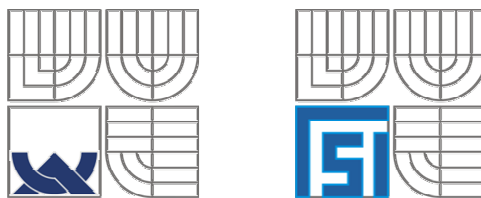


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A BIOMECHANIKY

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND BIOMECHANICS

VÝPOČTOVÉ MODELOVÁNÍ DEFORMAČNĚ-NAPĚŤOVÝCH STAVŮ PNEUMATIKY

Computational modelling of stress-strain states in tyres

DIPLOMOVÁ PRÁCE

DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ondřej Lavický

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Jiří Burša, Ph.D.

Brno 2008

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá možnostmi výpočtového modelování mechanického chování elastomerů a kompozitů s pryžovou maticí a jejich využití pro tvorbu výpočtového modelu pneumatiky. Byl vytvořen 2D-axisymetrický výpočtový model pneumatiky MATA-DOR 165/65 R13 ve dvou geometrických variantách. Pro výpočtové modelování je aplikována metoda konečných prvků (MKP). Model byl řešen v několika variantách lišících se použitou úrovní modelování materiálu. Nejprve byla provedena analýza vlivu vnitřního tlaku na deformaci jednotlivých modelů. Dále byl řešen vliv zatížení pneumatiky úhlovou rychlostí současně se zatížením vnitřním tlakem. Byl také ověřen vliv tloušťky běhounové vrstvy na celkovou deformaci pláště pneumatiky.

Klíčová slova:

Pneumatika, výpočtové modelování, metoda konečných prvků, kompozitní prvky pláště, ortotropie, hyperelastický materiál.

ABSTRACT

Work occupies computational modelling mechanical behavior elastomers and composites with rubber matrix and their utilization for compute model of tire creation. MATADOR tire 165/65 R13 Axisymmetric 2D model was created in two geometric variants. For the computational modeling is applying the Finite element method (FEM).

The model was in different variants distinctive grade of modeling material. At first was done inner pressure analyst impact on deformation of each of model. Then was count influence on tire load with angular velocity meanwhile with inner pressure. The impact thickness of tire protector layer on global deformation tyre casing was verified too.

Keywords:

Tire, computational modelling, finite element method (FEM), composite element tire-casing, orthotropy, hyperelastic material.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE:

Lavický, O. *Výpočtové modelování deformačně-napěťových stavů pneumatiky.*

Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 77 s.

Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jiří Burša, Ph.D.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ:

Prohlašuji, že jsem byl seznámen s předpisy pro vypracování diplomové práce a že jsem celou svou diplomovou práci vypracoval samostatně, pod vedením vedoucího diplomové práce doc. Ing. Jiřího Burši, Ph.D s použitím uvedené literatury.

V Brně dne 23.5.2008

.....
Ondřej Lavický

PODĚKOVÁNÍ:

Rád bych zde poděkoval vedoucímu své diplomové práce doc. Ing. Jiřímu Buršovi, Ph.D. za jeho vstřícnost, cenné rady a připomínky v průběhu celé doby řešení práce. Dále bych chtěl poděkoval všem těm, kteří mi poskytli pomoc či podporu.

OBSAH

1. ÚVOD.....	12
2. POPIS PROBLÉMOVÉ SITUACE.....	13
3. FORMULACE PROBLÉMU A CÍLE ŘEŠENÍ.....	14
3.1. Formulace problému.....	14
3.2. Cíle řešení.....	14
4. REŠERŠE LITERATURY.....	15
5. NÁZVOSLOVÍ A KONSTRUKČNÍ PRVKY PNEUMATIKY.....	17
5.1. Konstrukce pneumatiky.....	19
6. EXPERIMENTÁLNÍ MODELOVÁNÍ PNEUMATIK A KOMPONENT PNEUMATIKY.....	23
6.1. Zkoušky pneumatiky jako celku.....	23
6.1.1. Laboratorní zkoušky.....	23
6.1.2. Silniční zkoušky.....	24
6.2. Zkoušky účelově oddělených částí pneumatiky.....	25
6.3. Návrh experimentu.....	26
7. VÝVOJ MODELOVÁNÍ PNEUMATIKY.....	27
7.1. Příklady modelování pneumatiky.....	27
7.2. Teorie používané při modelování pneumatik.....	28
7.3. Volba efektivní metody řešení.....	30
8. ÚDAJE VSTUPUJÍCÍ DO ALGORITMU.....	31
8.1. Vstupní údaje o geometrii.....	31
8.2. Vstupní údaje o materiálu.....	31
8.2.1. Hyperelastické materiály.....	31
8.2.2. Konstanty elasticity pryže.....	33
8.2.3. Kompozitní materiály.....	34
8.2.4. Struktura jednotlivých prvků pneumatiky.....	35
8.2.5. Materiálové charakteristiky.....	37

8.3.Vstupní údaje o vazbách.....	40
8.4.Vstupní údaje o zatížení.....	40
9.VLASTNÍ PROCES ŘEŠENÍ.....	43
9.1.Model geometrie.....	44
9.2.Model materiálu.....	47
9.3. Konečnoprvkový model.....	47
9.3.1.Popis použitých prvků.....	47
9.3.2.Konečnoprvková síť modelů.....	48
9.4.Model vazeb.....	49
9.5.Model zatížení.....	50
9.6.Nastavení řešiče vypočtového modelu.....	51
10.PREZENTACE VÝSLEDKŮ.....	51
10.1.Model s využitím elastického lineárního chování materiálu.....	51
10.1.1.Rotačně symetrická úloha simulující nafukování pláště.....	51
10.1.2.Rotačně symetrická úloha simulující vliv odstředivých sil.....	53
10.2.Model s využitím hyperelastického chování materiálu.....	55
10.2.1.Rotačně symetrická úloha simulující nafukování pláště.....	55
10.2.2.Rotačně symetrická úloha simulující vliv odstředivých sil.....	59
10.3.Srovnání jednotlivých modelů.....	62
10.3.1.Rotačně symetrická úloha simulující nafukování pláště.....	62
10.3.2.Rotačně symetrická úloha simulující vliv odstředivých sil.....	65
10.3.3.Další srovnávací úlohy.....	66
11.ANALÝZA VÝSLEDKŮ.....	70
10.1.Rotačně symetrická úloha simulující nafukování pláště.....	70
10.2.Rotačně symetrická úloha simulující vliv odstředivých sil.....	71
10.3.Další srovnávací úlohy.....	72
12.ZÁVĚR.....	73
14.POUŽITÍ LITERATURA.....	74

1. ÚVOD

Pro historii automobilové dopravy byl vždy charakteristický význam a pokračující vývoj pneumatik. Základ jejímu vývoji položil v roce 1845 Angličan Robert William Thomson, když si nechal patentovat „vzduchovou hadici“. Jeho nápad však zůstal nevyužit. Až v roce 1888 přišel J.B. Dunlop se svojí verzí pneumatiky (první pokus o použití pneumatiky na automobilu patří A. Michelinovi). Ta se postupně začala stále více uplatňovat a s tím rostly i nároky jež na ni byly kladeny. Od roku 1892 se díky J.F. Palmerovi začalo přecházet z původního kříženého výztužného materiálu na vyztužení kordovou tkaninou. K všeobecnému zavedení kordové tkaniny jako základního výztužného prvku dochází v letech 1914 až 1925. S rostoucím využíváním nové výztuže pneumatik také dochází k vývoji materiálů použitých při výrobě kordové tkaniny. Od Irského lnu až po aramidový kord na bázi aromatických polyamidů, který se používá od roku 1976. Souběžně s vývojem výztužných materiálů probíhal i rozvoj výrobních technologií a konstrukce pneumatiky. Např. v roce 1904 byl zaveden plochý běhoun a o rok později byl běhoun opatřen vzorkem pro lepší přenos sil mezi vozidlem a vozovkou, 1948 začal ve firmě Michelin vývoj radiální pneumatiky, roku 1950 byla zavedena bezdušová pneumatika a v roce 1967 vzniká pneumatika s diagonální kostrou opásanou výztužným pásem. V současné době je struktura pláště pneumatiky značně vzdálená původnímu konstrukčnímu uspořádání a často ji tvoří i více jak deset materiálů různých a často vzájemně velmi odlišných parametrů. Převládají materiály s hyperelastickým chováním či výrazně ortotropními vlastnostmi. Neustálý vývoj v oblasti konstrukčního uspořádání a použitých materiálů je důsledkem stále se zvyšujících požadavků kladených na pneumatiky.

