vzniklý polyizopren obsahuje 96 – 98 % cis - 1,4 formy. IR kaučuk má oproti přírodnímu nižší modul v tahu a vyšší tažnost. IR vulkanizuje pomaleji než přírodní kaučuk. [13, 14]

Butadienové kaučuky

Tento typ kaučuku je druhý nejpoužívanější v oblasti automobilového průmyslu. Nejčastěji se přidává do směsí s jiným typem kaučuku, protože sám o sobě je těžce zpracovatelný. Vyrábí se roztokovou polymerací za pomoci organokovových katalyzátorů. Při polymeraci mohou vzniknout 3 typy izomerie. Tyto typy jsou uvedeny v Tab. 2 i s katalyzátory a lze zde pozorovat závislost vlastností na typu katalyzátoru. Butadienový kaučuk se značí BR. [14]

Tab. 2. Základní vlastnosti mikrostruktury vybraných BR typů [14]

Použitý katalyzátor	Cis 1,4 obsah [hm. %]	Trans 1,4 obsah [hm. %]	1,2 obsah [hm. %]	Tg [°C]
Nd (Buna CB22)	97	2	1	-109
Co (Taktene 1203)	96	2	2	-107
Li (Buna CB 55 NF)	38	52	10	-93
Ti	92	4	4	-105
Ni	96	2	2	-107

Chloroprenový kaučuk

Značí se zkratkou CR a jedná se o nejstarší syntetický kaučuk. Svými specifickými vlastnostmi, jakož jsou velká elasticita, malá hořlavost, dobrá odolnost vůči povětrnostním vlivům, si zachovává významnou pozici mezi synteticky vyráběnými kaučuky. Vyrábí se emulzní polymerací. Rozlišujeme G – typy a W – typy, vždy podle typu použitého regulátoru molekulových hmotností. K vulkanizaci nepotřebují síru, protože snadno vulkanizují za použití oxidů kovů (MgO a ZnO). Používají se na výrobu dopravních pásů pro doly, výrobu hadic, těsnění, membrán, klínových řemenů. Vyroběný chloroprenový kaučuk lze vidět na Obr. 16. [14]



Obr. 16. Chloroprenový kaučuk [17]

4.1.2 Plnicí systém

Plnivo se nejčastěji do směsi přidává ve formě prášku. Pomocí plniv se ovlivňují všeobecně veškeré vlastnosti (zpracovatelnost, měrná hmotnost, pevnost, tažnost, modul, dynamické vlastnosti). Pevnost se však zlepšuje pouze do určitého objemu sazí, po překročení tohoto maxima se naopak zhoršuje. [14]

Saze

Jedná se o uhlík ve formě částic sférického tvaru, které jsou spojeny do aglomerátů. Vznikají nedokonalým spalováním nebo termickou dekompozicí uhlovodíků. Saze představují druhou nejdůležitější složku v gumárenských směsích hned po kaučuku. Mezi parametry, které určují stupeň ztužení u pryží, patří měrný povrch, struktura a povrchová aktivita sazí. Saze mají v kaučukové směsi ztužující účinek, který je tím větší, čím menší jsou částice a čím větší je povrch sazí. Ztužující plniva zvyšují strukturní pevnost a snižují tažnost. [18]

Světlá plniva

Mezi světlá plniva, která našla uplatnění v gumárenství, patří minerály na bázi uhličitanu vápenatého, síranu barnatého, křemičitanu hlinitého. Současná světlá plniva plně konkurují vysoce ztužujícím sazím. Přírodní světlé plniva se těží a dále upravují (melou, třídí, kalcinují). Přírodní plniva (křída, mletý vápenec, kaolín, jíl) jsou nejlevnější formou plniv. Syntetická světlá plniva se připravují třemi základními způsoby, a to srážením, termickými procesy a pyrogenními procesy. [19]

4.1.3 Stabilizační systém

Vulkanizáty po určitém čase negativně mění svoje mechanické vlastnosti, tento jev nazýváme stárnutí vulkanizátu. Stárnutím se zhoršují nejdůležitější mechanické vlastnosti a mění

se i povrch vulkanizátu. Abychom těmto změnám účinně zabránili, přidáváme do směsi antidegradanty (antioxidanty, antiozonanty). Tyto přísady nezamezí stárnutí, ale pouze ho oddalují a zpomalují. Největším činitelem stárnutí je kyslík, často ho podporují další nepříznivé vlivy, jako jsou světlo, ozon a povětrnostní podmínky. Mezi nejdůležitější a nejpoužívanější antidegradanty patří TQM, IPPD, 6 PPD. [14]

4.1.4 Vulkanizační systém

Reakce kaučukové směsi s vulkanizačním systémem se považuje za nejdůležitější proces pro celý gumárenský průmysl. Tento jev objevil Ch. Goodyear. Vulkanizační systém se skládá z vulkanizačních činidel, urychlovačů, aktivátorů a retardérů. [12]

Vulkanizační činidla

Tyto látky jsou meritem vulkanizace, umožňují tvorbu příčných vazeb mezi molekulami kaučuku tak, aby nedocházelo k toku molekul vzhledem k sousedním molekulám, tvoří tedy příčné vazby. Razantně se mění veškeré funkční vlastnosti (např.: tažnost, pevnost, tvrdost, elasticita) a z převážně plastického kaučuku se stává elastická pryž. Mezi nejvýznamnější činidlo patří síra, donory síry, selen, telur, peroxidy a oxidy kovů. [12]

Urychlovače vulkanizace

Vulkanizační činidlo samo o sobě neposkytuje dostatečně účinnou formu vulkanizace, proto se do směsi přidávají urychlovače, které podstatně zkracují dobu vulkanizace a mají vliv i na vlastnosti vulkanizátu. Příznivá vlastnost je i snížení teploty vulkanizace. Podle chemického složení je dělíme na aldehydaminy, guanidiny, tiazoly, sulfonamidy, tiuramy, ditiokabamáty, xantogenany a jiné urychlovače. Technická praxe používá jednodušší rozdělení, a to na pomalé, rychlé, velmi rychlé a ultraurychlovače. [14]

Aktivátory

Aktivátory jsou organické a anorganické látky, které ve směsi aktivují a zvyšují účinek vulkanizačního činidla. Aktivátory také zvyšují síťovací účinek vulkanizačního systému. Mezi používané anorganické činidla patří ZnO, MgO, PbO a mezi organické patří vyšší mastné kyseliny a jejich soli a slabé aminy. [14]

Retardéry

Retardéry jsou takové přísady, které regulují a upravují zpracovatelskou bezpečnost směsí. Nemají však velký vliv na rychlost sítování ani na vlastnosti vulkanizátu. Používají se tam, kde by mohly vznikat problémy s předčasnou vulkanizací směsi při zpracování. Tyto problémy jsou označovány souhrnně jako napalování směsí. V praxi se využívají látky kyselého charakteru, které však snižují rychlost vulkanizace (kyselina salicylová, kyseliny ftalové) a látky nazývané jako inhibitory navulkanizace. [14]

4.1.5 Speciální přísady

Mezi speciální přísady se řadí takové přísady, které zlepšují zpracovatelnost směsi, případně přísady, které druhotně ovlivňují výslednou směs (pigmenty, nadouvadla). [14]

Zpracovatelské přísady

Jsou to látky, které pronikají mezi makromolekuly, dokáží zvětšovat jejich vzdálenosti, zmenšovat propletení a taky ovlivňovat vnitřní tření mezi molekulami. Patří sem změkčovadla a plastikátory, které snižují plasticitu směsi a umožňují snadnější zpracovávání směsí. Umožňují taky zkracovat dobu míchání, snížit teplotu míchání a snížit celkovou spotřebu energie míchání, což snižuje náklady na výrobní proces. [12, 14]

4.2 Vulkanizace

Vulkanizaci lze definovat jako chemicko-tepelný proces, při kterém působením složek vulkanizačního systému a současně teploty dochází ke tvorbě chemických příčných vazeb mezi pryžovými řetězci. Během vulkanizace klesá koncentrace složek vulkanizačního systému až téměř na nulové hodnoty. V procesu vulkanizace se mění lineární struktura kaučukových řetězců na strukturu prostorovou, vzniká vulkanizát. Rapidně se mění i fyzikálně-mechanické vlastnosti. Vytvořením prostorové sítě vulkanizátu se omezí pohyblivost původních makromolekul kaučuku, což má za následek:

- nerozpustnost (vulkanizát pouze botná)
- vzrůstá pevnost polymeru až do určité hodnoty, po jejímž překročení začne pevnost klesat
- s rostoucím stupněm vulkanizace se zlepšuje odolnost vůči trvalé deformaci. [12]

4.2.1 Vliv vulkanizace na vlastnosti vulkanizátu

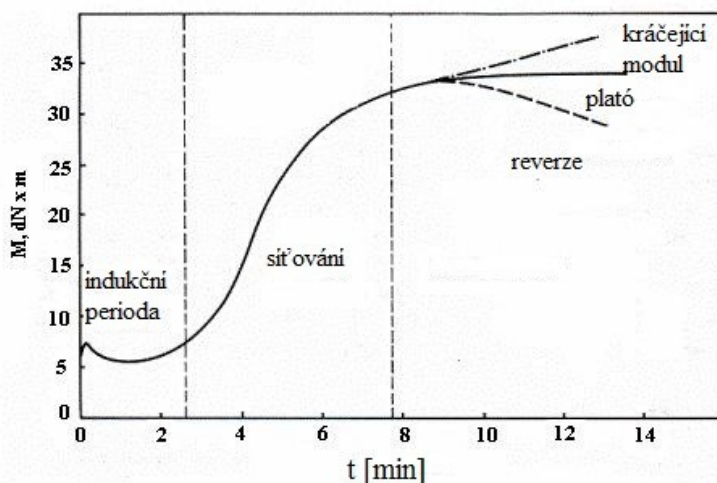
Vulkanizace patří v technologickém postupu výroby mezi konečné operace. Její vliv na vlastnosti výrobku je tedy velmi významný. Ovlivňuje hlavně mechanické a chemické vlastnosti, jak již bylo zmíněno v předchozích kapitolách. Z fyzikálních vlastností dochází ke zlepšování pevnosti v tahu, roste strukturní pevnost a zvyšuje se také odolnost vůči oděru. Vulkanizát je méně citlivý k teplotním změnám a zachovává si ohebnost a tuhost v širokém spektru teplot. Vulkanizace udává konečný tvar výrobku a jeho kvalitu (na kvalitu výrobku má vliv složení směsi a předcházející výrobní technologie). [20]

4.2.2 Průběh vulkanizace

Pro sledování změny jakékoliv měřitelné vlastnosti na čase se používají vulkanizační křivky (Obr. 17.). Sledované změny jsou například obsah volné síry, který v průběhu vulkanizace klesá, z hodnot mechanicko-fyzikálních to může být pevnost, modul pružnosti v tahu apod. Z vulkanizační křivky lze zjistit optimální čas vulkanizace, pro jeho stanovení se používají přístroje zvané vulkanometry. Vulkanometry zaznamenávají dynamický smykový modul (odpor krouticího momentu v závislosti na čase) cyklicky namáhaného zkušebního těles v průběhu vulkanizace. Nejčastěji se v praxi používají vulkanometry s oscilujícím diskem od firmy Alpha Technologies. [14]

Vulkanizační křivku lze rozdělit na 3 fáze:

1. Indukční perioda
2. Vlastní síťovací reakce
3. Změny struktury vzniklé sítě (reverze, jiné reakce)



Obr. 17. Vulkanizační křivka [21]

Indukční perioda – Indukční perioda (označována někdy také jako zpracovatelská bezpečnost) charakterizuje časový úsek, kdy začne probíhat reakce vulkanizačního systému s kaučukem, začíná se tvořit meziprodukt. Délka indukční periody je důležitá pro volbu vulkanizačního systému, protože umožní bezpečnou přípravu směsi a zpracování.

Vlastní síťovací reakce – V této fázi dochází k síťování a mění se mechanické a fyzikální vlastnosti směsi. Dochází k úbytku vulkanizačního činidla a nastává pokles rychlosti reakce.

Změny struktury vzniklé sítě – Obecně mohou nastat tři případy. V prvním případě krouticí moment neustále narůstá, tento stav se označuje jako vulkanizační křivka s krácejícím modulem. Druhý případ nastává tehdy, když krouticí moment zůstává konstantní, jedná se o plochou vulkanizační křivku označovanou jako vulkanizační plató. Třetím případem je klesající krouticí moment po dosažení maxima, tento stav se nazývá reverze a dochází k rozpadu sírných vazeb. [14]

4.2.3 Optimum vulkanizace

Optimální doba vulkanizace je stanovena jako čas, který je potřebný pro dosažení 90 % změny hodnoty krouticího momentu rotoru. Tento čas se dá stanovit z průběhu krouticího momentu za předpokladu znalosti maximálního krouticího momentu a minimálního krouticího momentu. Optimální doba vulkanizace se pak označuje jako t_{90} a určí se jako hodnota odpovídající krouticímu momentu M_{90} , který se vypočítá dle rovnice 34: [12, 14]

$$M_{90} = M_{MIN} + 0,9 \cdot (M_{MAX} - M_{MIN}) \quad (34)$$

4.2.4 Vulkanizace dopravních pásů

Při vulkanizaci dopravních pásů dochází k spojení jednotlivých vrstev nezvulkanizovaného pásu vlivem působení tepla, tlaku a doby vulkanizace. Podstatná je skladba kaučukové směsi (druh kaučuku a volba vulkanizačního systému). Důležitým činitelem je tlak, kterým se jednotlivé vrstvy spojují a zajišťují celistvý a hladký povrch krycích vrstev. Průběh teplot v jednotlivých vrstvách je během vulkanizace rozdílný. Urychlení kaučukové směsi musí být takové, aby ve všech vrstvách směsi nastala vulkanizace současně, což znamená, že vnitřní vrstvy musí být více urychleny než vrstvy vnější. Vulkanizace dopravních pásů probíhá v jednoetážových obřích lisech bez použití formy, zčásti též na lisech rotačních. [14]

5 VÝZTUŽE

Výztužné materiály určují u konečného výrobku jeho vlastnosti a do značné míry i životnost. Ovlivňují tvar výrobku a jeho odolnost vůči cyklickému namáhání. Výztuž v kombinaci s pryžovou matricí dává unikátní vlastnosti dle předpokladu synergického efektu. [1]

5.1 Požadavky na výztuže

Obecné požadavky jsou:

- Odolnost vůči vlhkosti
- Odolnost vůči vyšším teplotám
- Vysoká pevnost
- Dobrá zpracovatelnost
- Možnost dobrého spojení s pryží
- Ekonomika

5.2 Kordová tkanina

Vyrábí se ze skaných osnovních přízí a z tenkého útku jednoduché příze. V praxi se vyskytuje plátňová vazba s velmi řídkou dostavou tenké útkové příze. Útek by měl být velmi tenký, aby se při impregnaci v místech křížení nezachytávala impregnace. [1]



Obr. 18. Kordová tkanina [1]

5.3 Materiály tkanin

Tkaniny jsou vyráběny z přírodních nebo syntetických vláken. K výrobě se používají tyto druhy materiálů:

- Bavlina (B) – Jedná se o přírodní vlákno vyznačující se citlivostí na vlhkost a vložky, jsou náchylné na plísně a tím degradují. Bavlněné tkaniny nejsou vhodné pro velká zatížení z důvodu nízkých pevností. V současné době se téměř nepoužívají a jsou nahrazované syntetickými vlákny.
- Sklo (G) – Tento typ vláken je anorganického původu, pevnost v tahu je pětinasobně vyšší než u bavlny. Skleněná vlákna mají také velmi malé prodloužení. Vyznačují se výbornou odolností vůči chemikáliím a vysokým teplotám (nad 500 °C). Nevýhodou tohoto typu vláken je špatná flexibilita v ohybovém namáhání a nemá dobrou přilnavost k elastomerům.
- Polyester (E) – Vlákna syntetického původu vyznačující se velkou pevností, dobrými tahovými vlastnostmi. Jsou odolná vůči otěru a únavě. Adsorpce vlhkosti je velmi nízká a pás má dobrou rozměrovou stabilitu. Vlákna také odolávají chemikáliím a plísním. Polyesterová vlákna jsou nejpoužívanější pro osnovu v kombinaci s útkem z polyamidových vláken a tvoří tkaninu, která má vysokou pevnost a nízkou tažnost. Takto vytvořené vložky se značí EP.
- Aramid (D) – Vlákna syntetického původu. K výrobě vložek do textilních pásů se používá p-aramid (kevlar). Tento typ vláken má nejvyšší pevnosti a nízké tažnosti (téměř jako ocel). Kevlarová vlákna mají nízké hmotnosti a jsou nehořlavé. Ideální jsou pro výztuže dopravníků s velkými zatíženími. Přes všechny výhody se příliš nepoužívají, a to z důvodu vysoké ceny.
- Ocel – Vlastnosti a technologie výroby ocelových vláken jsou od předchozích zmínovaných materiálů odlišné. Pro lepší adhezi k pryži se vlákno opatřuje vrstvou mosazi. Zpracování ocelových vláken do kordů se provádí slaňováním. Nejdříve se vyrábějí svazky vláken, které se sdružují a slaňují do kordových nití. Existuje mnoho různých druhů konstrukcí. [1]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

6 CÍL PRÁCE

Cílem této diplomové práce bylo vytvořit numerický model trubkového dopravního pásu. Konstrukce byla volena tak, aby se pás prostým tahem sám balil do tvaru trubky, což by mělo pomoci v praxi minimalizovat počet podpůrných válečků, to by vedlo k úspoře energie na pohánění těchto válečků. Na modelu bylo testováno, jak poloha výztuží ovlivňuje samotné balení pásu do tvaru trubky. Testovány byly i různé polohy úhlů výztuží.