Mezi hlavní požadavky na pneumatiky je bezpečnost jejich provozu a to jak pasivní související s výrobní technologií, tak aktivní mezi jejíž požadavky patří vysoká jízdní bezpečnost na různém povrchu, odolnost proti průrazu a rychlostní odolnost. Na pneumatiky jsou kladeny i funkční požadavky (parametry pneumatik, které mají vliv na jízdní vlastnosti vozidla) a mezi další požadavky na pneumatiky též patří dobrá odolnost proti opotřebení, vysoká životnost a pevnost, nízký valivý odpor, schopnost obnovení (protektorování), schopnost recyklace, dobré tlumení nerovností vozovky, nízká hlučnost, nízká hmotnost, statická a dynamická vyváženost, vhodné deformační charakteristiky, cena atd.

2. POPIS PROBLÉMOVÉ SITUACE

Pneumatika představuje značně složitý kompozitní prvek na kterém závisí bezpečnost jízdy vozidla. Metody pro experimentální a teoretickou napěťovou analýzu pneumatiky jsou mnohem obtížnější, než u jiných konstrukčních prvků vlivem rozdílnosti materiálových vlastností základních strukturních komponent pláště a složité struktury příčného průřezu. Plášť jako celek je tedy nehomogenní anizotropní těleso složené z různých druhů elastomerových a kompozitních materiálů vykazující velké deformace. Navíc je za provozu teplotně zatížené.

Experimentální zkoušky celé pneumatiky neposkytují informace o deformačním chování jednotlivých komponentů pneumatiky v takové míře, aby bylo z výsledků patrné jak změny jednotlivých parametrů prvků ovlivní chování pneumatiky jako celku.

V současnosti se k modelování pneumatiky používají dva základní přístupy a to *matematický analytický model* a *model numerický (metoda konečných prvků)*. Pomocí MKP modelu pláště lze řešit i složitější způsoby zatěžování a chování pneumatiky.

3. FORMULACE PROBLÉMU A CÍLE ŘEŠENÍ

3.1. Formulace problému

Z analýzy problémové situace vyplývá důležitost pneumatiky pro provoz vozidel a s tím spojená potřeba vyhodnocování deformačně-napět'ových stavů ke kterým v plášti pneumatiky za provozu dochází. V dnešní době existuje množství přístupů a teorií vztahujících se k modelování pneumatik. Často však jde o úzce účelové modely používané ke specifickým simulacím. Modely určené k deformačně-napět'ové analýze pneumatiky patří k nejsložitějším a dosud v plné míře nevyřešeným. Jejich věrohodnost je omezena složitostí konstitutivního popisu použitých kompozitních materiálů, které vykazují velké deformace a anizotropii, stejně jako obtížným získáváním potřebného velkého množství vstupních údajů o vlastnostech materiálu. Vzhledem k rozsáhlosti problému analýzy pneumatiky byly cíle řešení omezeny na vybrané typy modelů a způsoby zatížení.

3.2. Cíle řešení problému

Seznámit se s možnostmi výpočtového modelování mechanického chování elastomerů a kompozitů s pryžovou maticí. Dále vytvořit výpočtový model pneumatiky na dosažitelné úrovni modelování její struktury a provést analýzu jejích deformačně napět'ových stavů při vybraných způsobech zatěžování.

4. REŠERŠE LITERATURY

Ing. V.Dočkal, Doc.Ing. J.Kovanda CSc., Ing. F.Hrubec CSc.:

Pneumatiky, ČVUT v Praze 1998 – skriptum věnované hlavním rysům a vlastnostem pneumatik, zahrnuje také základní přehled zkouškách a matematickém modelování pneumatik.

Ing. J.Krmela PhD., Prof. Ing. F.Pešlová PhD.:

Aplikace výpočtového modelování pro vícevrstvé kompozitní materiály, Computational Mechanics 2006 – problematika výpočtového modelování složitých kompozitních struktur aplikovaných na plášť pneumatiky

S.L.Skolov:

Calculation of the Stress-Strain State of Pneumatic Tires by the Finite Element Method, Journal of Machinery manufacture and Realibility 2007, Vol.36, No.1 – metody pro simulování 3D pryž-kordové struktury a vyhodnocení kritických míst koncentrace napětí v patce pláště a předcházení možným mezním stavům.

J.K.Ojala

Using ABAQUS in tire development process, ABAQUS Users' Conference 2005 – zkušenosti s tvorbou modelů pneumatik v systému ABAQUS.

E.I.Grigolyuk, G.M.Kulikov, S.V.Plotnikova:

Contact Problem for a Pneumatic Tire Interacting with a Rigid Foundation, Mechanics of Composite Materials, Vol.40, No.5, 2004 – řešení kontaktní úlohy za pomoci vícevrstvé Timoshenkovy skořepiny umožňující velké deformace a natočení

S.Rao, I.M.Daniel, E.E.Gdoutos:

Mechanical properties and Failure Behavior of Cord/Rubber Composites, Applied Composite Materials 11, 2004 – mechanické vlastnosti a porušování kord-pryžového kompozitního materiálu při různé orientaci kordových vláken.

V.Harth, M.Fayet, L.Maiffredy:

A Modeling Approach to Tire-Obstacle Interaction, Multi System Dynamics 11, 2004 – modelování kontaktní úlohy pneumatika těžkého terénního vozu/podklad.

Li Li and Fei-Yue Wang

Advance Tire Friction Modeling and Monitoring, Springer US, 2007 – modelování tření při kontaktu rotujícího pláště a vozovky

A.Abe, T.Kamegawa, Y.Nakajima:

Optimization of Construction of Tire Reinforcement by Genetic Algorithm, *Optimization and Engineering*, 5, 2004 – optimalizace konstrukce při vývoji nových řešení nárazníků v pneumatikách.

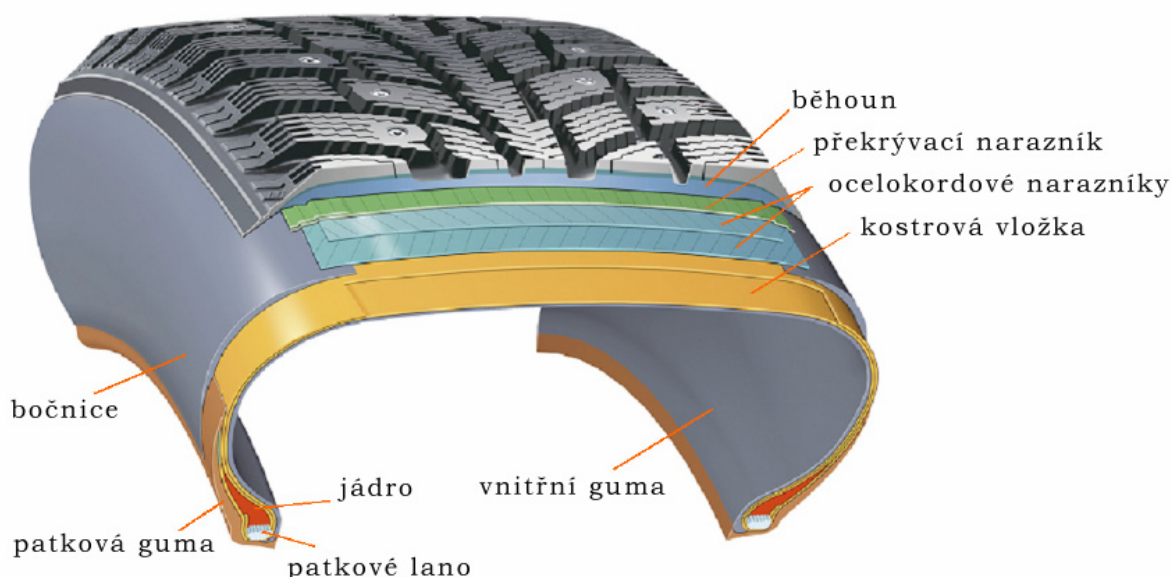
Z rešeršní studie vyplývá, že práce zabývající se deformačně-napětovými stavy pneumatik v současné době obvykle využívají modely nižší úrovně (např. modely vytvořené na základě teorie tenkých skořepin) či používají účelové modely omezující se na řešení dílčích problémů jako je silové působení na plášť pneumatiky při odvalování, konstrukční uspořádání pláště pneumatiky či analýzu chování kompozitních prvků pláště. Řešení deformačně napětových stavů pneumatiky jako celku pomocí MKP se z rešeršní studie zabývá práce J.Krmely (ze které bylo čerpáno mnoho poznatků) a částečně také práce S.L.Skolova.

5. NÁZVOSLOVÍ A KONSTRUKČNÍ PRVKY PNEUMATIKY

Kapitola je zpracována na základě poznatků z [1], [3], [4].

Pneumatika - plášť (popřípadě s duší a vložkou) namontovaný na ráfek a naplněný tlakovým médiem. Pneumatiku jako těleso lze hodnotit z několika hledisek:

- *Geometrického* – pneumatika tvoří uzavřený prstěnec
- *Pevnosti a pružnosti* – pneumatika tvoří tlakovou nádobu, přičemž stěny lze nahradit pružnými membránami
- *Složení jednotlivých částí* – pneumatika potom hodnotíme jako těleso a anizotropními vlastnostmi



Obr.5.1. – struktura pláště pneumatiky

Plášť (pneumatiky) – pružná vnější část pneumatiky, která zajišťuje styk s vozovkou a která patní částí dosedá na ráfek.

Elastomer - elastomery jsou makromolekulární látky schopné přecházet vulkanizací ze stavu převážně plastického do stavu převážně elastického.

Pryž – vzniká vulkanizací elastomeru (kaučuku)

Vulkanizace - vulkanizace je fyzikálně chemický proces, při němž působením vulkanizačního činidla nebo energie dochází k strukturním změnám elastomeru. Elastomer s lineární strukturou makromolekul se mění v pryž s prostorovou strukturou makromolekul. Během vulkanizace se mezi lineárními řetězci tvoří příčné vazby neboli můstky, které způsobí zesíťování struktury látky.

Běhoun – zabezpečuje kontakt s vozovkou, hlavní funkcí je přenos síly mezi vozidlovým kolem a vozovkou. Tloušťka běhounu má vliv na tepelný stav pneumatiky a proto je při návrhu snaha minimalizovat jeho výšku.

Boční klínek – profil tvořící přechodovou část mezi běhounem a bočnicí (tyto dvě části pneumatiky mají výrazně odlišné vlastnosti).

Bočnice – složení této části pneumatiky je přizpůsobeno pružícím vlastnostem boku pneumatiky. Dále bočnice chrání kostru před vnějšími vlivy.

Nosná kostrová vložka – je tvořena kordovými vložkami zakotvenými kolem lan.

Překrývací nárazník – používá se u pneumatik vyšších rychlostních kategorií a slouží k širšímu rozložení tlumení nárazů v koruně pláště pneumatiky.

Ocelokordové nárazníky – tvoří přechod mezi běhounem a kordovou kostrou pláště. Nárazník radiální pneumatiky výrazně zlepšuje její pevnostní charakteristiky, především v podélném a bočním směru.

Nosná kostrová vložka – významně ovlivňuje funkční vlastnosti pneumatiky. Je složena z kordových vložek zakotvených kolem patkových lan.

Patková guma – zabezpečuje styk pneumatiky s ramínkem ráfku. Spolu s patkovým lanem, kostrovými vložkami a případně jádrem pneumatiky dotváří tuhost patky.

Vnitřní guma - tato část pryžové vrstvy se nachází na vnitřní straně po celém profilu pneumatiky. Používá se u bezdušových pneumatik a zabraňuje úniku tlakového média.

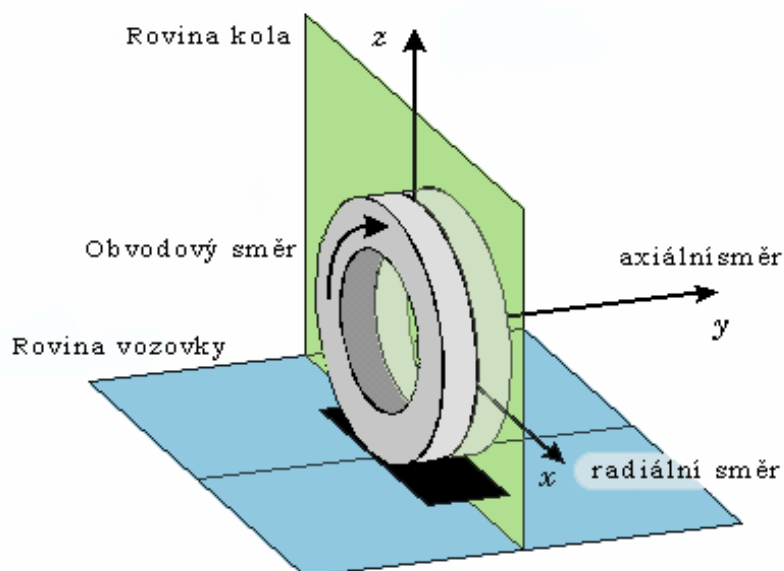
Jádro – vyplňuje prostor nad patkovým lanem a vyztužuje tuto část pneumatiky. U některých typů pneumatik je tato část nahrazena speciálním profilem patkové gumy.

Patkové lano – zabezpečuje plynulé a bezpečné ukotvení kostrových vložek a usazení pláště na ráfek.

Patkové lano se dle způsobu výroby se dělí na dva typy:

- *Stříkaná* - lano má čtvercový či obdélníkový průřez a jeho rozměr určuje počet drátů ve vrstvě a počet vrstev v laně.
- *Vinutá* – lano má kruhový průřez a jeho vlastnosti závisí na požadavcích konstruktéra

Směry a roviny pneumatiky – pro správnou orientaci v dalším textu je potřebné si ujasnit jednotlivé směry a roviny pneumatiky (*obr.5.2.*). Toto označení je použito při popisu pneumatiky jako celku. Později budou ještě vysvětleno uspořádání směrů hlavních materiálových os kompozitních prvků konstrukce pneumatiky.



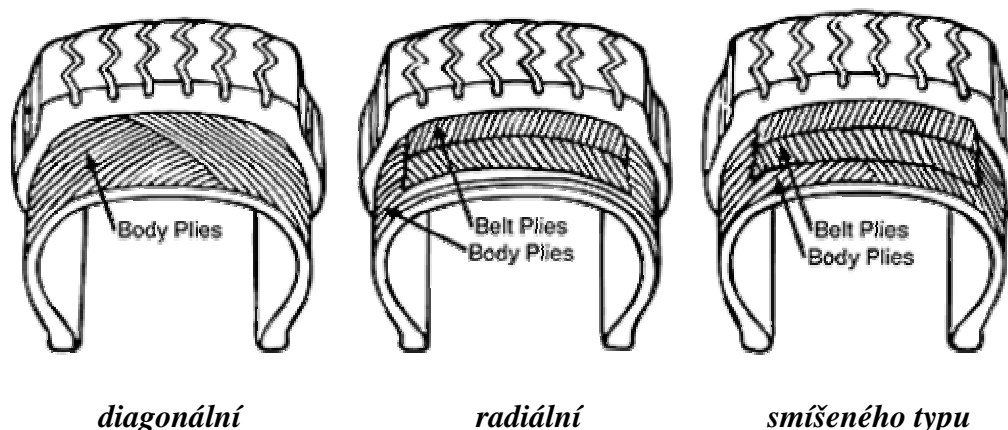
Obr.8.1. - Hlavní směry a roviny pneumatiky

5.1.Konstrukce pneumatiky

Hlavní vliv na deformační vlastnosti pneumatiky má, vedle materiálu kostry, počet a orientace jejích kordových vložek. Podle toho dělíme pneumatiky na - diagonální

- radiální

- smíšeného typu („bias belted“)



Obr.5.3. – základní typy pláštíů pneumatik podle stavby kordových vložek

Diagonální pneumatika – má kostru tvořenou páry kordových vložek (tzn. je jich vždy sudý počet) s orientací vláken pod úhlem menším než 90° (obvykle 30° až 40°) vzhledem k podélné rovině symetrie běhounu (obr.5.3.). Vlákná přenášejí obvodové i příčné síly přímo do patky pláště. Při zatížené pneumatiky a její deformaci se vlákna neprodlužují a namáhají pryž mezi nimi na stříh. Tím vzniká teplo a tedy ztráty. Tento typ pneumatiky se používá především u užitkových silničních vozidel.