Pro simulaci výztuží bylo využito funkce *rebar*, ve které program umožňuje sofistikovaně vytvořit výztužné systémy.

Při simulaci byl použit software pro řešení konečně-prvkových analýz FEM od firmy MSC Software:

- Tvorba modelu – MSC.Patran 2017
- Nastavení analýzy, výpočet a zobrazení výsledků – MSC.Marc Mentat 2017

7 KONSTRUKCE PÁSU

Pro analýzu byl použit výřez pásu z uzavřené smyčky dopravníku, na kterém byla prováděna FEM analýza.

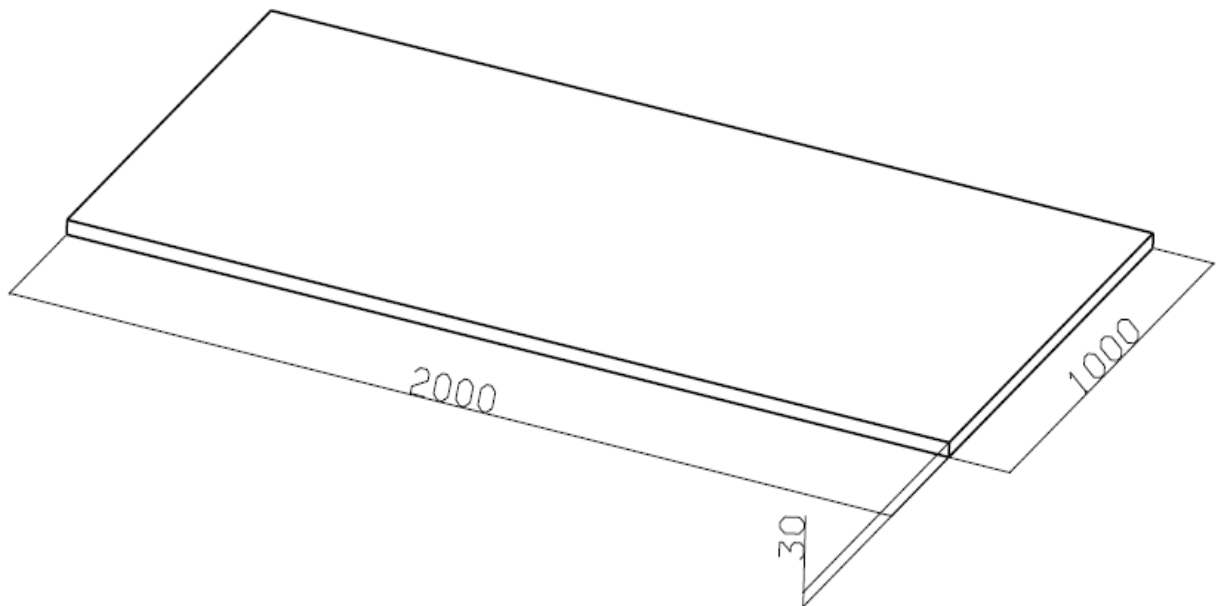
Rozměry pásu byly zvoleny:

- Šířka pásu $s = 1000$ mm
- Délka pásu $l = 2000$ mm
- Tloušťka pásu $t = 30$ mm

Pás byl vymodelován v programu MSC. Patran 2017.

Výztuha byla uvažována jako kordová tkanina tvořená z drátů o průměru 5 mm. Počet použitých drátů na tkaninu byl zvolen na 30. Úhel natočení výztuže a poloha výztuže byla podrobena analýze a byla hledána optimální poloha výztuží.

V modelu byla výztuž vymodelována jako deskový tvar, vlastnosti výztuže byly definovány až v nastavení samotné analýzy.



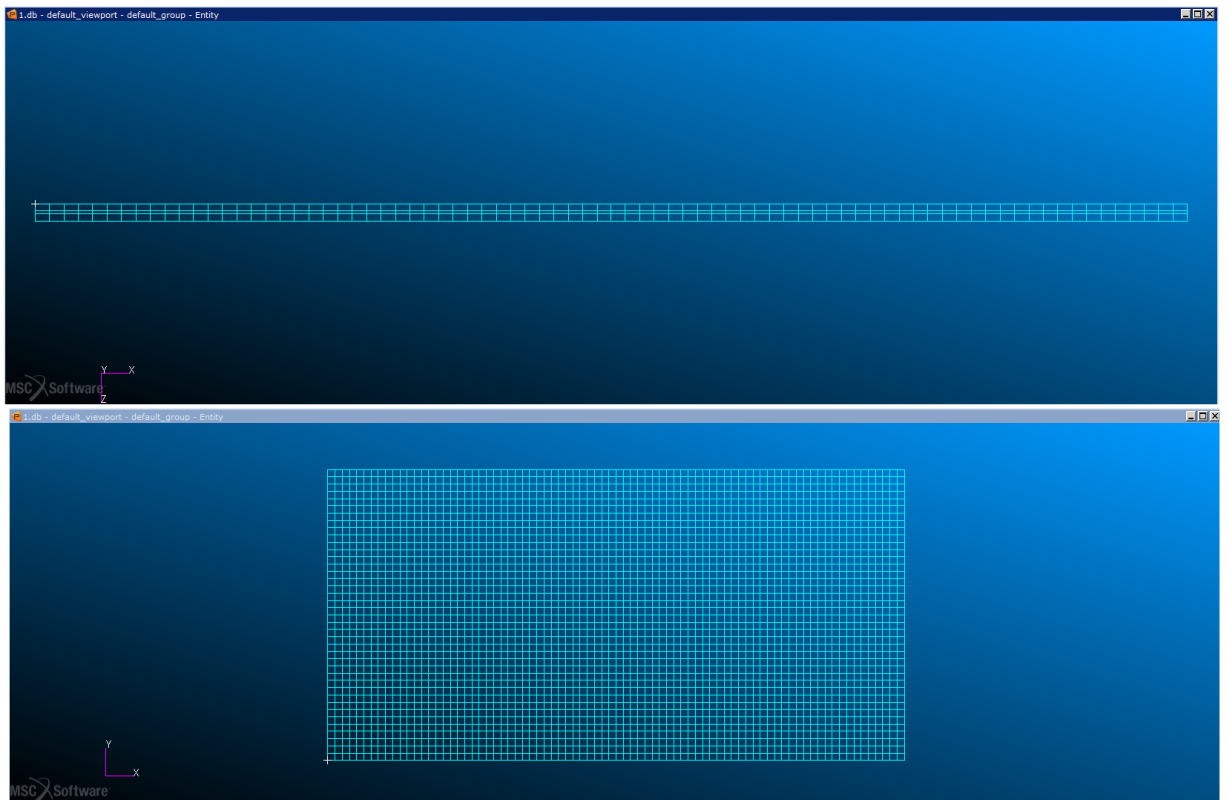
Obr. 19. Tvar a rozměry pásu

8 ANALÝZA – PREPROCESSING

Jak již bylo zmíněno výše, analýza probíhala v softwarech od firmy MSC software. Pro tvorbu modelu a sítě bylo využito programu MSC. Patran 2017, ze kterého byl poté exportován soubor do programu MSC. Marc Mentat 2017, kde byly nastaveny další parametry analýzy. Rozměry modelu byly do programu Marc importovány v metrech.

8.1 Tvorba sítě – síťování modelu

Model pásu byl složen ze dvou plochých desek, z nichž jedna představuje elastomerní matici a druhá představuje výztuže. Model je tedy síťován dvěma sítěmi. Velikost hrany elementu byla stanovena na 25 mm, výška elementu je poté u elastomerní matrice 30 mm, u výztuží byla stanovena na 5 mm.

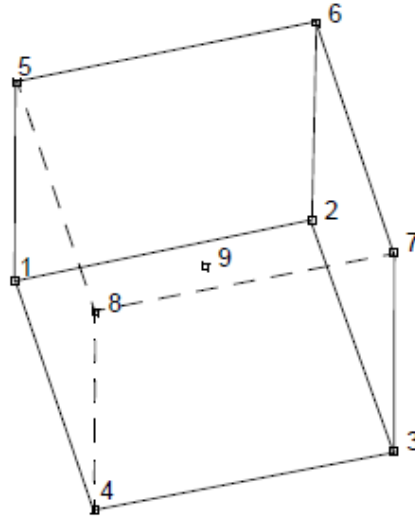


Obr. 20. Síťovaný model

Každá ze sítí je složena z 3200 elementů. Element je typu Hex-8, další určení elementu bylo v programu Marc Mentat.

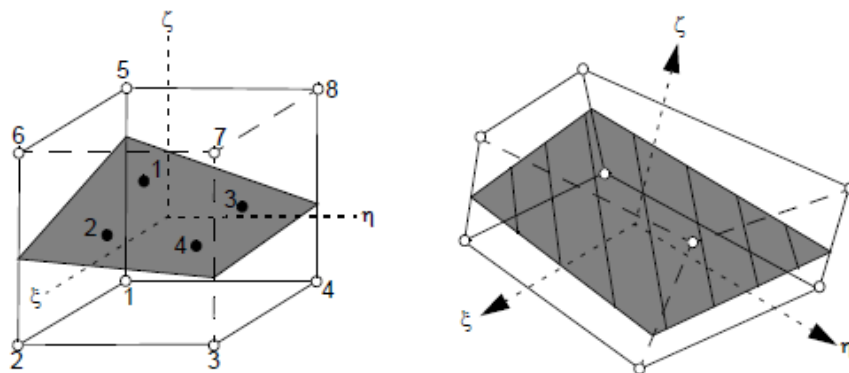
8.2 Tvorba sítě – typ elementů

Pro simulaci elastomerní matrice pásu bylo využito elementu pro 3-D analýzy označeného jako Hex-8-84, tedy šestistěnu, který má celkem 9 uzlů, 8 uzlů v krajních bodech a 1 uzel uprostřed elementu, jak je možné vidět na Obr. 21.



Obr. 21. Element typu Hex-8-84 [22]

Pro správnou funkci funkce REBAR muselo být použito speciálního elementu, který nese označení Hex-8-146. Jedná se o šestistěn, který má 8 uzlů v krajních bodech elementu a dále má definovanou výztuž, jejichž nastavení probíhá v samotné funkci REBAR. Výztuž je zde definována jako samotná vrstva. Tato vrstva má definovány 4 integrační body, pomocí kterých se definuje poloha, směr a orientace výztuže. Znárodnění tohoto typu elementu je na Obr. 22.



Obr. 22. Element typu Hex-8-146 [22]

8.3 Materiál

Pro matici byl použit elastomerní materiál, který byl definován naměřenými daty z jednoosé tahové zkoušky, zkoušky dvouosé napjatosti a zkoušky čistým smykem. Použitá pryž byla vulkanizována ze směsi, ve které byl použit standardní SBR kaučuk. Výztuž byla definována jako izotropní ocelové lano.

8.3.1 Elastomerní matrice

Naměřená data byla načtena do programu Marc Mentat a byla postupně prokládána různými hyperelastickými modely. Sledována byla relativní chyba proložení dat danými modely. Jednalo se tedy v podstatě o regresivní analýzu dat, která byla prokládána speciálními rovnicemi modelů. Vypočítané relativní chyby jednotlivých modelů byly zpracovány do Tab. 3. a pro analýzu byl vybrán model s nejnižší hodnotou chyby.

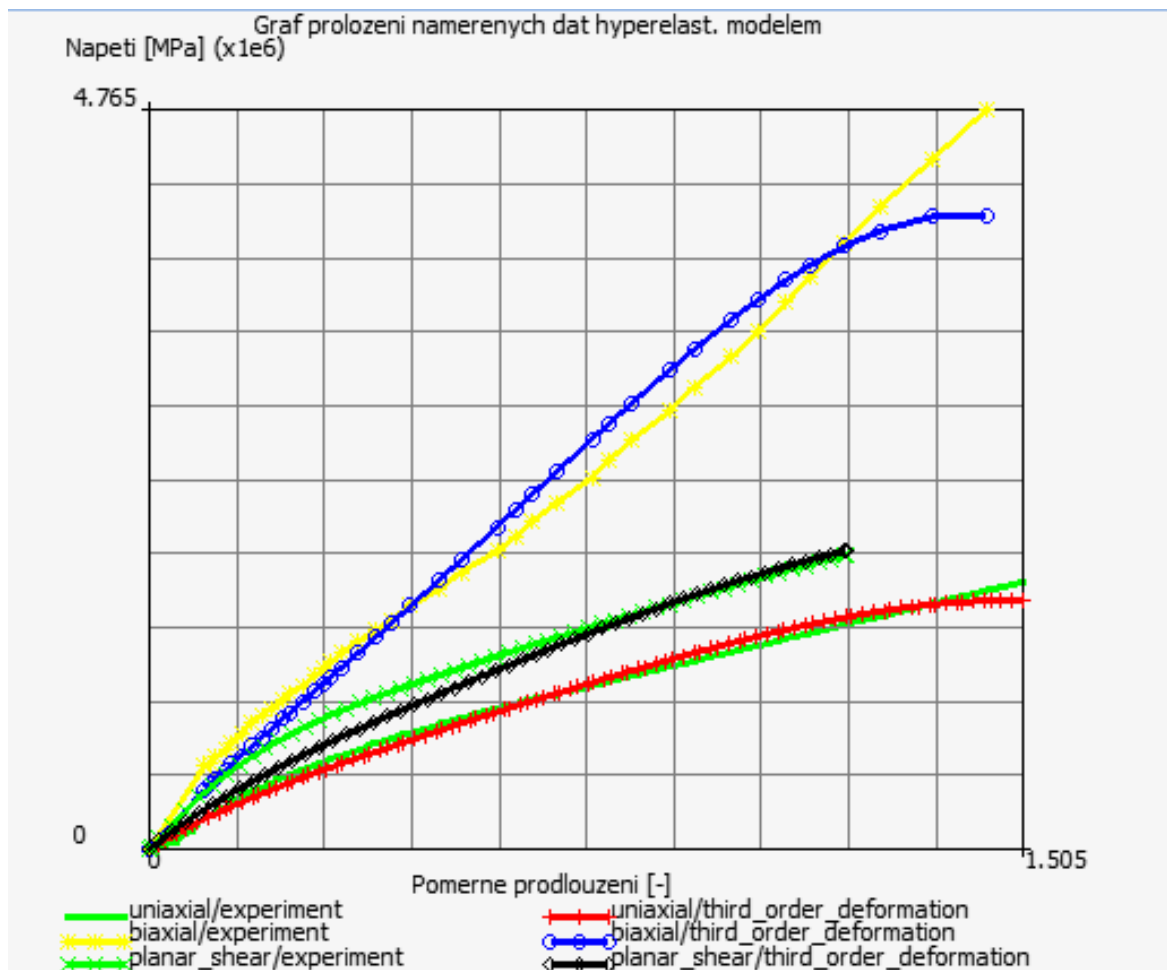
Tab. 3. Tabulka relativních chyb hyperelastických modelů

Hyperelast. model	Relativní chyba [%]
Neo-Hookean	12,59
Mooney (2)	6,57
Mooney (3)	6,49
Signiorini	6,18
Second Order Invariant	5,99
Third Order Deformation	5,64
Yeoh	11,07
Ogden	5,97
Foam	16,47
Arruda-Boyce	11,41
Gent	11,44

Byl vybrán model s názvem Third Order Deformation (viz. Kapitola 3.1.2, rovnice 33). Rovnice tohoto modelu je pak i s vypočtenými koeficienty:

$$W = 235923 \cdot (I_1 - 3) + 144556 \cdot (I_2 - 3) + 1677,51 \cdot (I_1 - 3) \cdot (I_2 - 3) + 28037,1 \cdot (I_1 - 3)^2 - 3755,64 \cdot (I_1 - 3)^3 \quad (35)$$

Na Obr. 23. byly znázorněny naměřené křivky spolu s proloženým zvoleným modelem.