Radiální pneumatika – nemá vlákna kordových vložek zkřížena a jsou uložena pod úhlem blízkým 90° vzhledem k podélné rovině symetrie běhounu. Počet vložek nemusí již být nutně sudý. Tato část přenáší boční a radiální síly. Schopnost přenosu obvodové síly je však malá, proto je kostra stabilizována tzv. nárazníkem. Ten roznáší obvodové síly po celém obvodu ráfku. Nárazník je tvořen vložkami s vlákny kříženými pod úhlem 15° až 20° (obr.5.3.). Valivý odpor a tedy i vývin tepla je u tohoto typu pneumatiky způsoben zejména podélným ohybem kordových vláken a pryže s nimi spojené v obvodovém pásu. Díky tomu jsou ztráty menší než u diagonálního typu. Radiální pneumatiky se používají převážně u osobních silničních motorových vozidel.

Pneumatika smíšené konstrukce - označuje se také jako *diagonální s nárazníkovým pásem* a je kompromisem mezi vlastnostmi předchozích dvou typů. Kostra je podobná kostře

diagonálního pláště s vlákny kříženými pod úhlem obvykle větším než 60° a je zpevněna pásem ze dvou nebo více vrstev nárazníkového kordu uloženého po střídavým úhlem obvykle menším než 25° (obr.5.3.).

Pneumatiky se dále rozdělují na *letní* a *zimní*. Rozdíl nespočívá pouze v lamelování dezénových bloků, ale především v rozdílném složení směsi, která převážně ovlivňuje vlastnosti pneumatiky.

Letní pneumatika – má jemné lamelování, směs letních pneumatik ztrácí při teplotách pod bodem mrazu požadované vlastnosti. Tím je ovlivněna schopnost vést vozidlo v příčném i podélném směru.

Zimní pneumatika – kromě speciálního typu dezénu směrového charakteru s hustým lamelováním se zimní pneumatiky liší speciální běhounovou směsí s vyšším obsahem křemičitých plniv (silika). Tím jsou zabezpečeny elastické vlastnosti směsi i při nízkých teplotách (až -30°C).

Další vývoj konstrukce pneumatiky - Od roku 2005 probíhá u firmy Michelin vývoj zcela nové konstrukce pneumatiky s názvem „Tweel“ (zkratka pro spojení slov Tire a Wheel, Obr.5.4.) jež pravděpodobně předznamenává budoucí směřování konstrukce pneumatik. Základem technologie Tweel je střed „disku“, ten totiž nahrazuje nutný tlak vzduchu, tudíž slouží jako tlumící a zároveň pružná vrstva. Adaptabilní paprsky jsou jištěny stejně adaptabilním pláštěm disku. Samotná pneumatika se po deformaci ihned a velmi lehce vrátí do původního stavu. Tweel je tedy lehčí, komfortnější a nedefektní. Vertikální tuhost a horizontální tuhost se dají oproti klasickým pneumatikám nastavovat nezávisle na sobě. Pro Tweel mluví i nižší valivý odpor, spotřeba, vyšší komfort a rychle reagující řízení. V podstatě jedinou překážkou jejího rozšíření je nadměrná hlučnost při rychlostech vyšších než 80km/h . Z toho důvodu se tato konstrukce pneumatiky zatím uplatňuje pouze u speciálních vozidel.



Obr.5.4. – MICHELIN „Tweel“

6. EXPERIMENTÁLNÍ MODELOVÁNÍ PNEUMATIK A KOMPONENT PNEUMATIKY

Při vývoji pneumatik a vozidel je prováděna celá řada experimentů s cílem ověřit vliv změny technologie výroby pneumatik či vliv neobvyklých nebo mimořádných podmínek provozu na chování pneumatik na vozidle a jejich životnost.

6.1. Zkoušky pneumatiky jako celku

6.1.1. Laboratorní zkoušky

Většina těchto zkoušek je standardizována a zpravidla se rozdělují na *statické* a *dynamické* zkoušky.

Statické zkoušky – přesnější označení je kvazistatické zkoušky, jelikož v průběhu se některá z akčních veličin mění (např. při zkoušce radiální tuhosti se zvětšuje stlačení pneumatiky, při zkoušce absolutní pevnosti roste tlak atd.). Výsledkem těchto zkoušek jsou určité charakteristiky, které slouží k porovnání různých konstrukcí pneumatik, případně k odhadu chování pneumatik za provozu.

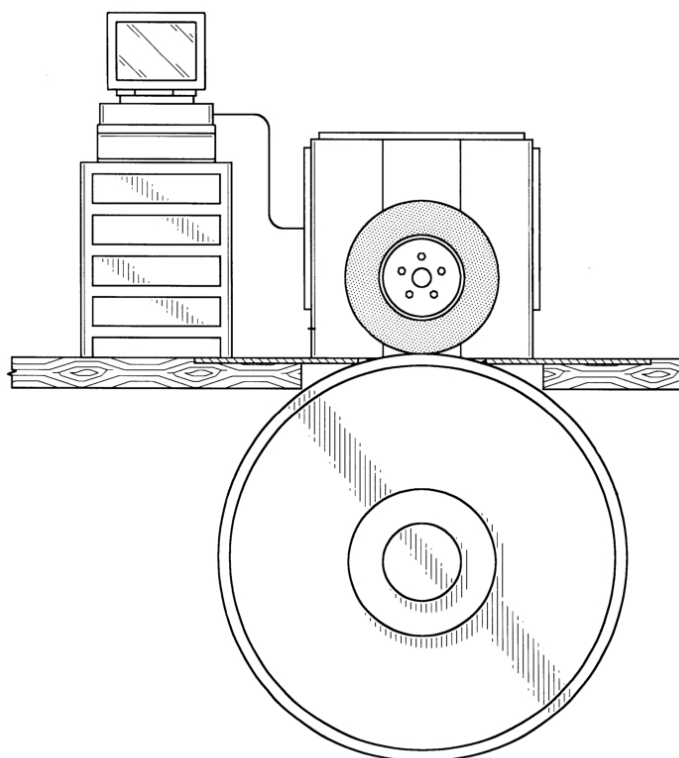
Příklady statických zkoušek - zkouška rozměrů

- zkouška radiální tuhosti
- zkouška obvodové tuhosti
- zkouška boční tuhosti
- zkouška rozložení měrného tlaku v ploše otisku

Dynamické zkoušky – jsou prováděny na různých zkušební strojích za rotace. Pneumatika je nahuštěná na předepsaný tlak a je přitlačována na rotující ocelový buben, který nahrazuje vozovku.

Příklady dynamických zkoušek - zkouška tuhosti za rotace v radiálním směru (obr.6.1.)

- zkouška destrukční rychlosti
- zkouška valivého odporu pneumatiky



Obr.6.1. – Schéma měřícího zařízení pro zkoušku tuhosti za rotace v radiálním směru

6.1.2. Silniční zkoušky

Provádějí se na speciálních polygonech za účelem zjišťování všech jízdních vlastností pneumatiky (stabilita, brzdící vlastnosti, aquaplaining, záběrové schopnosti na sněhu atd.). V současné době jsou z nejpoužívanější:

Zkoušky na dynamometrických přívěsech – měří se reakční síly pneumatiky s vozovkou za jízdy. Je také možnost určit skluzové charakteristiky, směrové vlastnosti, zkoumat vznik a přenos vibrací.

Zkoušky pneumatik na automobilu – provádí se za účelem objektivního přiřazení vlastností pneumatiky k vlastnostem vozu. Při objektivních zkouškách se hodnotí především říditelnost a stability vozidla při jízdě po kruhové dráze, v přímém směru nebo při stanovených manévrech (jsou standardizovány dle ČSN, ISO,...)

6.2. Zkoušky účelově oddělených částí pneumatiky

Návrh výpočtového modelu pneumatiky vyžaduje znalost metody zkoušení jednotlivých prvků pláště, především statické zkoušky – zkoušky v tahu, tlakem a v krutu. Výsledky těchto zkoušek slouží jako vstupní hodnoty pro zadání materiálových vlastností u komponent z elastomerů a kompozitních materiálů.

Zkušební vzorky - výřezy z pneumatik

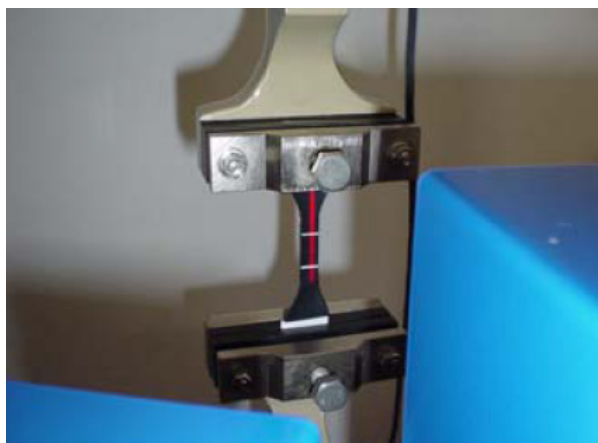
- elastomery
- polymery

Zkoušky *výřezů pneumatik* v tahu a tlakem byly prováděny na ÚMT VUT v Brně [4], při nich byla zjištěna důležitost místa odběru vzorku pláště. K závěrům z těchto zkoušek dále patřila nutnost konstrukce speciálních přípravků pro tyto zkoušky a vypracování detailní metodiky měření.

Příklady zkoušek vzorků:

- Zkouška jednoosým tahem (v jednoosé tahové napjatosti, *obr.6.2.*)
- Zkouška ekvibiaxiální (ve dvouosé napjatosti)
- Zkouška tahem při nulových příčných posuvech (v rovinné deformaci)
- Zkouška objemové stlačitelnosti (v trojosé rovnoměrné napjatosti)

Zkušební tělíška pro zkoušky *elastomerů* v tahu jsou standardizovány dle ČSN 640605.



Obr.6.2. - Uniaxiální tahová zkouška pryže [10]

6.3. Návrh experimentu

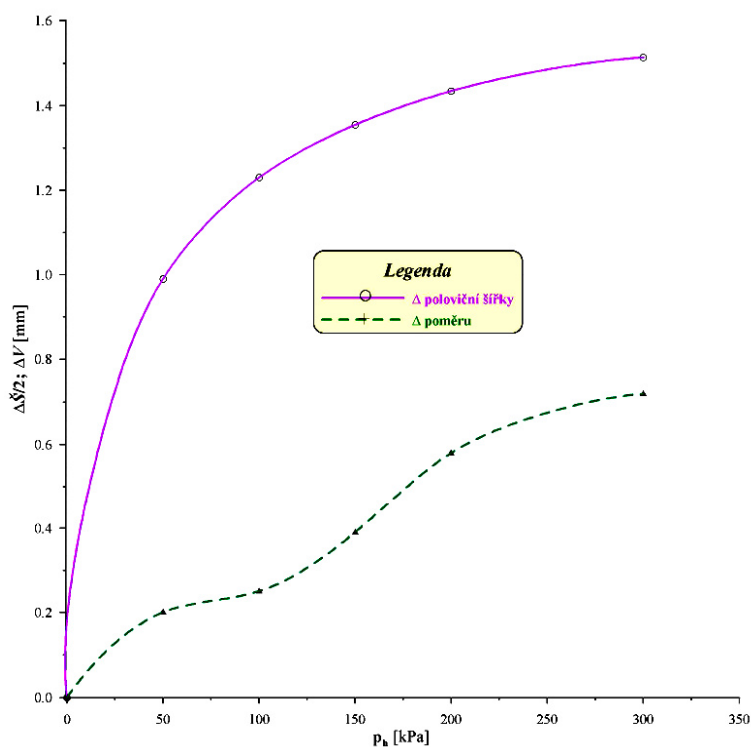
Na ÚMT VUT v Brně byl v dřívější době proveden experiment spočívající v měření šířky (\check{S}) a výšky (V) pláště pneumatiky MATADOR 165/65 13R v závislosti na tlaku huštění [4]. Výška byla definovaná jako vzdálenost mezi místem dosednutí patky na ráfek a nejvyšším bodem běhounu. Měření bylo prováděno posuvným měřidlem při zvyšování i snižování tlaku a bylo odstupňováno po 50kPa.

Bylo zjištěno, že měřené rozměry pneumatiky (změny jejich hodnot) v případě zvyšování i snižování tlaku jsou téměř shodné. Dalším závěrem bylo, že s rostoucím tlakem pneumatiky se zvětšuje poloměr šířka pneumatiky (*obr.6.3.*).

Vzhledem k použité metodě měření a velmi malým změnám rozměru výšky byl experiment považován pouze za informační vstup pro další výpočty. Pro přiblížení se skutečnému chování pneumatiky by bylo potřebné statistické vyhodnocení změn rozměrů při opakovaném měření na pneumatice.

Výsledky experimentu pro vnitřní provozní tlak 180kPa:

- Změna výšky pneumatiky $\Delta V = 0,52\text{mm}$
- Změna šířky pneumatiky $\Delta \check{S} = 2,82\text{ mm}$



Obr.6.3. – Grafické znázornění závislosti měřených rozměrů na tlaku huštění [4]

7. MOŽNOSTI MODELOVÁNÍ PNEUMATIKY

Pneumatika tvoří silové rozhraní mezi vozidlem a prostředím resp. povrchem, po kterém se vozidlo pohybuje. Pneumatika představuje sama o sobě značně složitý silový prvek jehož vlastnosti a chování jsou ovlivněny nemalým množstvím konstrukčních a provozních parametrů. Z toho vyplývá zvláštní význam tohoto prvku pro bezpečnost vozidla.

Za dobu vývoje pneumatik vzniklo množství matematických modelů, které lze dělit z různých hledisek:

- účel, pro který je model navržen
- přístup k tvorbě modelu
- podmínky či oblast použití
- složitost modelu

7.1. Přístupy k tvorbě modelu pneumatiky

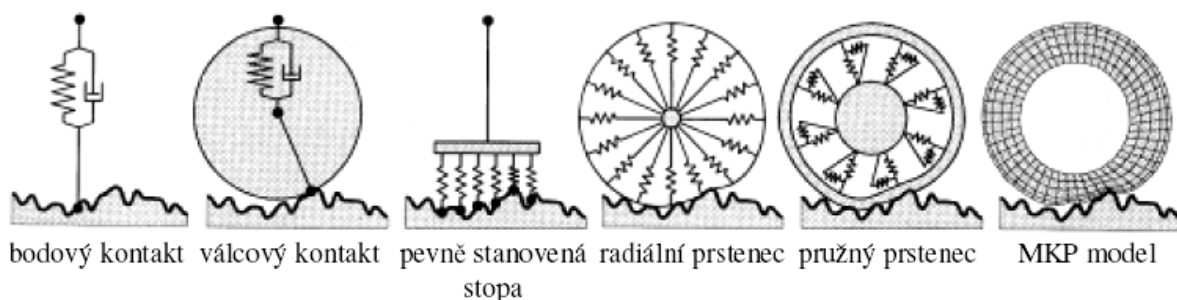
Modely s čistě empirickým základem – základ tvoří vícerozměrná experimentální data získaná převážně při měření na vozovce za podmínek co nejvíce se blížících skutečnému provozu.

Modely vznikající podobnostní metodou – za pomoci zvláštních postupů se ze základních průběhů naměřených za nominálních podmínek odvodí popis průběhů pro jiné než jmenovité podmínky.

Matematické popisy pneumatik – vznikají teoretickými postupy na základě jednoduchých fyzikálních modelů pneumatiky. Takto je tvořena většina modelů pro pochopení základních principů chování pneumatiky. Při vhodně zvoleném fyzikálním modelu mohou i tyto modely poskytovat dostatečnou přesnost výsledků pro omezenou oblast použití (např. simulace dynamiky jízdy vozidla).