Obr. 23. Naměřená data proložená zvoleným hyperelastickým modelem

8.3.2 Ocelové výztuže

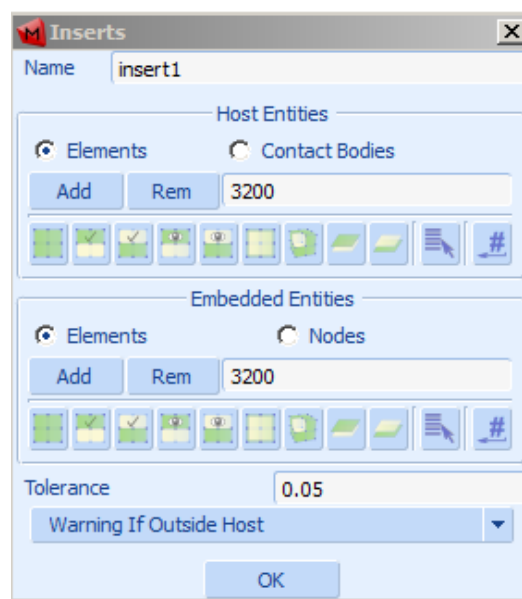
Materiálové charakteristiky ocelových výztuží jsou popsány na Obr. 24. Modul pružnosti byl uveden jako $E = 210000 \text{ MPa}$ a Poissonův poměr jako $\mu = 0,3$

Young's Modulus	2.1e+11	Table	
Poisson's Ratio	0.3	Table	

Obr. 24. Materiálové charakteristiky použité oceli

8.4 Definice výztuží – funkce REBAR

Použití této funkce bylo velmi užitečné, protože tato funkce umožňuje modelovat výztuže nezávisle na matici. Byly tedy vytvořeny 2 vrstvy elementů, z nichž jedna reprezentovala matici a druhá výztuže. Spojení takto vymodelovaných elementů bylo provedeno pomocí funkce Inserts, ve které lze jasně definovat, které elementy budou maticí a které budou výztužné (Obr. 25.).



Obr. 25. Použití funkce Inserts

Definice výztuží (Obr. 26.) bude rozebrána v následujících krocích:

- **Thickness Direction – Stanovení směru výztuží**

Byla vybrána základní definice směru výztuží, které stanovuje, že vrstva pro výztuž bude rovnoběžná s rovinou XY. Referenční osou bude osa X.

- **Rel. Layer Position – Stanovení pozice výztužné vrstvy**

Jedná se o stanovení relativní polohy výztuže uvnitř elementu, nabývá tedy hodnot od 0 - 1. Pozice byla stanovena na 0,5. Jedná se o polohu uprostřed elementů.

- **Rebar Area – Plocha výztuže**

Byl uvažován kruhový průřez výztuže. Plocha vrstvy byla uvažována jako 30 prutů o průměru 5 mm. Délka plochy byla 2 m. Hodnota byla vypočítána jako:

$$S_R = 0,0012 \text{ m}^2 \quad (36)$$

- **Angle – Úhel natočení**

Úhel natočení výztuží byl předmětem zkoumání a nabýval různých hodnot. Referenční osa úhlu natočení byla osa X. Úhel byl zadáván ve stupních.

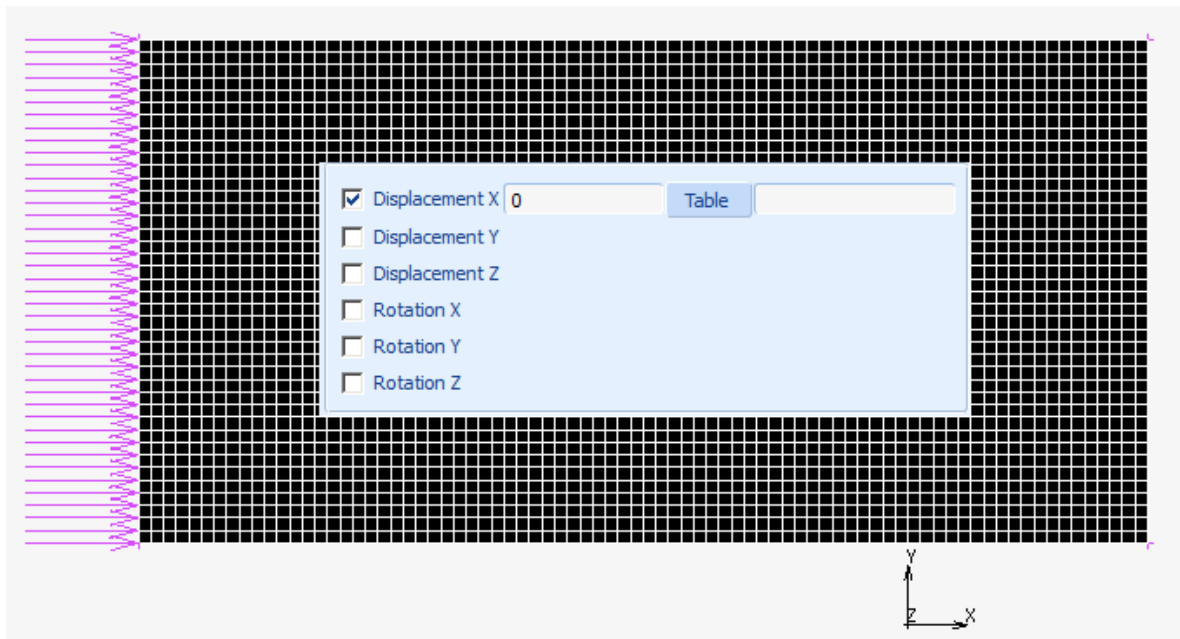
Index					
1	ID	1	Material	Ocel	
			Thickness Direction	Face 4 (1-2-3-4) To Face 5 (5-6-7-8) ▼	
			Rel. Layer Position	0.5	Rebar Area
			# Rebars / Length	1	Angle
					30
2	ID	2	Material	Ocel	
			Thickness Direction	Face 4 (1-2-3-4) To Face 5 (5-6-7-8) ▼	
			Rel. Layer Position	0.5	Rebar Area
			# Rebars / Length	1	Angle
					-30

Obr. 26. Definice výztuže pomocí funkce REBAR

8.5 Okrajové podmínky

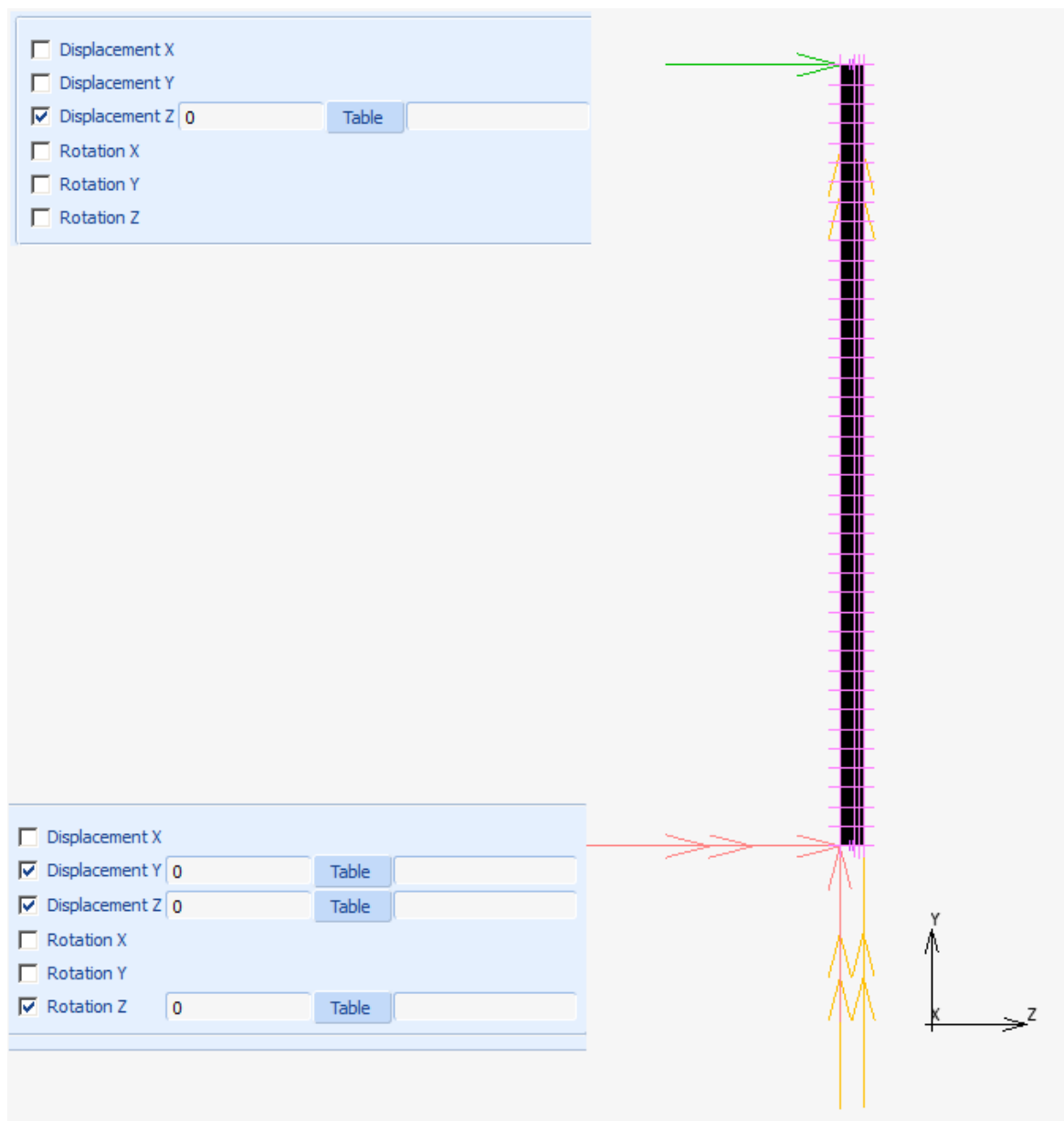
Okrajové podmínky byly stanoveny tak, aby co nejvíce připomínaly reálnou situaci, tedy uzavřený dopravní pás.

Všechny uzly v rovině YZ na levé straně byly uchyceny tak, že bylo zabráněno jejich posunutí v ose X. (Obr. 27.)



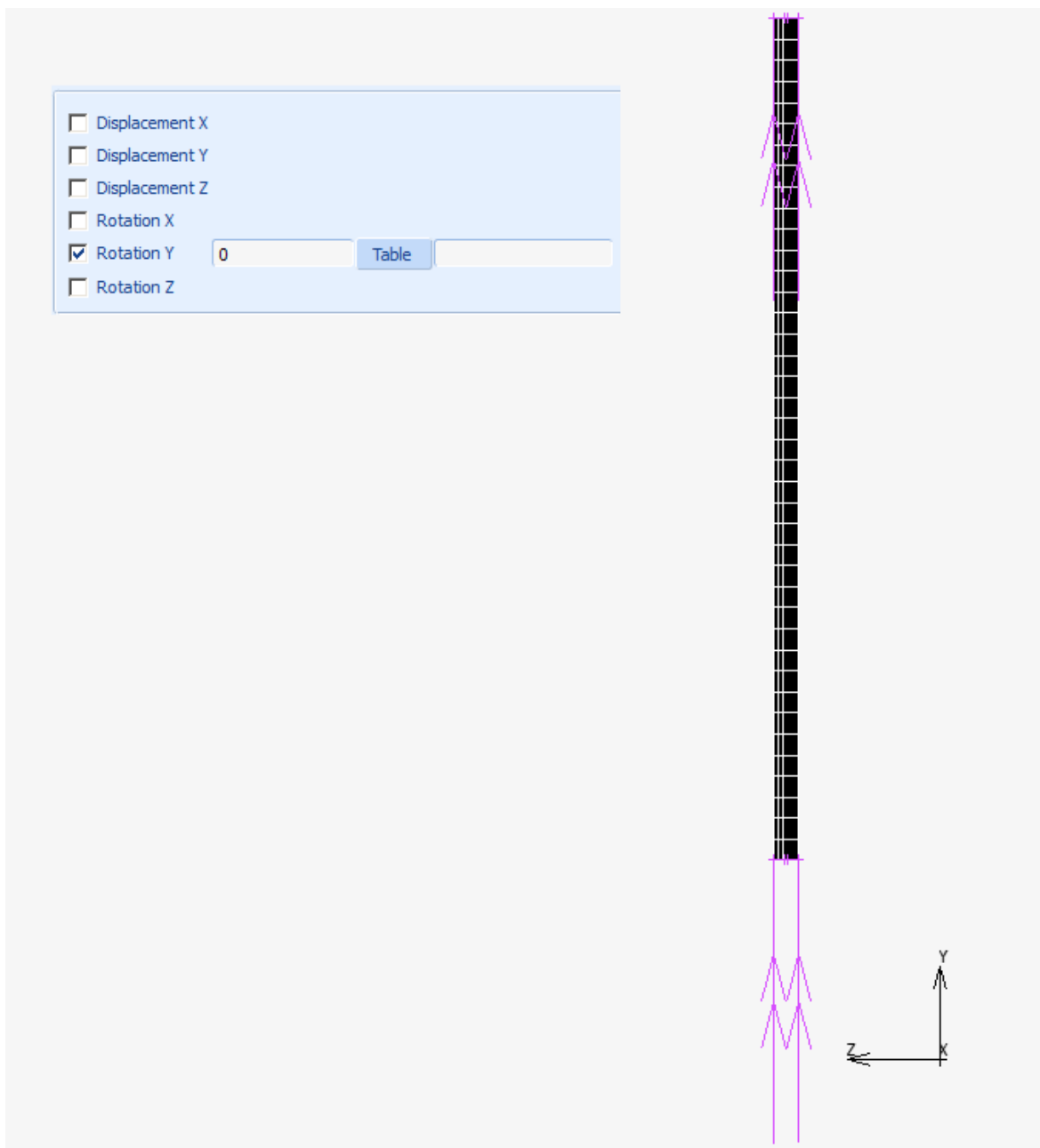
Obr. 27. Okrajové podmínky – zabránění pohybu v ose x

Krajním uzlům na dolní hraně ve stejné rovině YZ na levé straně byly odebrány možnosti pohybu tak, jak je možné pozorovat na Obr. 28.



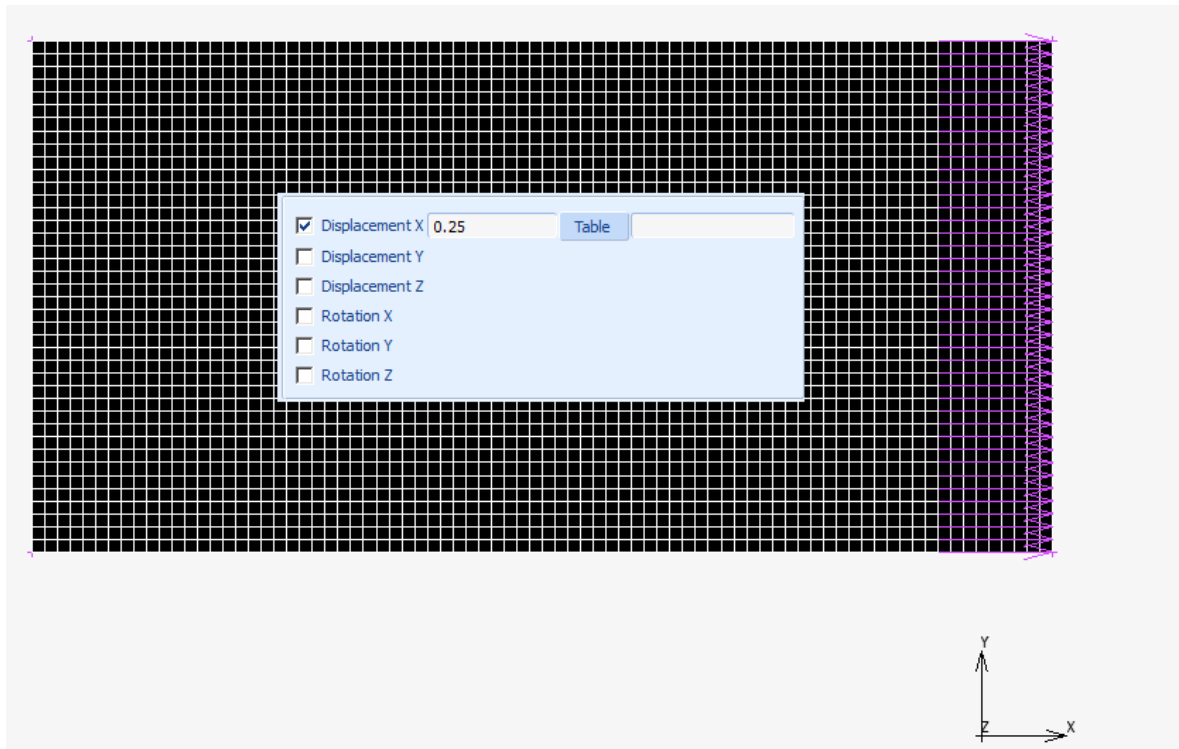
Obr. 28. Okrajové podmínky krajních uzlů v rovině YZ

V rovině ZY byly uchyceny pouze krajní uzly a byla jim zabráněna rotace kolem osy Y.