Pokročilé teoretické modely – používají se k detailní analýze chování pneumatiky. Do této skupiny patří simulační kartáčový model a v současné době především modely vytvořené na základě metody konečných prvků. Řešení pomocí MKP např. umožňuje komplexnější postupy v modelování kontaktu pláště s podložkou.

Obecně platí, že modely založené více na empirických základech jsou vhodnější pro simulace dynamiky jízdy vozidla, zatímco modely s více teoretickým základem jsou vhodné pro analýzy vlastností konstrukce pneumatiky a jejich ovlivnění strukturou a konstrukcí pneumatiky.



Obr.7.1. – vývoj modelů pneumatiky pro modelování kontaktní úlohy [9]

7.2. Teorie používané při modelování pneumatik

Výběr vhodné teorie je opět závislý na mnoha aspektech. Závisí mimo jiné na charakteru vstupních veličin, existenci matematické teorie a na povaze řešeného problému tedy účelu modelu z hlediska oblasti použití a složitosti modelu. V současné době se při modelování pneumatik používají tyto teorie:

Membránová teorie – řeší rovnovážný tvar pneumatiky. Napětí ve stěně pláště vychází z předpokladu, že kostra má nulovou ohybovou tuhost. U některých konstrukčních provedení pneumatik má kostra značnou tloušťku a tedy není splněn předpoklad tenkostěnosti. Přesto je *membránová teorie* jedním ze základních přístupů při navrhování diagonálních pneumatik.

Teorie sítě – předpokládá, že jedinými nosnými elementy jsou kordy kostry a elastomery nenesou žádnou zátěž. Tzn. že kostra pláště je tvořena pouze sítí kordových nití. Protahání kordových nití se zanedbává. Rovnice teorie sítě pro tenkou membránu dobře aproximují chování bočnice radiální pneumatiky díky konstantnímu napětí kordů v této části pláště. Na výpočty na základě teorie sítě navázaly metody teorie laminátů a tenkých skořepin.

Laminátový model – je založen na teorii laminátů a bere tedy v úvahu i elastomery. Tento model se používá především pro stanovení tuhosti nárazníků a kostry. Předpokládají se malé deformace v oblasti lineární elasticity kordu a elastomeru. Rovnovážný stav je odvozen

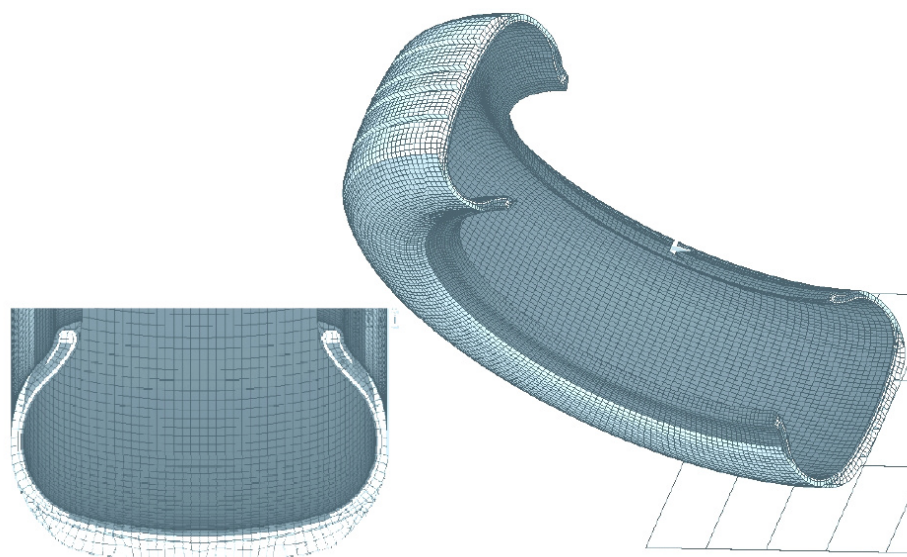
z elastických vlastností a deformačně-napětového chování materiálů, proto se výsledný tvar liší od profilu získaného *teorií sítě*.

Teorie tenkých skořepin – na rozdíl od membránové teorie se přihlíží k ohybové tuhosti kostry. Při řešení tvaru skořepin lze uplatnit metodu minimální vnitřní energie. Model využívající teorie skořepin by měl obecně dávat lepší výsledky než model na základě membránové teorie.

Rovnice dané pro tuto teorii popisují deformačně-napětové chování pouze pro malé deformace. U pláště pneumatiky však díky velkým deformacím dochází k porušení této podmínky a je tedy potřeba sledovat tvar pláště při postupném růstu tlaku huštění.

Pásový model pneumatiky – pás radiální pneumatiky stlačuje kostru a přenáší lokální deformace na celý obvod. Předpokládá se že osy kordů opisují geodetické čáry na neutrální ploše kostry, tím je dosažena eliminace nežádoucích předpětí v kostře. Také se díky tomu zmenšuje příkon potřebný pro odvalování pláště.

Vláknová teorie – předpokládá se skluz jednotlivých vrstev v sendvičové struktuře kostry. Pomocí vláknové teorie lze analyzovat tvar rotující nahuštěné a nezátížené pneumatiky, dále také vliv dostředivého zrychlení, huštění a namáhání konstrukce pneumatiky. Vláknová teorie nepracuje s napětími.



Obr.7.2. – Diskretizace vypočtového modelu pomocí MKP [2]

7.3. Volba efektivní metody řešení

V současné době je metoda konečných prvků (MKP) jedinou efektivní metodou pro řešení deformačně-napěťových stavů pneumatiky, protože umožňuje vystihnout realitu z hlediska geometrie, provozních a zkušebních zatížení a specifické struktury konstrukce pneumatiky.

Řešení problémů pomocí MKP nabízí celé řada komerčních programů (ANSYS, ABAQUS, NASTRAN a další). Na Ústavu mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky jsou k dispozici programy ANSYS a ABAQUS, z nichž byl pro řešení vybrán program ANSYS ve verzi 11.

Výpočet bude realizován na počítači AMD Athlon™ 64 3000+ (1.84GHz) s 2GB operační paměti.

8. ÚDAJE VSTUPUJÍCÍ DO ALGORITMU

8.1. Vstupní údaje o geometrii

Jako vstupní data byla poskytnuta doc. Ing. Buršou geometrie pneumatiky Matador 165/65 R13 ve formátu IGES. Za pomoci této geometrie byla v programu Rhinoceros 4.0 vytvořen nový model geometrie. Z tohoto nového modelu geometrie vycházely všechny dále použité modely.

Technické údaje o plášti MATADOR 165/65 R13 [7]

Vzorek.....	MP12
Kategorie rychlosti SI	T
Šířka nového pláště.....	170 mm
Průměr nového pláště.....	544 mm
Statický poloměr nového pláště.....	248 mm
Max. šířka pláště v provozu.....	177 mm
Max. průměr pláště v provozu.....	552 mm
Max. vnitřní tlak (huštění)	250 kPa
Max. nosnost	412 kg

8.2. Vstupní údaje o materiálu

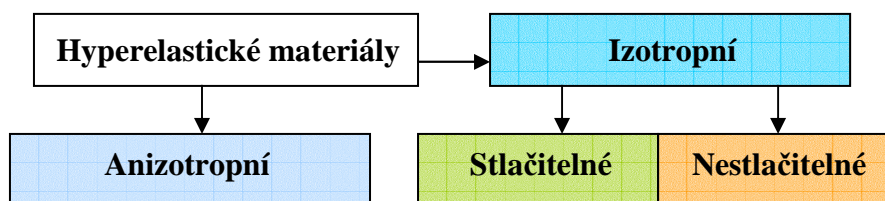
Jak již bylo uvedeno, tvoří pneumatika složitý kompozitní prvek skládající se ze strukturálních komponent s výrazně rozdílnými vlastnostmi. Materiály vyskytující se v plášti pneumatiky lze rozdělit na kompozitní a hyperelastické (elastomery).