Obr. 29. Okrajové podmínky krajních uzlů v rovině ZY

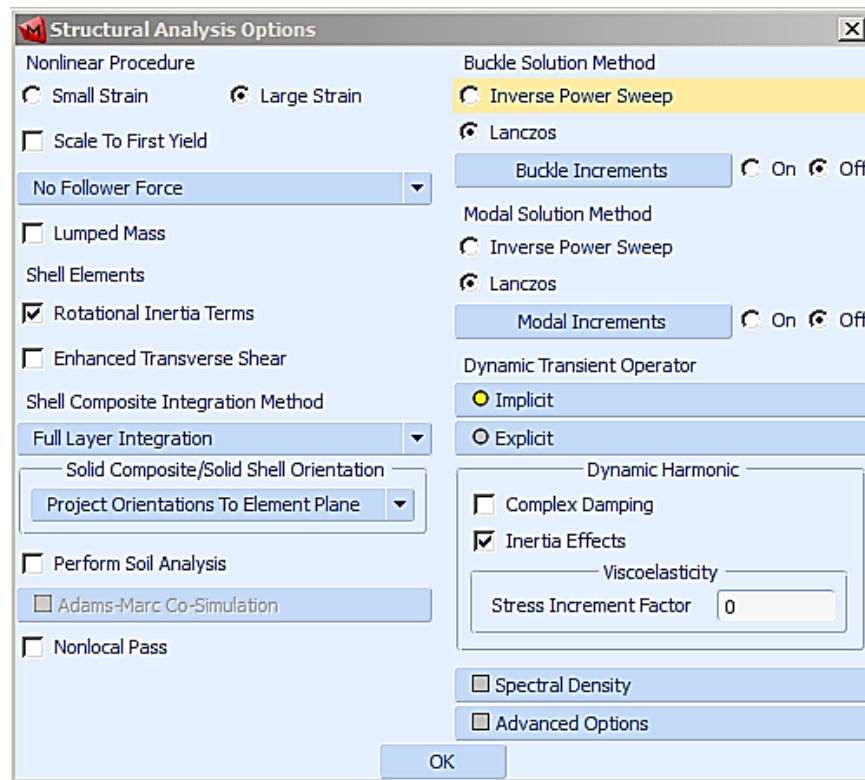
Pás byl zatížen posunutím v ose x (Obr. 30.). Toto posunutí bylo aplikováno pro všechny uzly v rovině ZY na pravé straně pásu. Pro zjištění optimální orientace úhlů bylo zadáno posunutí o 0,1 m, tedy protažení o 5 % z původní délky. Takto zvolené protažení bylo zvolené s ohledem na to, že při vyšších protaženích a malých úhlech natočení docházelo ke zborcení tvaru. Pro zjištění optimální polohy výztuži bylo zadáno posunutí o 0,25 m, tedy protažení o 12,5 % z původní délky.



Obr. 30. Okrajové podmínky – zatížení uzlů v ose x

9 ANALÝZA – SOLVER

Výpočet probíhal pomocí výpočtáře Marc. Výpočet byl nastaven tak, aby byly zohledněny velké deformace, které elastomery vykazují (Obr. 31.).



Obr. 31. Způsob nastavení velkých deformací ve výpočtu

10 METODIKA MĚŘENÍ

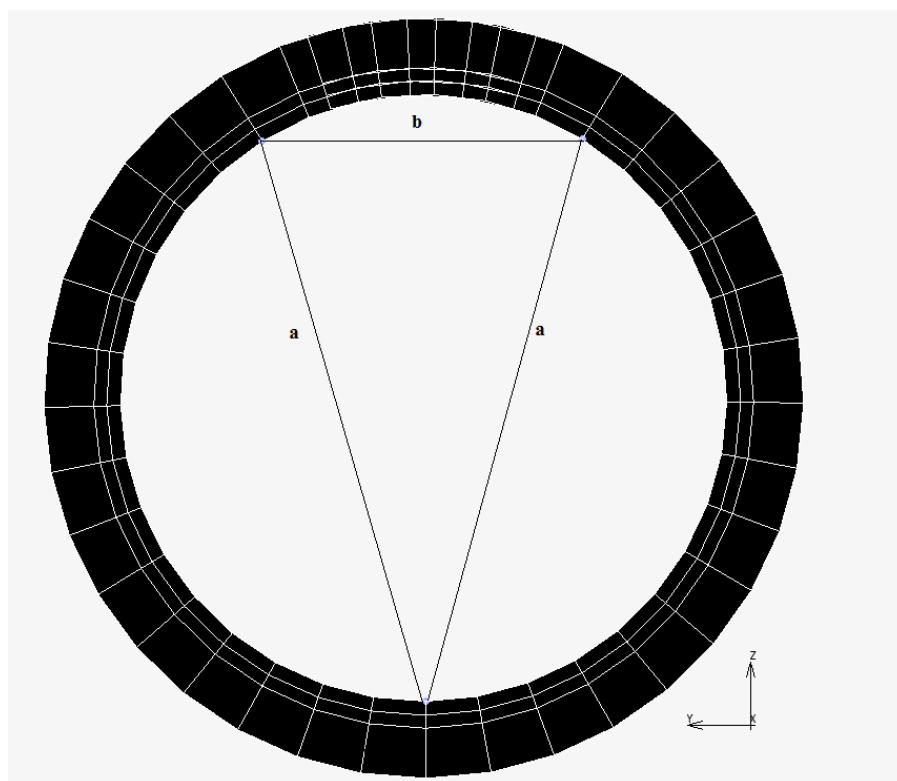
Při vyhodnocování analýzy byl zkoumán a hledán takový stav, ve kterém daná konstrukce vykazovala největší schopnost sbalit se do tvaru trubky. Metodika měření a výsledky analýzy budou podrobně popsány v následujících kapitolách.

V prvním kroku byl měřen poloměr kružnice, do které se pás sbalil. Druhým krokem bylo stanovení reakční síly, respektive síly, kterou bylo nutno vykonat, aby se pás sbalil.

10.1 Měření poloměru kružnice sbaleného pásu

Postup měření je popsán v následujících krocích:

1. Po dokončení analýzy bylo spuštěno okno s výsledky a model byl umístěn do roviny YZ tak, aby byla zobrazena pouze levá strana pásu.
2. Po aplikování celkového zatížení se pás tvaroval a sbalil.
3. Byly vybrány 3 uzly tak, že 2 krajní byly voleny od krajů pásů symetricky a 1 byl volen uprostřed pásu (Obr. 32.). Propojením uzlů vznikne trojúhelník, který je vzhledem k symetrické volbě uzlů rovnoramenný.



Obr. 32. Měření poloměru sbaleného pásu

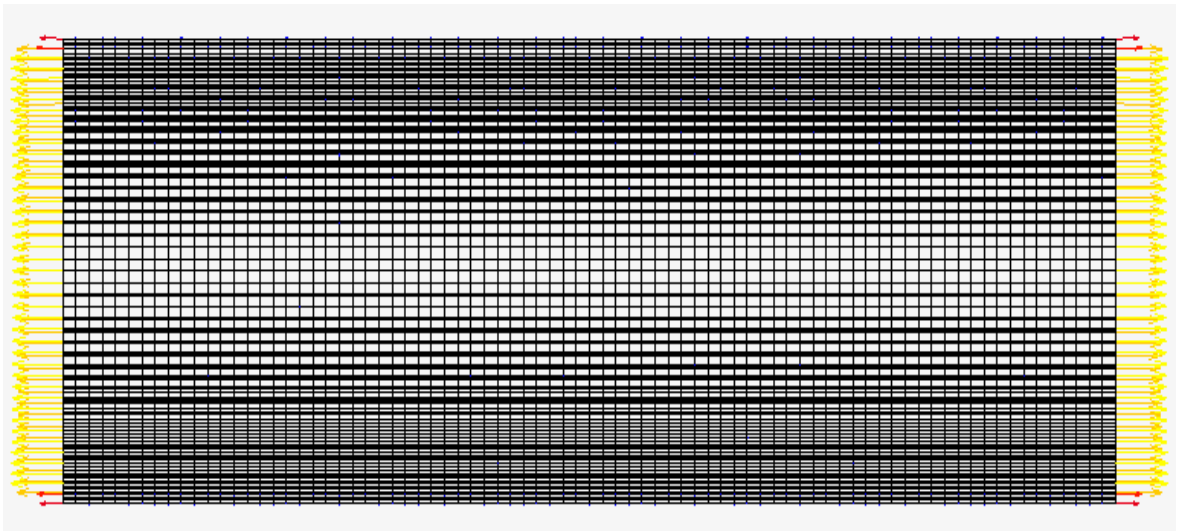
4. Byly změřeny všechny strany trojúhelníku.
5. Z definice kružnice opsané rovnostrannému trojúhelníku byl počítán poloměr podle rovnice:

$$R = \frac{a^2}{\sqrt{4 \cdot a^2 - b^2}} \quad (37)$$

10.1.1 Měření reakční síly

Postup stanovení reakční síly je popsán v následujících krocích:

1. Po dokončení analýzy bylo spuštěno okno s výsledky a ve výsledcích bylo vybráno zobrazení vektorové reakční síly (Obr. 33.)
2. Byly vykresleny vektory reakčních sil ve všech uzlech. (Obr. 33.).

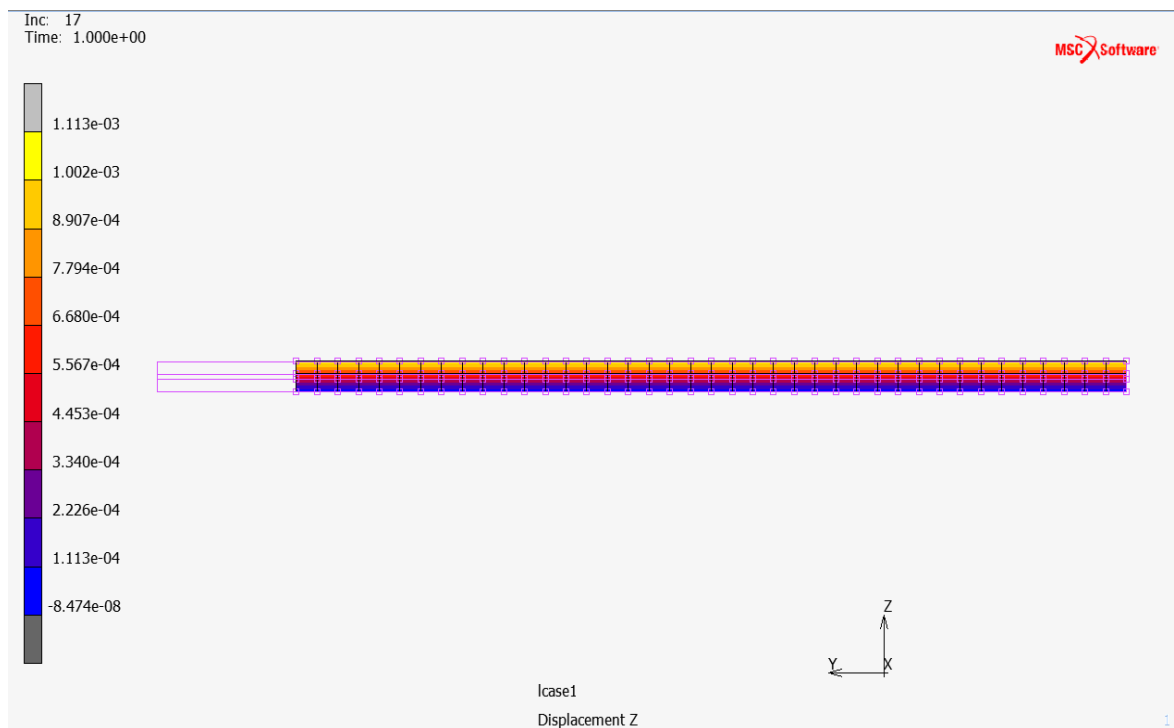


Obr. 33. Zobrazení vektorové reakční síly

3. Pro zjištění celkové reakční síly bylo použito programové funkce „Report Writer“, který umožní vypsání velikostí sil ve všech uzlech. Tyto hodnoty byly exportovány do softwaru Excel.
4. Celková reakční síla byla určena jako součet reakčních sil ve všech uzlech. Byla zjištěována reakční síla v uchycení (levé straně modelu).
5. Hodnoty byly zaznamenávány do tabulek.

10.2 Stanovení optimální polohy výztuží

Elementy, představující výztuže, byly umíst'ovány do různých poloh a v nich byl měřen poloměr a reakční síla, jak bylo popsáno v předchozí kapitole. Bylo zjištěno a podloženo měřením, že pokud je poloha výztuží přesně uprostřed pásu a je aplikováno zatížení, pás se nesbalí, dochází pouze k prostému natažení. (Obr. 34.)



Obr. 34. Stanovení neutrální polohy výztuží

Poloha uprostřed tedy byla zvolena jako neutrální poloha. Od této polohy byla postupně poloha měněna tak, že od neutrální polohy byla navyšována s diferencí 1 mm až do nejvyšší možné polohy s ohledem na konstrukci pásu.

10.3 Stanovení optimální polohy úhlu výztuží

Pro určení optimální polohy úhlu výztuží byla použita pouze 1 poloha výztuží, ve které byl úhel měněn tak, že byl měřen od hodnoty 0° a pak s diferencí 15° až do hodnoty 90° . Pro každou polohu úhlů byl opět změřen poloměr a reakční síla, což byly kritéria pro volbu optimálních vlastností výztuží v pásu.

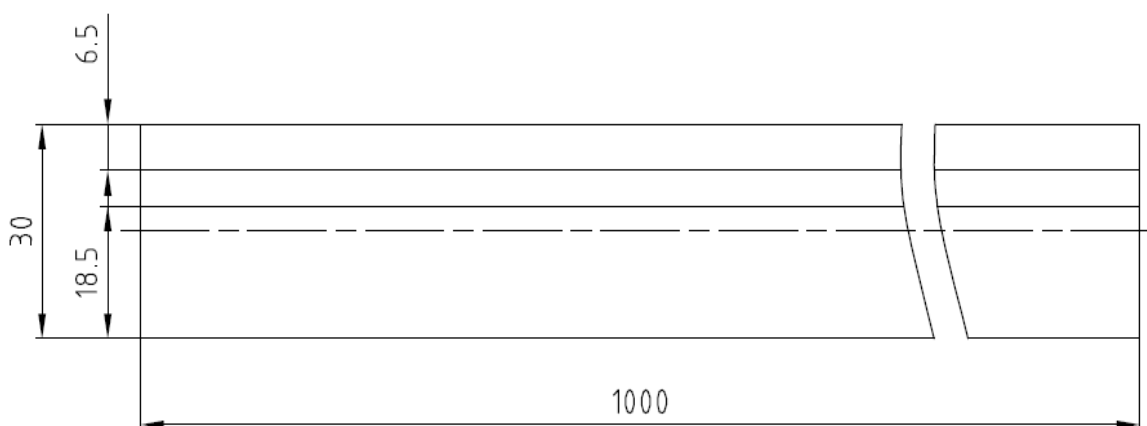
11 VÝSLEDKY MĚŘENÍ

V následujících kapitolách byly podrobně rozebrány naměřené výsledky analýzy.

11.1 Výsledky analýzy pro stanovení optimálního úhlu výztuží

Aplikované zatížení bylo ve formě prodloužení původního rozměru o 0,1 m, tedy o 5 %. Výztuže byly kladeny tak, že první vrstva měla úhel α a druhá vrstva pak úhel opačný, tedy $-\alpha$. Naměřené výsledky jsou zaznamenány v Tab. 4.

Poloha výztuží pro tato měření je zakreslena na Obr. 35.



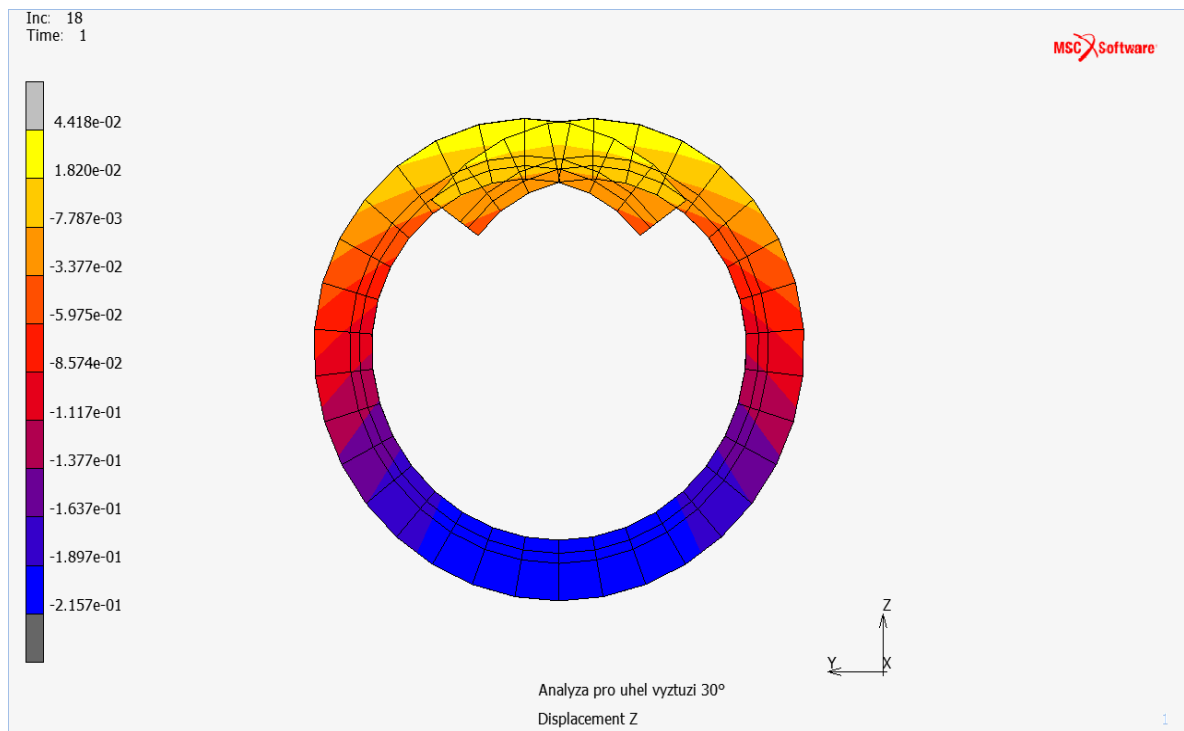
Obr. 35. Poloha výztuží při analýze změny úhlů výztuží

Tab. 4. Naměřená data pro stanovení optimálního úhlu

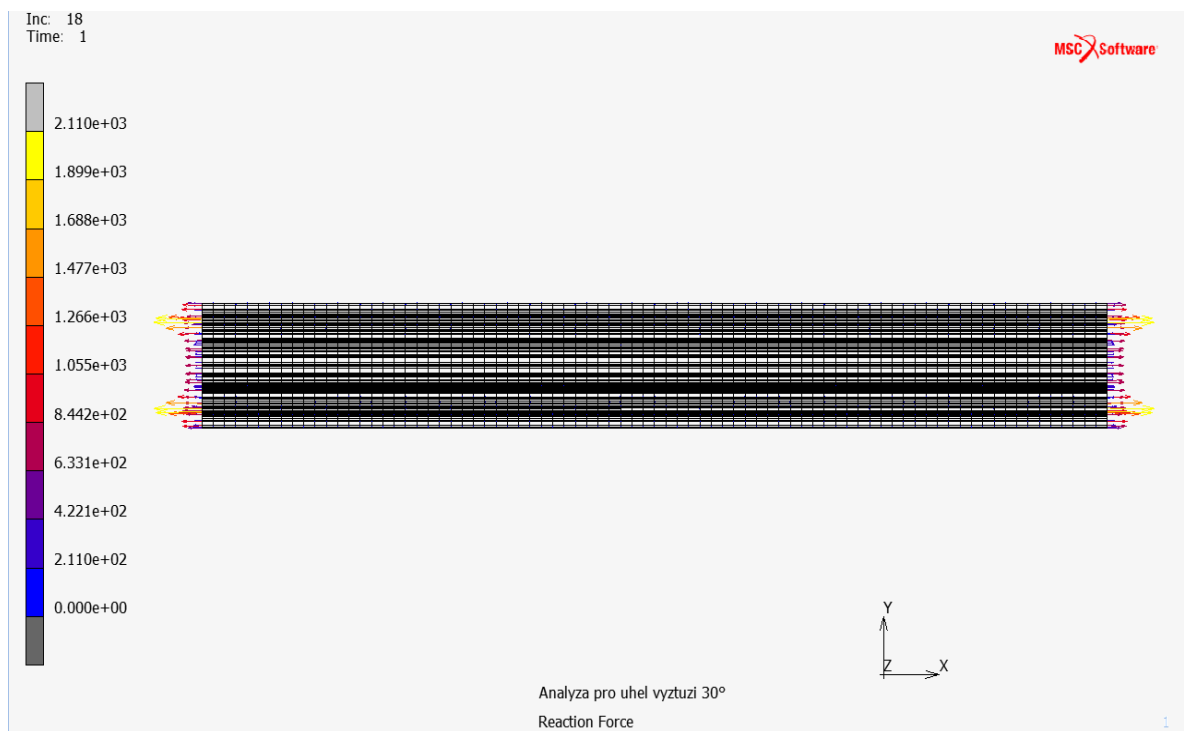
Číslo měření [-]	Úhel [°]	Poloměr [m]	Reakční síla uchycení [N]
1	0	-	27124709
2	15	0,0263	9462006
3	30	0,1032	54745
4	45	0,4071	4184
5	60	1,8372	3252
6	75	0,5671	3597
7	90	0,4811	3756

Z naměřených dat bylo patrné, že největší sbalení při přijatelné reakční síle bylo u úhlů 30 ° a 45 °. Proto byla provedena analýza polohy výztuží pro tyto úhly. Od úhlu 56 ° byl trend balení opačným směrem, pás se prohýbal na druhou stranu, což mohlo být dáno velkými příčnými deformacemi.

- *Výsledky pro úhel 30 °*

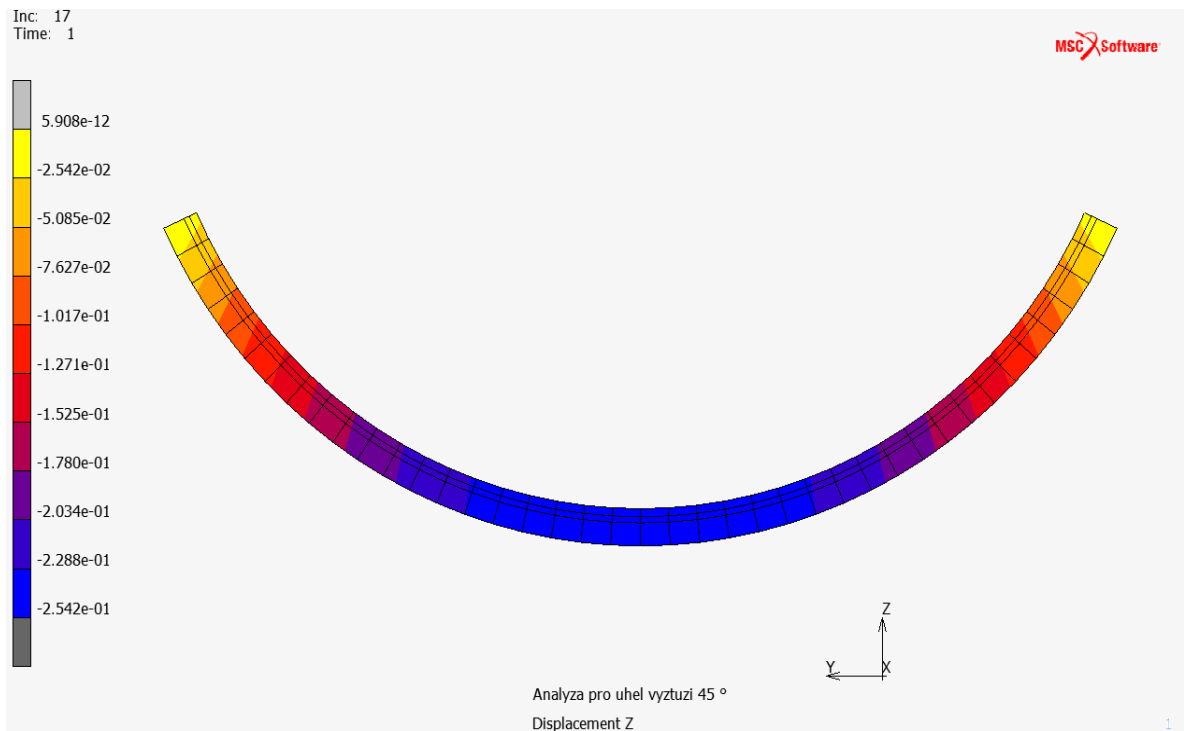


Obr. 36. Výsledky analýzy pro úhel 30 ° - posunutí v ose Z

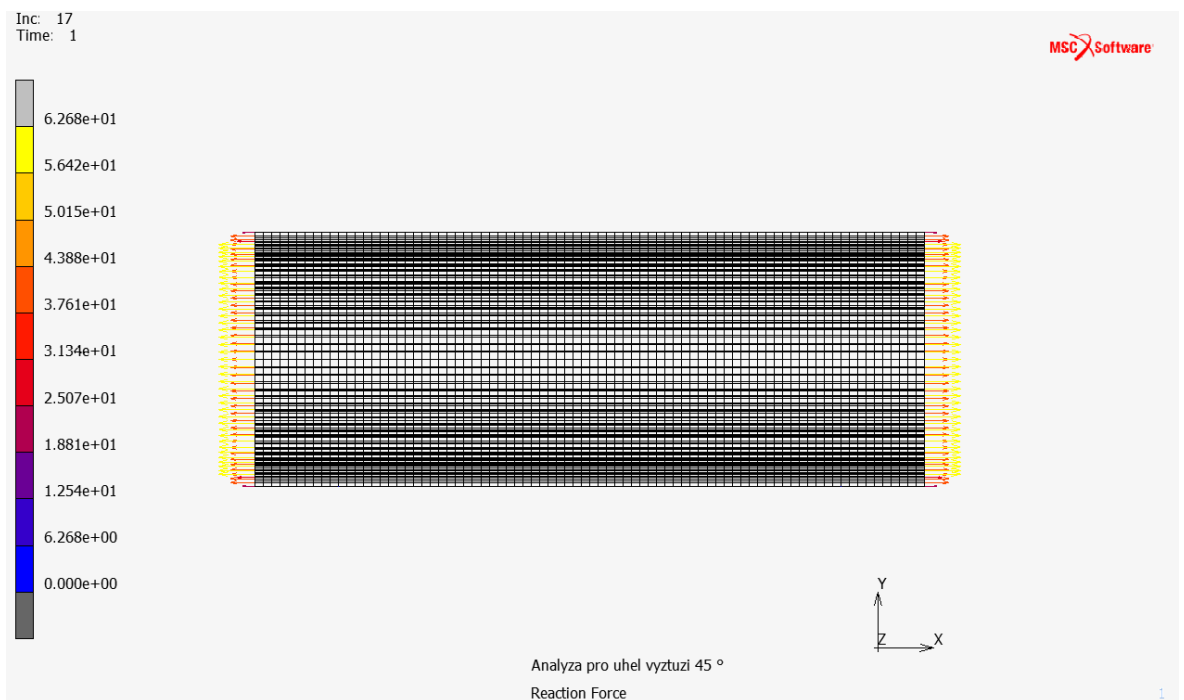


Obr. 37. Výsledky analýzy pro úhel 30 ° - Vektorové zobrazení reakční síly

- *Výsledky pro úhel 45 °*



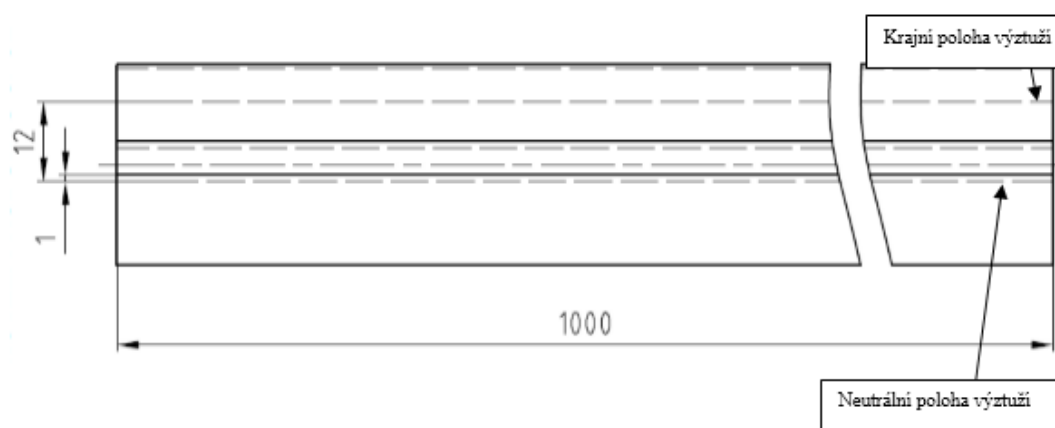
Obr. 38. Výsledky analýzy pro úhel 45 ° - Posunutí v ose Z



Obr. 39. Výsledky analýzy pro úhel 45 ° - Vektorové zobrazení reakční síly

11.2 Výsledky analýzy pro stanovení optimální polohy výztuží

Zatížení bylo ve formě prodloužení původního rozměru o 0,25 m, tedy o 12,5 %. Optimální poloha byla zjišťována u úhlů výztuží 30 ° a 45 °. Úhel 30 ° vykazoval nejvyšší sbalení k poměru přijatelné reakční síly a úhel 45 ° vykazoval optimální sbalení při nižších reakčních silách. Zatížení bylo zvýšeno tak, aby i při úhlu 45 ° bylo dosaženo cíleného tvaru. Poloha výztuží je navyšována vzhledem k neutrální poloze výztuží vždy o 1 mm (Obr. 40.).



Obr. 40. Schéma polohování výztuží

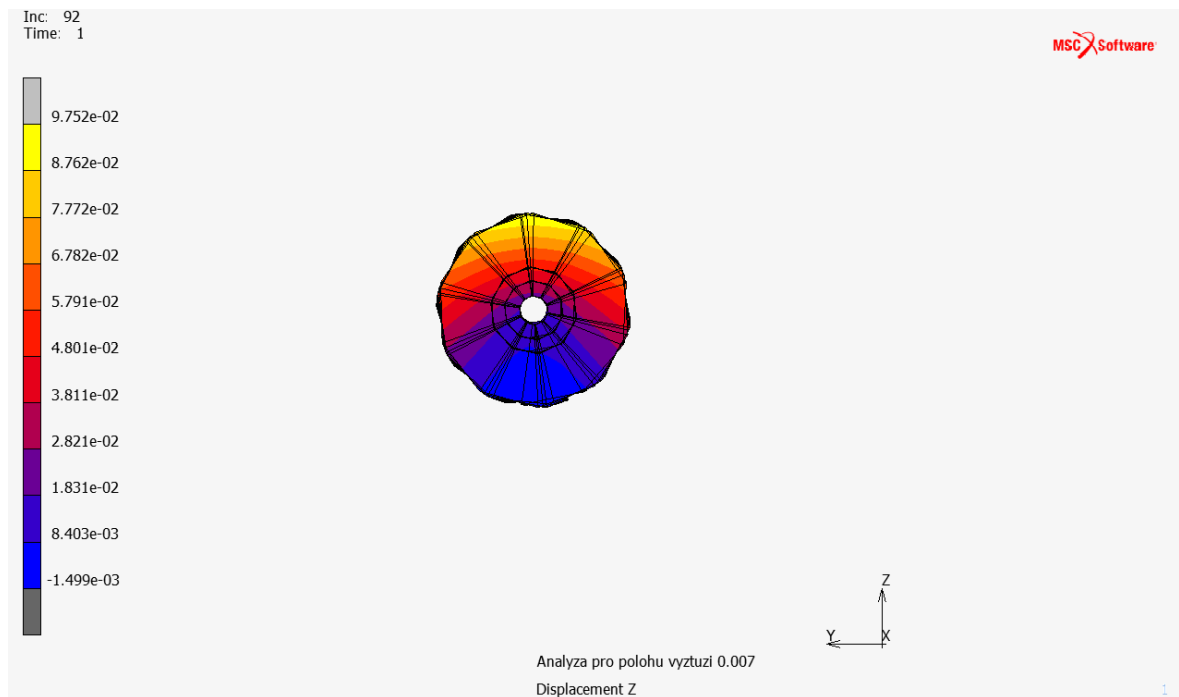
11.2.1 Výsledky pro úhel 30 ° při protažení o 12,5 %

Naměřené výsledky jsou uvedeny v Tab. 5.