8.2.1. Hyperelastické materiály

Definice hyperelastického materiálu – materiál je označován za hyperelastický pokud existuje elastická potencionální funkce W (měrná deformační energie), která je skalární funkcí některého z tenzorů přetvoření. To lze vyjádřit následovně:

$$S_{ij} = \frac{\partial W}{\partial E_{ij}} \quad (1)$$

Základní rozdělení hyperelastických materiálů:



Konstitutivní modely hyperelastických materiálů

U hyperelastických konstitutivních modelů je třeba odděleně modelovat objemovou (kulovou) a tvarovou (deviátorovou) složku deformace. Konstitutivní modely se tedy sestávají ze dvou částí. K popisu vlivu změny objemu na energii napjatosti se nejčastěji používá třetí invariant tenzoru gradientu deformace J a konstantou popisující změnu objemu. K popisu vlivu tvarové změny se používají modifikované invarianty některého z tenzoru přetvoření. Důvodem modifikace je právě oddělení tvarové změny od změny objemové.

Přehled konstitutivních modelů hyperelastických materiálů

- 1) pro materiály **izotropní nestlačitelné** (materiál má ve všech směrech stejné vlastnosti)
 - Neo-Hook
 - Mooney Rivlin
 - Polynomický
 - Ogden
 - Arruda-Boyce
- 2) pro materiály **anizotropní** (materiál nemá ve všech směrech stejné vlastnosti)
 - Holzapfel
 - Exponenciální
 - Polynomický

Z těchto modelů byl v práci použit Mooney-Rivlinův konstitutivní model, proto je zde uveden jeho podrobnější popis.

Model Mooney-Rivlin

Tento model patří mezi fenomenologické, tedy mezi modely aproximující experimentální data matematicky pomocí polynomů a exponenciálních funkcí, které ale neberou ohled na fyzikální podstatu materiálu. Je k dispozici ve variantách zahrnujících 2, 3, 5 a 9 parametrů. Všechny varianty Mooney-Rivlinova modelu fungují na stejném principu, pouze se mění počet materiálových parametrů. Tento model je použitelný do přibližně 100% přetvoření.

Hustota deformační energie pro 2-parametrický model je dána vztahem:

$$W = c_{10}(\bar{I}_1 - 3) + c_{01}(\bar{I}_2 - 3) + \frac{1}{d}(J - 1)^2 \quad (2)$$

Kde C_{10} , C_{01} a d jsou materiálové parametry, \bar{I}_1 a \bar{I}_2 jsou modifikované invarianty Cauchyho tenzoru deformace a J Jakobián transformace.

8.2.2. Konstanty elasticity pryže

Youngův modul pružnosti, tak jak ho známe z Hookova zákona, platí u materiálů s velkou elastickou deformací jen pro velmi krátké počáteční lineární oblasti, kde dochází k malým přetvořením. Vcelku je u těchto materiálů, bez ohledu na velkou vratnost deformace, závislost nelineární a její průběh není obvykle přímkový. Takové materiály tedy nelze charakterizovat pouze konstantní hodnotou Youngova modulu.

Pro zjednodušení můžeme považovat pryž za homogenní, izotropní lineárně elastický materiál se dvěma nezávislými konstantami. U elastických materiálů se běžně používá Youngův modul E_r a Poissonův poměr ν_r .

Youngův modul (elastický modul) se obvykle stanovuje z počátečního sklonu tahové křivky pryže. U nánosové pryže se typické hodnoty Youngova modulu pohybují mezi 5,5 a 21 MPa.. Hodnota je ovlivňována fyzikálními i chemickými vlivy.

V gumárenském průmyslu se používá pro kontrolu kvality pryže tzv. *modul 300%*. Ten může mít větší či menší vztah k Youngovu modulu, ale také k němu nemusí mít vztah žádný. Deformace 300% se u pneumatiky za provozních podmínek prakticky nevyskytují.

Poissonův poměr při jednoosém tahu do malých deformací je poměr příčného smrštění k podélnému protažení. I když všechny skutečné materiály jsou stlačitelné, lze pryže, jejichž poměr objemového modulu ku modulu ve smyku je několikanásobně vyššího řádu, považovat za nestlačitelné. Poissonův poměr se tedy u pryže blíží hodnotě 0,5.

8.2.3. Kompozitní materiály

Kompozitní materiály jsou složené z vláknové výztuže a matrice s podstatně nižší tuhostí i pevností. Vláknové kompozity kombinují vlastnosti obou komponent. Tyto vlastnosti je navíc možné ovlivňovat směrem uložení vláken, díky tomu lze dosáhnout vlastností, které jsou jiným způsobem jen těžko dosažitelné. Tato kapitola vychází převážně z poznatků uvedených v [5].

Lineárně elastické kompozity

Většina vláknových kompozitů patří mezi *ortotropní materiály*. Na rozdíl od materiálů izotropních, u nichž stačí zadání dvou elastických konstant (nejčastěji Youngův modul pružnosti a Poissonovo číslo), je u tohoto typu materiálu nutné zadat těchto parametrů devět (obvykle tři moduly pružnosti v tahu, tři Poissonova čísla a tři moduly pružnosti ve smyku). Přitom je nutné, aby použitý prvkový (lokální) souřadnicový systém vždy odpovídal hlavním materiálovým osám. V jiných (obecných) souřadnicových systémech se materiál chová jako obecně anizotropní. U anizotropních materiálů s ještě nižší mírou symetrie je pak již nutné přímé zadání jedenadvaceti nezávislých prvků matice elastických modulů nebo konstant.

Technické kompozity s hyperelastickou maticí

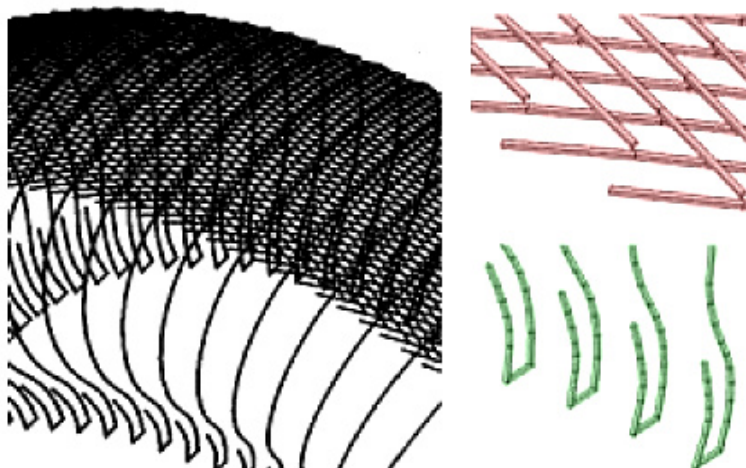
Teorie vláknových kompozitů, je založena na předpokladu malých přetvoření ($\epsilon_i < 1\%$). Existují však technické kompozitní materiály, u nichž některá složka (u vláknových kompozitů nejčastěji matrice), vykazuje velká elastická přetvoření. Typickým příkladem může být pryž vyztužená vlákny. Tento vláknový kompozit se běžně uplatňuje v konstrukcích pneumatik.

Zatímco u kompozitů splňujících předpoklad malých přetvoření (nejčastěji skleněná či borová vlákna v epoxidové pryskyřici) je obvyklý rozíl mezi elastickými parametry složek jeden až dva řády, pro kompozity s elastomerovou maticí je typický mnohem větší rozíl

mezi elastickými parametry vláken a matrice. Tzn. Youngův modul pružn vlákenosti dosahuje obvykle o několik řádů vyšší hodnoty než u matrice. Důsledkem velkých přetvoření matrice je *výrazně nelineární chování* takových kompozitů.

8.2.4. Struktura jednotlivých prvků pneumatiky

V této kapitole bude podrobněji popsána struktura nehomogenních prvků pneumatiky.



Obr.8.1. – Orientace a uspořádání výztužných vláken v pneumatice

Struktura nosné kordové vložky

Pro nosné kordové se používá nízkomodulová polymerní matrice do které jsou zakomponovány přírodní i syntetická vlákna či jemný ocelový drát. Nejčastěji se používají polyamidová vlákna, která se vyznačují vysokou pevností, velkou otěruvzdorností a dobrými elastickými vlastnostmi. V současné době se stále více uplatňují aramidová vlákna, jež svou pevností překonávají ocelová vlákna. Mají též nízký modul, nízkou tažnost a vysokou rozměrovou stabilitu.