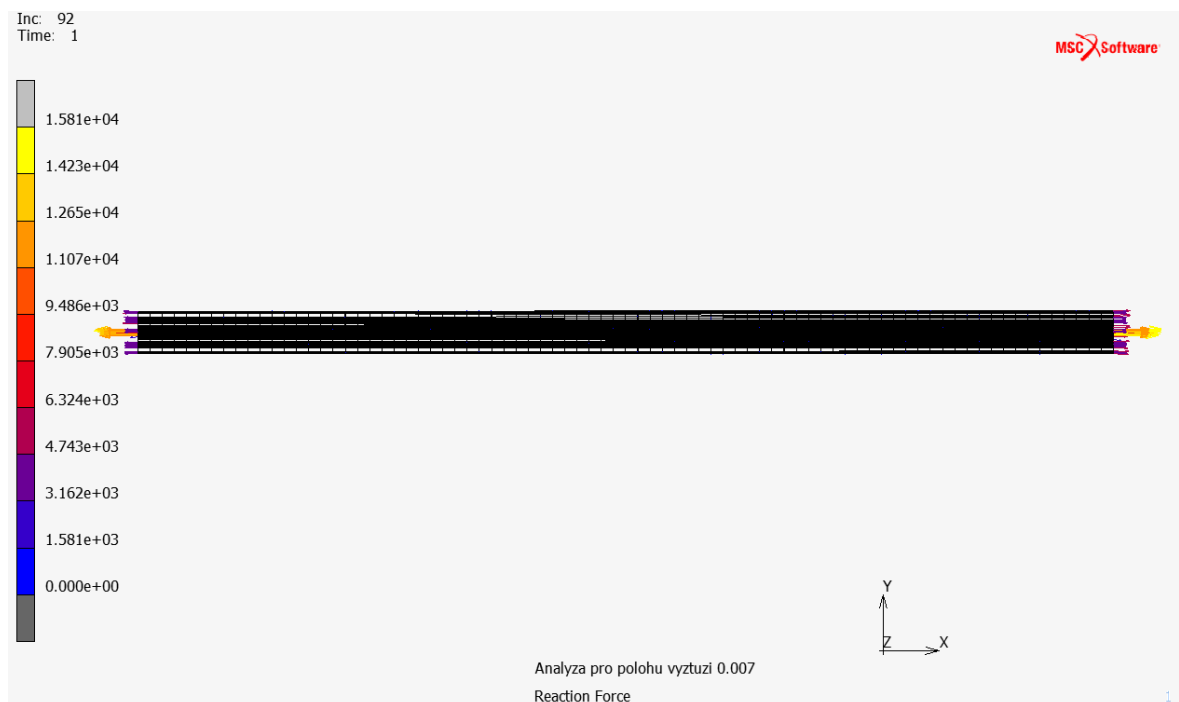
Tab. 5. Naměřená data pro různé polohy výztuží - úhel 30 °

Číslo měření [-]	Poloha [m]	Poloměr [m]	Reakční síla uchycení [N]
1	0,001	0,1375	1556766
2	0,002	0,0569	1522198
3	0,003	0,0439	1449259
4	0,004	0,0393	1236148
5	0,005	0,0243	1075559
6	0,006	0,0249	1076662
7	0,007	0,0069	666957
8	0,008	0,007	514836
9	0,009	0,0069	388874
10	0,010	0,0091	277720
11	0,011	0,0097	249610
12	0,012	0,0303	1163076

Pro úhel 30° byl naměřen nejnižší poloměr (největší sbalení) pro polohu 0,007 m vzdálenou od neutrální polohy, tedy zhruba ve třetině pásu. Pro tento úhel však při protažení o 12,5 % docházelo k několikanásobnému sbalení, jak je možné vidět na Obr. 42. Pro toto sbalení byly naměřeny síly v pásu v řádu $F_R = 10^6$ N, které jsou příliš velké.



Obr. 41. Výsledky analýzy pro polohu 0,007 – Posunutí v ose Z



Obr. 42. Výsledky analýzy pro polohu 0,007 – Vektorové zobrazení reakční síly

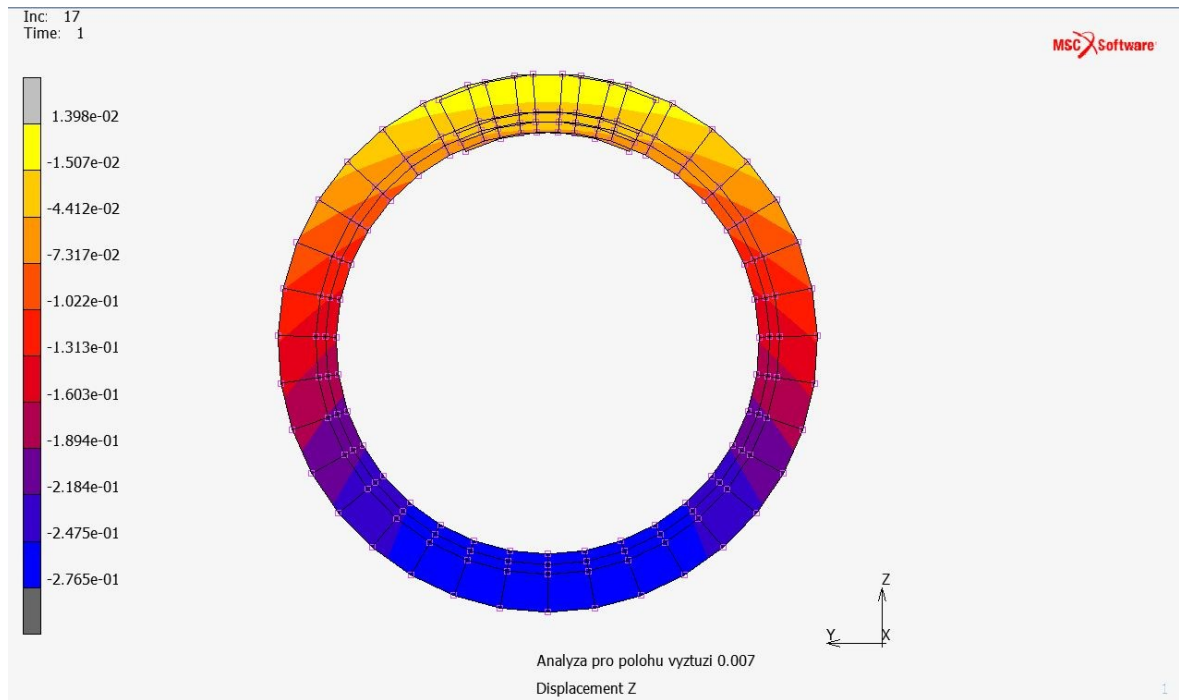
11.2.2 Výsledky pro úhel 30 ° při protažení o 4 %

Naměřené výsledky jsou uvedeny v Tab. 6. Protažení bylo sníženo z důvodu velkých reakčních sil a několikanásobného sbalení pásu v předchozím měření.

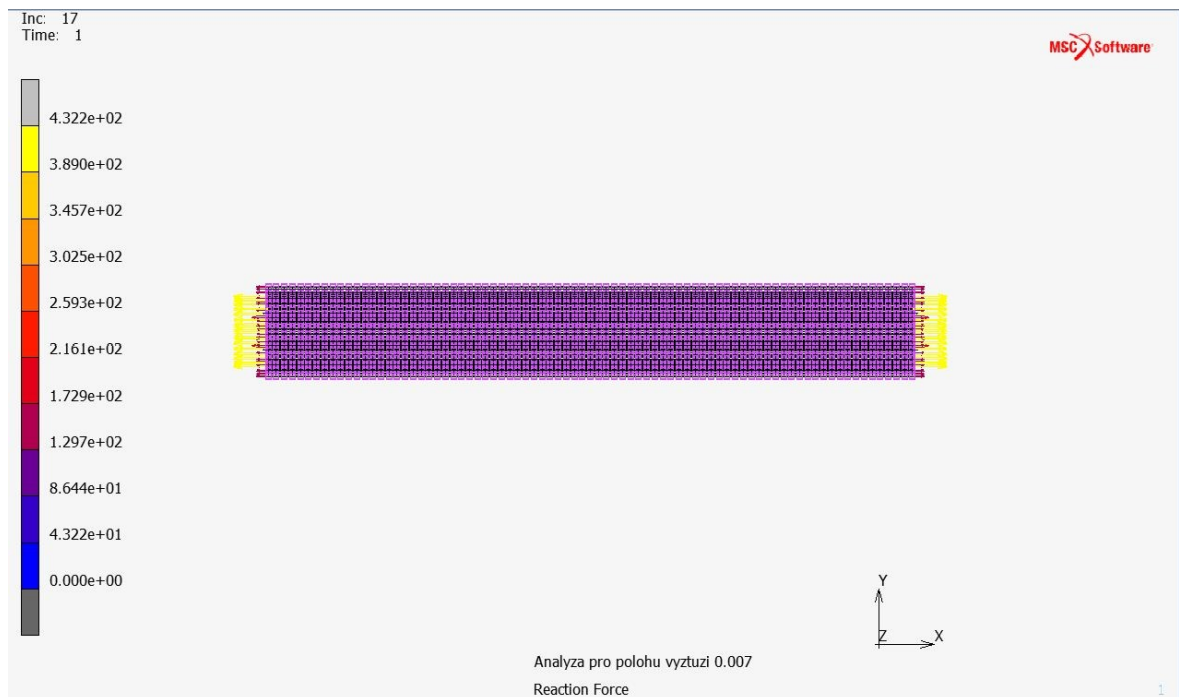
Tab. 6. Naměřená data pro různé polohy výztuží pro snížené protažení - úhel 30 °

Číslo měření [-]	Poloha [m]	Poloměr [m]	Reakční síla uchycení [N]
1	0,001	0,5306	42468
2	0,002	0,2626	40604
3	0,003	0,2077	38384
4	0,004	0,1099	31972
5	0,005	0,1511	31871
6	0,006	0,1417	28535
7	0,007	0,1143	23014
8	0,008	0,1210	22136
9	0,009	0,1196	18415
10	0,01	0,1152	15405
11	0,011	0,1319	15666
12	0,012	0,1410	14896

Největší sbalení při snížení aplikovaného zatížení bylo naměřené při poloze výztuží vzdálené o 0,004 m od neutrální polohy. Při této poloze byla ale naměřená vyšší reakční síla. Největšího sbalení při nejnižší reakční síle bylo dosaženo při poloze vzdálené o 0,007 m od neutrální polohy výztuží.



Obr. 43. Výsledky analýzy pro polohu 0,007 při protažení o 4 % - Posunutí v ose Z



Obr. 44. Výsledky analýzy pro polohu 0,007 při protažení o 4 % - Vektorové zobrazení reakční síly

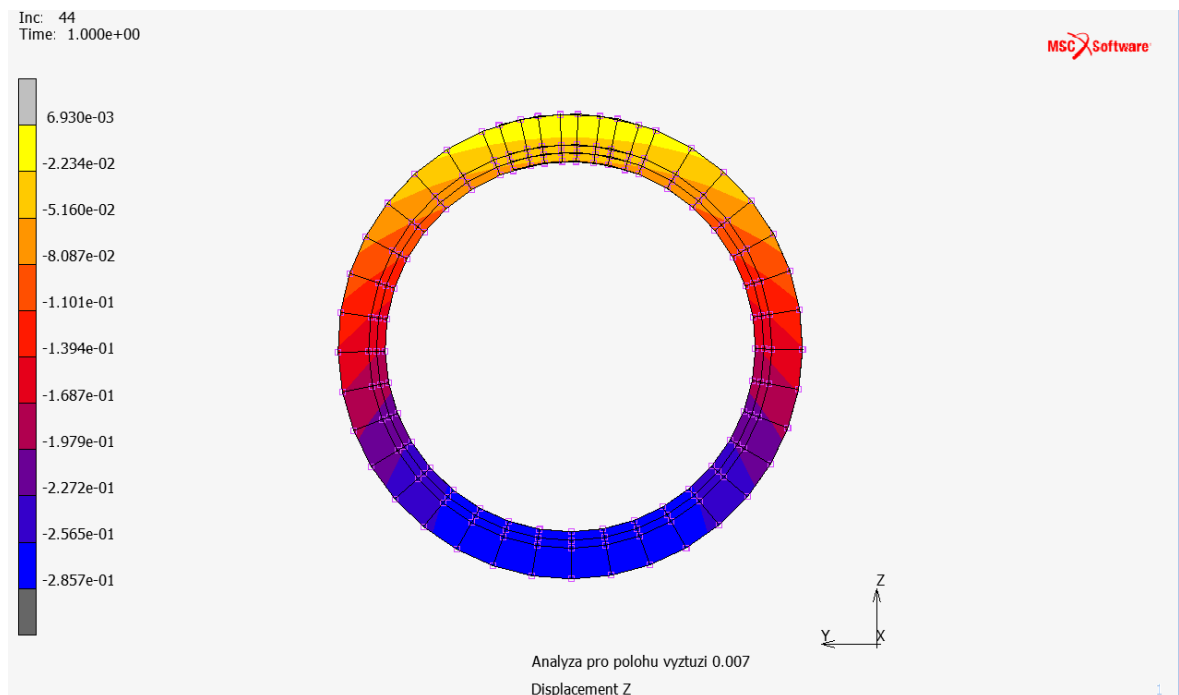
11.2.3 Výsledky pro úhel 45 ° při protažení o 12,5 %

Naměřené výsledky jsou uvedeny v Tab. 7.

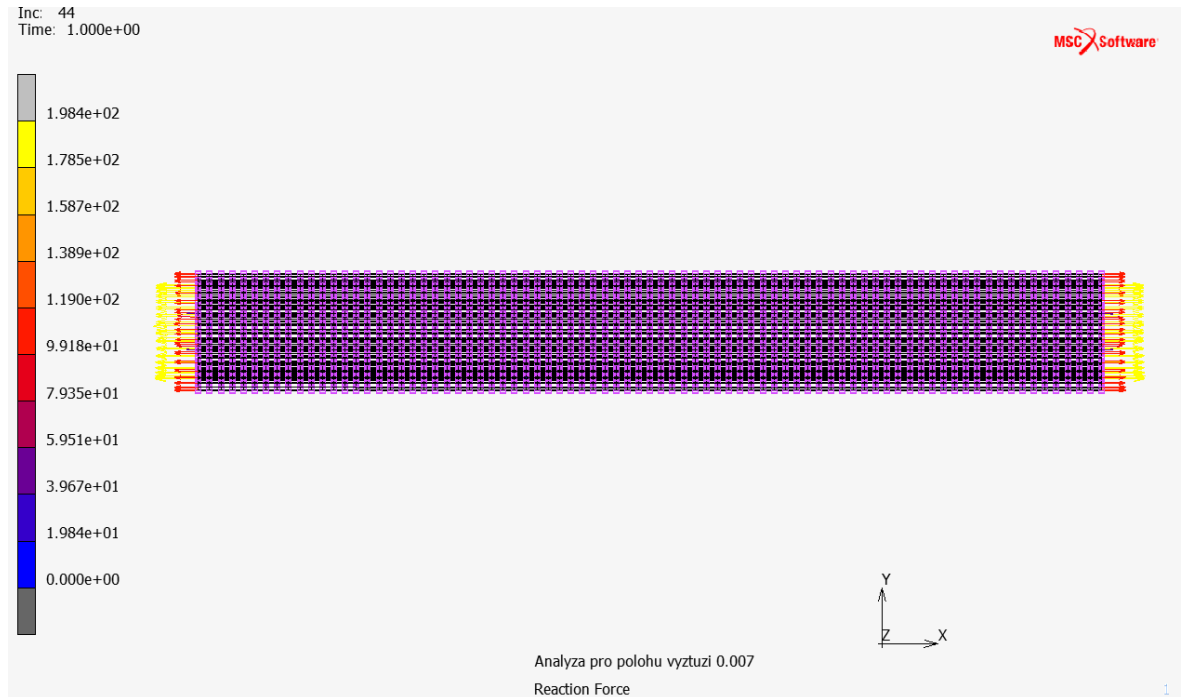
Tab. 7. Naměřená data pro různé polohy výztuží - úhel 45 °

Číslo měření [-]	Poloha [m]	Poloměr [m]	Reakční síla uchycení [N]
1	0,001	0,7799	16800
2	0,002	0,2715	16270
3	0,003	0,1847	15607
4	0,004	0,1383	14240
5	0,005	0,1219	13262
6	0,006	0,1175	12463
7	0,007	0,1165	11641
8	0,008	0,1181	10997
9	0,009	0,1229	10399
10	0,010	0,1307	10114
11	0,011	0,1495	10152
12	0,012	0,1447	9529

Pro toto nastavení výztuží a zatížení vykazovala největší sbalení při poloze výztuží vzdálené o 0,007 m od neutrální polohy výztuží. Sbalení a reakční síly je možno pozorovat na Obr. 45. a Obr. 46.



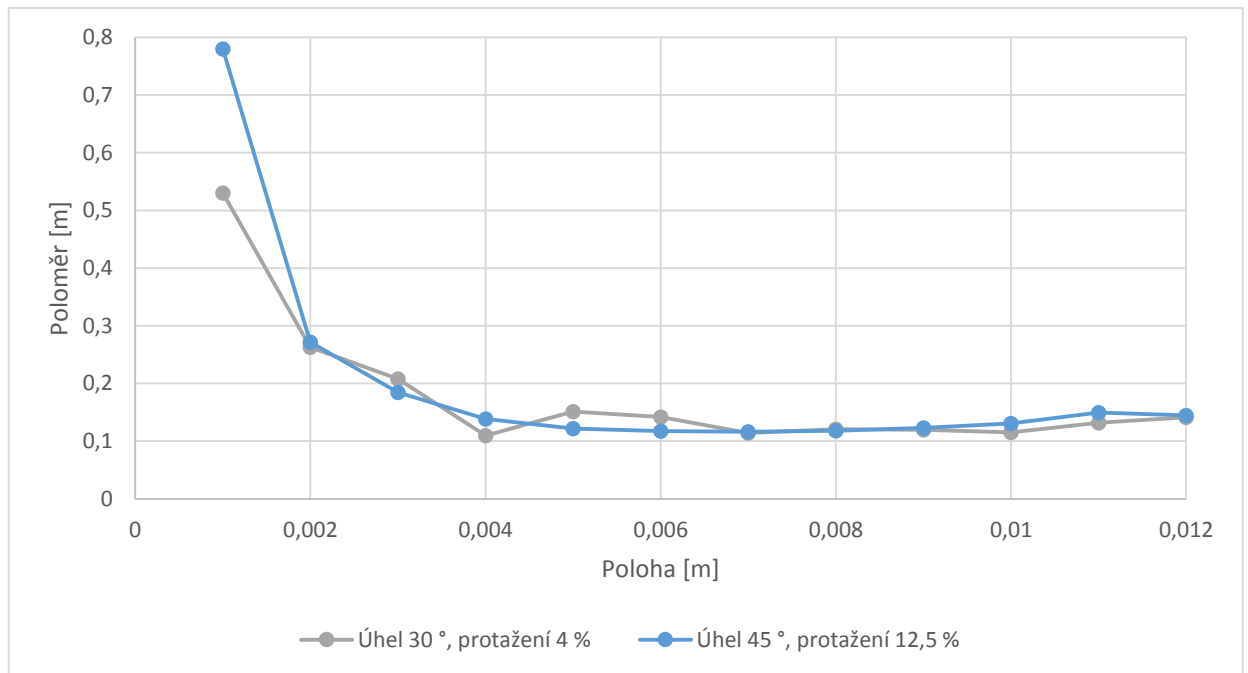
Obr. 45. Výsledná analýza pro úhel 45 ° a polohu 0,007 – Posunutí v ose Z



Obr. 46. Výsledná analýza pro úhel 45 ° a polohu 0,007 – Reakční síly

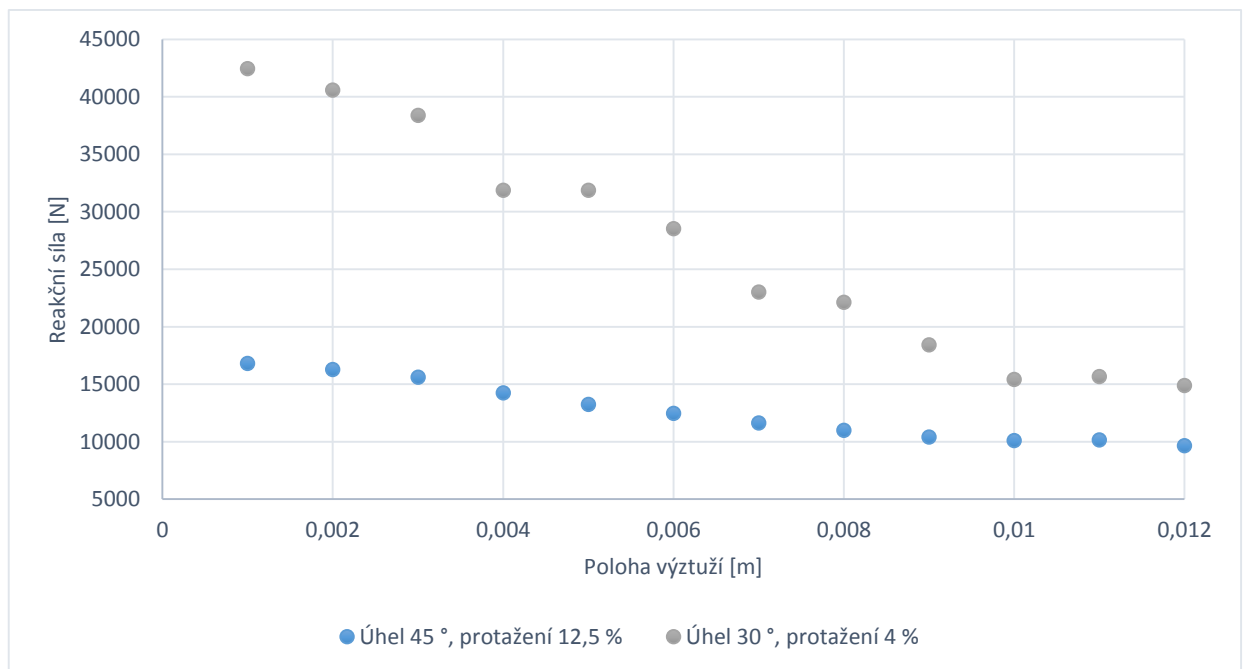
11.3 Srovnání a diskuze výsledků

Na Obr. 47. byla znázorněna změna poloměru se změnou polohy výtuzě. Bylo patrné, že největší změna byla při prvních 3 polohách blízko neutrální osy, poté se hodnota ustálila.



Obr. 47. Grafické znázornění změny poloměru se změnou polohy – trendová křivka

Na Obr. 48. bylo provedeno grafické znázornění změny síly při změně polohy výztuží.



Obr. 48. Grafické znázornění změny reakční síly se změnou polohy

Na základě grafického zobrazení byla na datech provedena regresní analýza a bylo zjišťováno, zda mezi daty existuje závislost. Tato analýza byla provedena v programu QC-Expert. V Tab. 8. a Tab. 9. byl uveden průběh analýzy, kdy bylo hledáno, která polynomická funkce nejlépe vypovídá o naměřených datech. Byla použita metoda nejmenších čtverců. Ze zjištěných výpočtu u každého polynomu byl vybírán ten, u kterého byla hodnota MEP (Střední kvadratická chyba predikce) a AIC (Akaikeho informační kritérium) nejmenší a zároveň hodnota koeficientu determinace největší. Analýzy probíhala na hladině významnosti 95 % s možností omylu 5 %.

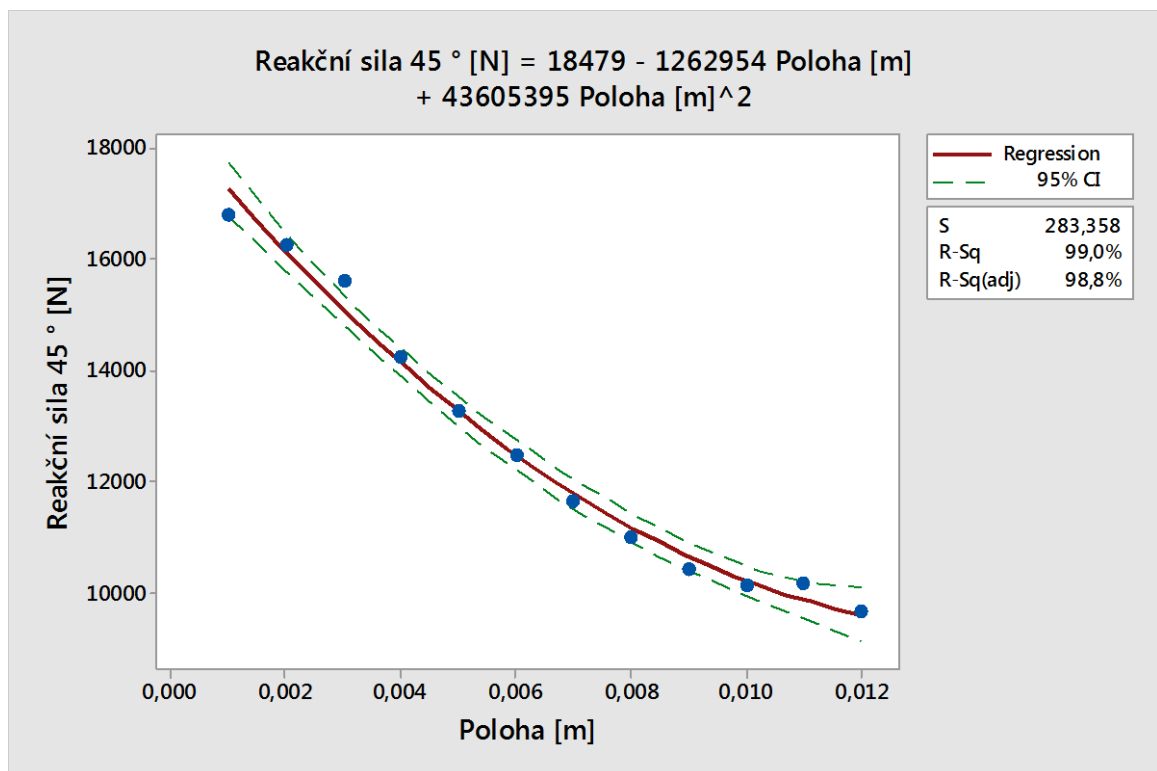
Tab. 8. Regresní analýza pro úhel 45 °

Stupeň polynomu	Koeficient determinace r^2	MEP	AIC
1	0,955	417342,2	154,2
2	0,990	151698,2	138,1
3	0,995	171401,3	132,2
4	Maticová singularita		
5	0,998	46194,9	123,9

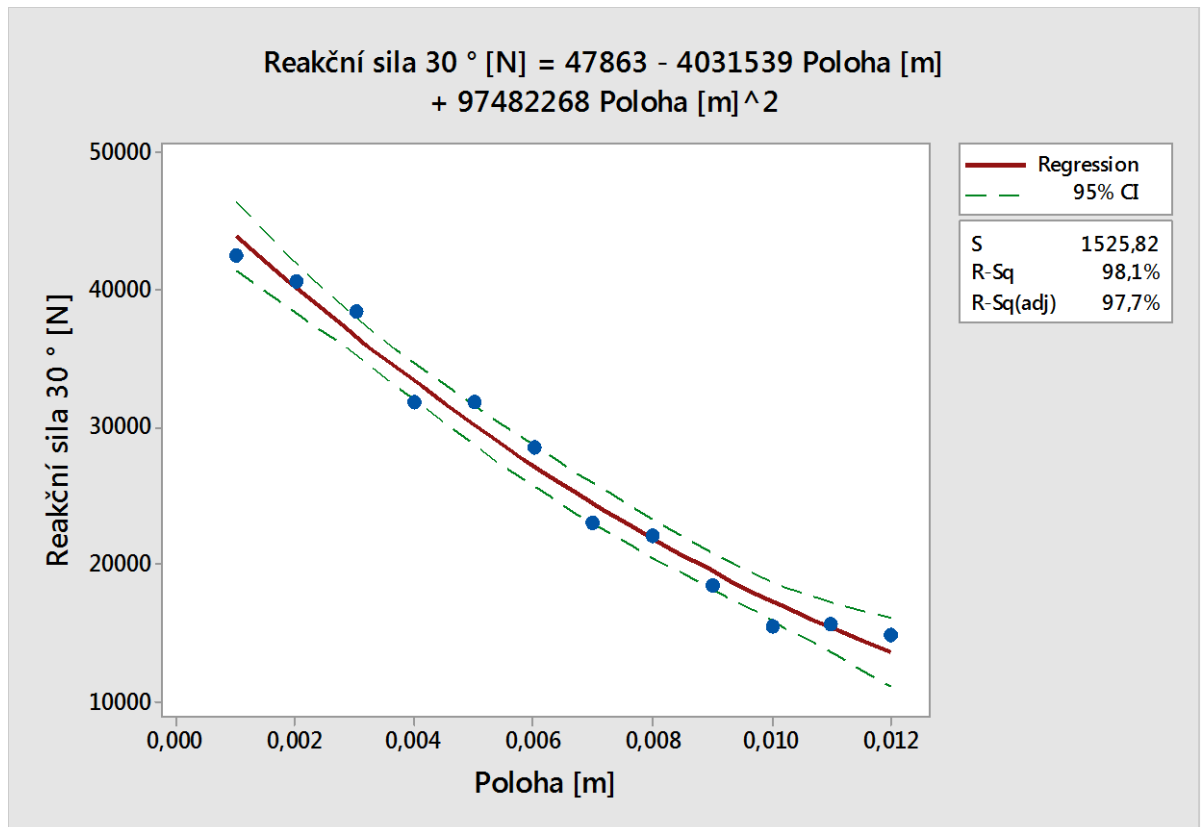
Tab. 9. Regresní analýza pro úhel 30 °

Stupeň polynomu	Koeficient determinace r^2	MEP	AIC
1	0,970	4354289,7	182,2
2	0,981	3690838,3	178,5
3	0,989	1898500,8	174,4
4	Maticová singularita		
5	0,989	2810149,8	178,2

Pro úhel 45 ° i pro úhel 30 ° byl nejvhodnější polynom druhého stupně, u kterého program QC-Expert určil jako významné parametry rovnice. Mezi daty nebyla prokázána autokorelace. Na Obr. 49. a Obr. 50. byla znázorněna data i s regresní křivkou a konfidenčním intervalem pro daný model z programu Minitab 17.



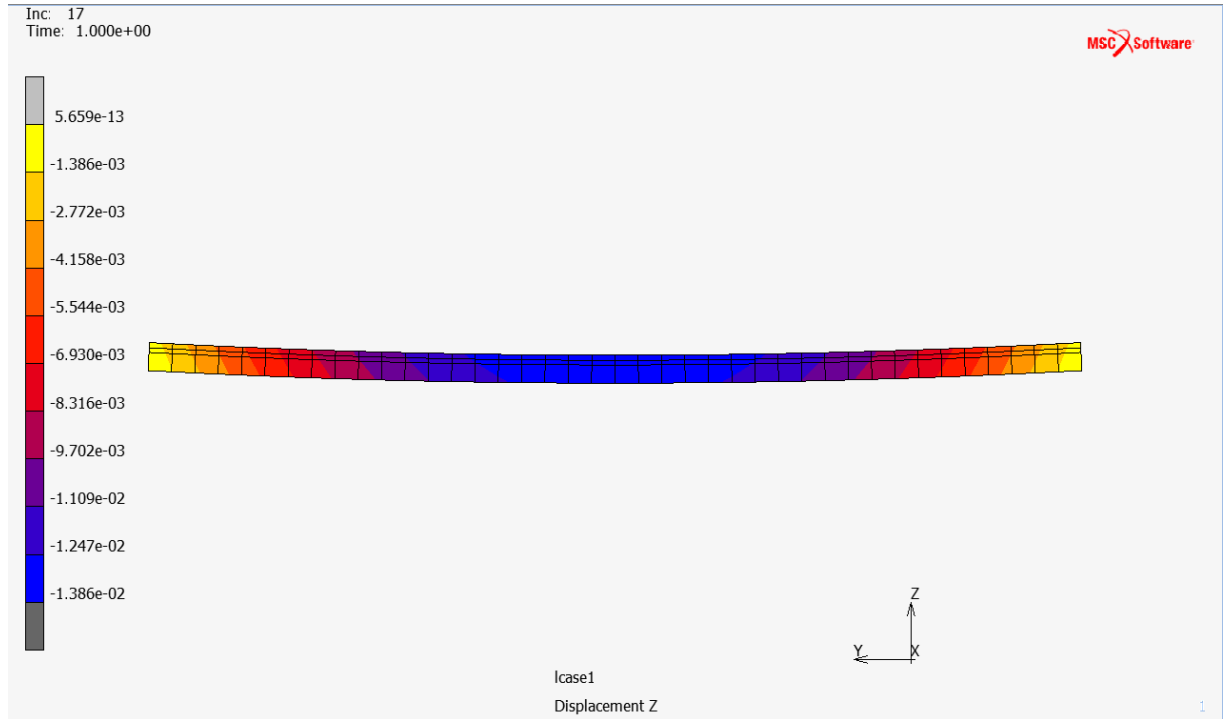
Obr. 49. Regresní model pro úhel 45 °



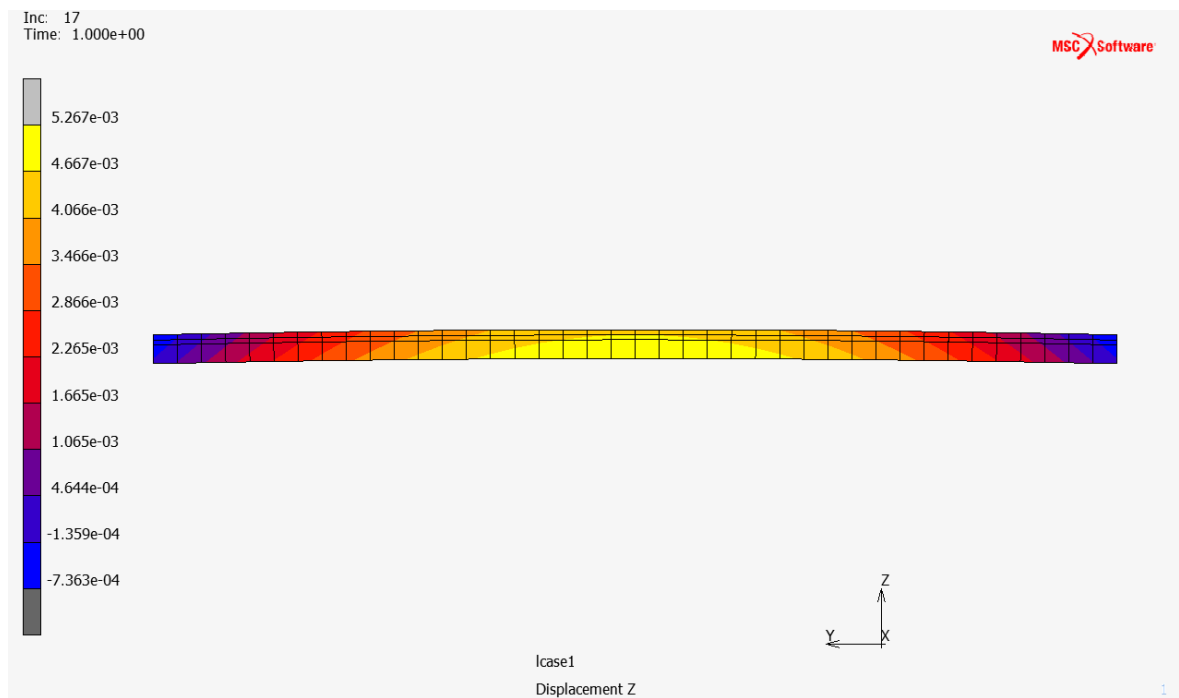
Obr. 50. Regresní model pro úhel 30 °

Tyto regresní modely mohou být nápomocny při dalších návrzích pásu, kdy s pravděpodobností 95 % a možností omylu 5 % lze předpokládat, že se reakční síla bude snižovat se zvyšující se polohou výztuží od neutrální polohy dle polynomu druhého stupně.

Při měření závislosti úhlu bylo zjištěno, že při úhlu 55° byl průhyb pásu v ose Z do záporných hodnot, pro úhel 56° byl průhyb v ose Z do hodnot kladných (Obr. 51. a Obr. 52.). Pás se tak od úhlu 56° balil opačným směrem, než při hodnotách nižších než 55° .



Obr. 51. Průhyb pásu pro úhel 55° - Posunutí v ose Z



Obr. 52. Průhyb pásu pro úhel 56° - Posunutí v ose Z

Výsledky lze shrnout do následujících bodů:

- Pás se balí do trubkového tvaru, použijeme-li párové výztuže, kladené na sebe pod opačnými úhly α a $-\alpha$
- Umístěním výztuží do neutrální osy ve středu pásu nedocílíme žádného sbalení pásu
- Pás se nejlépe balí pro úhly výztuží 30° a 45° v poloze výztuží ve třetině pásu
- Při úhlu natočení výztuží 30° , pro sbalení pásu do tvaru trubky stačí pás protáhnout pouze o 4 % původní délky, při reakční síle přibližně 23 kN
- Při úhlu natočení výztuží 45° , pro sbalení pásu do tvaru trubky pás musíme protáhnout o 12,5 % původní délky, při reakční síle přibližně 12 kN
- Z hlediska použití menší tahové síly odtahu pásového dopravníku je vhodnější použít výztuže orientované pod úhlem 45°
- Z hlediska menšího protažení pásu a tím i předpokládané vyšší tuhosti je vhodnější využití orientace pod úhlem 30°
- Posuneme-li polohu výztuží do vyšších poloh od neutrální osy, snížíme s pravděpodobností 95 % hodnotu reakční síly podle polynomické funkce druhého řádu
- Od hodnoty úhlu 57° se mění směr průhybu pásu

ZÁVĚR

Cílem předkládané diplomové práce bylo vytvořit numerický model trubkového dopravního pásu. Trubkové dopravníky používají pro balení pásu velké množství podpůrných válečků, které jsou poháněné. Základní tezí práce bylo navržení konstrukce modelu tak, aby se prostým tahem balil do trubkového tvaru, což povede ke snižování energie na pohon podpůrných válečků. Pro modelování výztuží bylo využito programové podpory software MSC. Marc Mentat 2017.

Na vytvořeném modelu byla testována optimální poloha výztuží a úhel natočení výztuží pro sbalení pásu za optimálních reakčních sil. Měřen byl poloměr kružnice opsané, do které se pás balil. Zkoumána byla také reakční síla, která vznikala protahováním pásu.

Nejoptimálnější sbalení bylo prokázáno pro párové úhly výztuží 30° a -30° ; 45° a -45° . Nejoptimálnější poloha byla stanovena ve třetině pásu. Naměřené výsledky byly zpracovány do přehledných tabulek.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Perner's Contacts [online]. Copyright © [cit. 02.11.2017]. Dostupné z: http://pernerscontacts.upce.cz/38_2015/Bobok.pdf
- [2] ŠŮLA, Miroslav. Pojení pryže s kovem. Zlín: Česká společnost průmyslové chemie, místní pobočka Gumárenská skupina, 2007. 63 s. ISBN 978-80-02-01934-3.
- [3] XIAOXIA, Sun; WENJUN, Meng; HUI, Zhao; YUAN, Yuan; ZHENGMAO, Yang. Analysis on the Bending Stiffness and the Form Force of the Pipe Conveyor Belt. *Sensors and Transducers*. 2013, vol. 161, no. 12 s. 655-660. ISSN:2306-8515.
- [4] ZHENG; XU; CHU; PAN; YU. A Coupled FEM/DEM Model for Pipe Conveyor Systems: Analysis of the Contact Forces on Belt. *Powder Technology*. 2017, vol. 314 s. 480-489. ISSN:0032-5910.
- [5] ZHANG, Zaimei; ZHOU, Fang; JI, Jianheng. Parameters Calculation and Structure Design of Pipe Belt Conveyor. 2008 9th International Conference on Computer-Aided Industrial Design and Conceptual Design. 2008, s. 614-617.
- [6] ŠUBA, Oldřich. *Mechanika polymerů a kompozitů*. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2011. ISBN 978-80-7454-015-8.
- [7] KAW, Autar K. *Mechanics of composite materials*. 2nd ed. Boca Raton, FL: Taylor & Francis, 2006. Mechanical engineering series (Boca Raton, Fla.), v. 29. ISBN 0-8493-1343-0.
- [8] DVOŘÁK, Zdeněk; JAVOŘÍK, Jakub. Elastomerní konstrukční materiály. Zlín: Česká společnost průmyslové chemie, místní pobočka Gumárenská skupina Zlín, 2009. ISBN 9788002021551.
- [9] MSC.SOFTWARE CORPORATION: Nonlinear finite element analysis of elastomers. http://www.mssoftware.com/assets/103_elast_paper.pdf, MSC.Software Corporation. 2000.
- [10] MANSOURI; DARIJANI; BAGHANI. On the Correlation of FEM and Experiments for Hyperelastic Elastomers. *Experimental Mechanics*. 2017, vol. 57, no. 2 s. 195-206. ISSN:0014-4851.
- [11] POPA, Gabriel A. Rubber: types, properties, and uses. Hauppauge, N.Y.: Nova Science Publishers, c2011, xvii, 689 p. ISBN 9781617614644.

- [12] RODGERS, Brendan. Rubber compounding: chemistry and applications. Second edition. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2016, xii, 612. ISBN 978-1-4822-3549-4.
- [13] GENT, Alan N. Engineering with rubber: how to design rubber components. 2nd ed. Cincinnati: Hanser, c2001. ISBN 1-56990-299-2.
- [14] PREKOP, Štefan. Gumárska technológia I. 1. vyd. Žilina : Žilinská univerzita, 1998. 282 s. ISBN 8071004839.
- [15] MARK, James E. a Burak. ERMAN. Science and technology of rubber. 3rd ed. Boston: Elsevier Academic Press, 2005. ISBN 0-12-464786-3.
- [16] IndiaMART - Indian Manufacturers Suppliers Exporters Directory, India Exporter Manufacturer [online]. Copyright © 1996 [cit. 26.09.2017]. Dostupné z: <https://www.indiamart.com/proddetail/styrene-butadiene-rubber-10516596062.html>
- [17] Welcome to Armavir S.R.O | Armavir S.R.O [online]. Dostupné z: <http://armet.cz/sites/all/themes/bluez/images/chloroprene-rubber.jpg>
- [18] KLIMENT, Josef. Saze. Zlín: Česká společnost průmyslové chemie, místní pobočka Gumárenská skupina Zlín, c2007. 179 s. ISBN 9788002020042.
- [19] DUCHÁČEK, Vratislav. Světlá plniva. Zlín: Česká společnost průmyslové chemie, místní pobočka Gumárenská skupina Zlín, 2010. ISBN 9788002022039.
- [20] SCHASCHKE, Carl. A dictionary of chemical engineering. Oxford: Oxford University Press, 2014. Oxford paperback reference. ISBN 9780199651450.
- [21] Rubbers - Some aspects of rubber chemical changes. [online]. Dostupné z: https://www.tut.fi/ms/muo/vert/5_rubber_chemistry/2_vulcanization_stages.htm
- [22] [online]. Copyright © Copyright 2017 MSC Software Corporation [cit. 05.03.2018]. Dostupné z: <https://simcompanion.mscsoftware.com/infocenter/index?page=content&id=DOC11404>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

DSK [-]	Dílů na sto kaučuku
NR [-]	Přírodní kaučuk
SBR [-]	Butadien-styrenový kaučuk
IR [-]	Izoprenový kaučuk
BR [-]	Butadienový kaučuk
T _g [°C]	Teplota skelného přechodu
CR [-]	Chloroprenový kaučuk
M [N·m]	Krouticí moment
μ [-]	Poissonův poměr
W [J]	Potenciál deformační energie
I [-]	Invariant
λ [-]	Protažení
T [°C]	Teplota
E [Pa]	Youngův modul pružnosti
c [Pa]	Materiálové konstanty
σ [Pa]	Napětí
ε [-]	Poměrné prodloužení
Q [kg·s ⁻¹]	Průtok materiálu
V [m·s ⁻¹]	Rychlost dopravního pásu
S [m ²]	Průřez
P [kg·m ⁻³]	Hustota
φ [-]	Koeficient plnění
d [m]	Průměr dopravního pásu
Ŵ [N]	Odpor pásu proti pohybu
q [kg·m ⁻³]	Měrná hmotnost

P [N]	Obvodová síla
N [W]	Výkon
G [Pa]	Smykový modul
s [m]	Šířka pásu
l [m]	Délka pásu
t [m]	Tloušťka pásu
Hex [-]	Šestistěn
S_R [m ²]	Plocha výztuží
a [m]	Strana trojúhelníku
b [m]	Strana trojúhelníku
MEP [-]	Střední kvadratická chyba predikce
AIC [-]	Akaikeho informační kritérium
r^2 [-]	Koeficient determinace

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1. Struktura dopravního pásu vyztuženého textilní kostrou [1].....	12
Obr. 2. Prostá vazba [1]	13
Obr. 3. Vazba s přímou osnovou [1].....	13
Obr. 4. Struktura pásu s ocelovými výztužemi [1]	14
Obr. 5. Rozdíl mezi konvenčním a trubkovým dopravováním [4].....	17
Obr. 6. Dvoucestný trubkový dopravník [5].....	18
Obr. 7. Model dlouho vláknové struktury [6].....	22
Obr. 8. Schéma orientovaného kompozitu [7].....	23
Obr. 9. Závislost napětí na deformaci elastomerů [8].....	26
Obr. 10. Závislost napětí na deformaci pro základní typy namáhání [8].....	30
Obr. 11. a) jednoosý tah, b) dvouosý tah, c) čistý smyk [8].....	31
Obr. 12. Zkouška jednoosým tahem (zařízení a tvar zkušebního tělíska) [10]	31
Obr. 13. a) Natahovaný čtvercový vzorek, b) Nafukovaný plochy vzorek [8].....	32
Obr. 14. Schéma přípravy přírodního a syntetického kaučuku [14].....	34
Obr. 15. SBR kaučuk [16]	35
Obr. 16. Chloroprenový kaučuk [17].....	37
Obr. 17. Vulkanizační křivka [21].....	40
Obr. 18. Kordová tkanina [1].....	42
Obr. 19. Tvar a rozměry pásu	46
Obr. 20. Síťovaný model	47
Obr. 21. Element typu Hex-8-84 [22].....	48
Obr. 22. Element typu Hex-8-146 [22].....	48
Obr. 23. Naměřená data proložená zvoleným hyperelastickým modelem	50
Obr. 24. Materiálové charakteristiky použité oceli.....	51
Obr. 25. Použití funkce Inserts	51
Obr. 26. Definice výztuže pomocí funkce REBAR.....	52
Obr. 27. Okrajové podmínky – zabránění pohybu v ose x	53
Obr. 28. Okrajové podmínky krajních uzlů v rovině YZ.....	54
Obr. 29. Okrajové podmínky krajních uzlů v rovině ZY	55
Obr. 30. Okrajové podmínky – zatížení uzlů v ose x	56
Obr. 31. Způsob nastavení velkých deformací ve výpočtu.....	57
Obr. 32. Měření poloměru sbaleného pásu	58

Obr. 33. Zobrazení vektorové reakční síly	59
Obr. 34. Stanovení neutrální polohy výztuží	60
Obr. 35. Poloha výztuží při analýze změny úhlů výztuží	61
Obr. 36. Výsledky analýzy pro úhel 30° - posunutí v ose Z.....	62
Obr. 37. Výsledky analýzy pro úhel 30° - Vektorové zobrazení reakční síly	62
Obr. 38. Výsledky analýzy pro úhel 45° - Posunutí v ose Z.....	63
Obr. 39. Výsledky analýzy pro úhel 45° - Vektorové zobrazení reakční síly	63
Obr. 40. Schéma polohování výztuží.....	64
Obr. 41. Výsledky analýzy pro polohu 0,007 – Posunutí v ose Z	65
Obr. 42. Výsledky analýzy pro polohu 0,007 – Vektorové zobrazení reakční síly	65
Obr. 43. Výsledky analýzy pro polohu 0,007 při protažení o 4 % - Posunutí v ose Z.....	67
Obr. 44. Výsledky analýzy pro polohu 0,007 při protažení o 4 % - Vektorové zobrazení reakční síly	67
Obr. 45. Výsledná analýza pro úhel 45° a polohu 0,007 – Posunutí v ose Z	68
Obr. 46. Výsledná analýza pro úhel 45° a polohu 0,007 – Reakční síly	69
Obr. 47. Grafické znázornění změny poloměru se změnou polohy – trendová křivka.....	69
Obr. 48. Grafické znázornění změny reakční síly se změnou polohy	70
Obr. 49. Regresní model pro úhel 45°	71
Obr. 50. Regresní model pro úhel 30°	72
Obr. 51. Průhyb pásu pro úhel 55° - Posunutí v ose Z	73
Obr. 52. Průhyb pásu pro úhel 56° - Posunutí v ose Z	73

SEZNAM TABULEK

Tab. 1. Tabulka pro určení koeficientu plnění [5]	18
Tab. 2. Základní vlastnosti mikrostruktury vybraných BR typů [14].....	36
Tab. 3. Tabulka relativních chyb hyperelastických modelů	49
Tab. 4. Naměřená data pro stanovení optimálního úhlu	61
Tab. 5. Naměřená data pro různé polohy výztuží - úhel 30 °	64
Tab. 6. Naměřená data pro různé polohy výztuží pro snížené protažení - úhel 30 ° ..	66
Tab. 7. Naměřená data pro různé polohy výztuží - úhel 45 °	68
Tab. 8. Regresní analýza pro úhel 45 °	70
Tab. 9. Regresní analýza pro úhel 30 °	71

SEZNAM PŘÍLOH

PI: DVD disk obsahující

- vlastní text diplomové práce
- vypracovaný model v programu MSC.Marc Mentat 2017, ve formátu .mud
- naměřená data v programu Excel, ve formě tabulek, ve formátu .xlsx
- tabulky v programu QC.Expert, ve formátu .vts