U osobních automobilů se stále používá ke konstrukci kostrové vložky kordová tkanina. Kord je zpravidla uspořádán do vrstev s množstvím paralelních nití. Počet vrstev tkaniny závisí na konstrukčním řešení pneumatiky. Optimalizací jejich uspořádání se zabývá [12].

Materiál	Značení
Polyester	PES 144x1x2
	PES 167x1x3
Viskóza	VS 184x1x2
	VS S3 184x1x3
Aramid	Aramid 110x1x2

Tab.8.1. – Typické textilní výztužné materiály kostrových vložek [8]

V pneumatice MATADOR 165/65 R13 je tloušťka textilního kordu 0,62 mm, tloušťka pogumovaného kordu činí 0,96mm a úhel uložení kordu je 89°. Na 10cm šíře kordové vrstvy připadá 105 ks vláken. Šířka kostrové vložky je 390 mm. [8]

Struktura překrývacího nárazníku

Vychází z obdobné konstrukce jako kostrový kord a používá se pro osobní vozidla. Nejčastěji se používají polyamidová vlákna a překrývací nárazník tvoří jedna nebo dvě vrstvy, přičemž vlákna jsou uložena ve směru odvalování (úhel 0°).

U řešené pneumatiky MATADOR je tloušťka překrývacího nárazníku vyrobeného z textilního kordu (nylon) 0,33 mm, pogumovaného kordu pak 0,80 mm. Počet kordů na 10cm šíře nárazníku je 120 ks a jeho celková šířka činí 120 mm.

Materiál	Značení
Polyamid 6	PA 6 94x1x2
	PA 6 94x1
Polyamid 66	PA 66 140x1x2

Tab.8.2. – Typické textilní výztužné materiály překrývacích nárazníků [8]

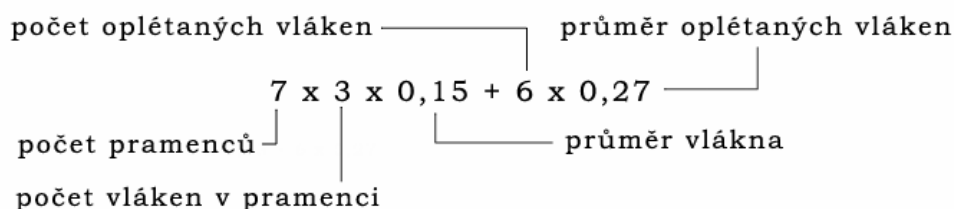
Struktura ocelokordového nárazníku

Vláknová výztuž nárazníku je tvořeny nejčastěji ocelokordem, který se dnes začíná nahrazovat aramidovým kordem. Vlákna jedné nárazníkové vložky se vzájemně kříží

v podélném směru v úhlu $15 \div 20^\circ$ (viz. Obr.8.1.). Uspořádání se podobá uspořádání u kostrových vložek a nárazníkové vložky jsou většinou složeny ze tří typů ocelokordu.

Konstrukce kordu	Průměr kordu [mm]	Nosnost [N]
2 x 0,30 HT	0,60	405
4 x 0,28	0,66	600
3 x 0,15 + 6 x 0,27	0,85	960
7 x 4x 0,22 + 0,15	1,81	2725

Tab.8.3. – Ocelokordy používané v pneumatikách MATADOR [11]



Obr.8.2. – Příklad značení ocelokordu

Struktura patkového lana

Patní lana jsou zhotovena z ocelových drátů s průměrem $0,90 \div 1,80$ mm s pobronzovaným nebo pomosazeným povrchem. Pevností v tahu min.1900 Mpa a celková tažnost se pohybuje mezi $5 \div 9$ % pro délku 100 mm.

Pneumatiky Matador používají patní lano tzv. stříkaného typu s průměrem drátu 0,9 mm. Ocelový drát je pomosazený za účelem dostatečné adheze pryž-kov.

8.2.5. Materiálové charakteristiky

Vzhledem k omezeným možnostem získání materiálových charakteristik odpovídajících materiálům použitých v pneumatice Matador byly tyto údaje převzaty z [4].

Materiálové charakteristiky kompozitních materiálů

V rámci této práce budou kompozitní materiály uvažovány jako lineární elastické materiály a v některých případech nebude uvažována ani jejich ortotropie.

V [4] byly u ocelokordového nárazníku hodnoty poissonových poměrů (PR_{ij}) a modulů pružnosti ve smyku (G_{ij}), kvůli nedostatku vstupních dat, voleny jako totožné pro všechny 3 materiálové směry ortotropního modelu materiálu. Takto zvolené hodnoty, ale nespĺňují podmínku:

$$1,0 - PR_{xy}^2 \cdot \frac{E_y}{E_x} - PR_{yz}^2 \cdot \frac{E_z}{E_y} - PR_{xz}^2 \cdot \frac{E_z}{E_x} - 2,0 \cdot PR_{xy} \cdot PR_{yz} \cdot PR_{xz} \cdot \frac{E_z}{E_x} \geq 0 \quad (3)$$

kteřá je nutnou podmínkou pro spuštění výpočtu v programu ANSYS 11. Pro určení hodnot byly použity následující vztahy:

Ze symetrie matice S_{ij} :

$$\frac{\mu_{12}}{E_1} = \frac{\mu_{21}}{E_2} \Rightarrow \frac{\mu_{12}}{\mu_{21}} = \frac{E_1}{E_2} \quad (4)$$

Předpokládáme, že izotropický Poissonův poměr μ_{iso} odpovídá geometrickému průměru obou ortotropických Poissonových poměrů μ_{12} a μ_{21} :

$$\mu_{iso} = \sqrt{\mu_{12} \cdot \mu_{21}} = \mu_{12} \sqrt{\frac{E_2}{E_1}} \quad (5)$$

Určení Poissonových poměrů:

$$\mu_{12} = \mu_{iso} \sqrt{\frac{E_1}{E_2}} \quad \mu_{13} = \mu_{iso} \sqrt{\frac{E_1}{E_3}} \quad \mu_{23} = \mu_{iso} \sqrt{\frac{E_2}{E_3}} \quad (6)$$

Určení modulů ve stříhu:

$$G_{12} = \frac{E_1 E_2}{E_1 + E_2 + 2\mu_{12} E_2} \quad G_{13} = \frac{E_1 E_3}{E_1 + E_3 + 2\mu_{13} E_3} \quad G_{23} = \frac{E_2 E_3}{E_2 + E_3 + 2\mu_{23} E_3} \quad (7)$$

Oblast pneumatiky	E [MPa] ($E_x/E_y/E_z$)	μ [-] ($PR_{xy}/PR_{yz}/PR_{xz}$)	G [MPa] ($G_{xy}/G_{yz}/G_{xz}$)
Textilní kostrová vložka	90	0,40	-
Patkové lanko	110 000	0,30	-
Ocelokordový nárazník	460 / 2300 / 5750	0,18 / 0,25 / 0,11	295 / 1211 / 354

Tab.8.4. – Vstupní materiálové údaje

Hodnoty uvedené v *Tab.8.4.* byly získány z dostupné literatury a odpovídají typickým materiálům používaných v pneumatikách. Ve výpočtu byly použity pro úvodní výpočty a dále též k doplňujícím srovnávacím výpočtům. Hodnoty uvedené v *Tab.8.5.* byly získány na základě statických tahových a tlakových, případně ohybových zkoušek provedených na vzorcích kompozitů na stroji ZWICK na ÚMT VUT v Brně.

Oblast pneumatiky	E [MPa]			PR [-]			G [MPa]		
	Ex	Ey	Ez	PRxy	PRyz	PRxy	Gxy	Gyz	Gxz
Textilní kostrová vložka	1,4	725,0	8,0	0,030	0,460	0,150	10,55	62,67	4,75
Překrývací nárazník	1,2	8,0	725,0	0,150	0,005	0,030	0,83	7,84	9,04
Ocelokordový nárazník	4,7	60,0	550,0	0,200	0,030	0,006	3,18	51,32	4,61

Tab.8.5. – Materiálové údaje získané pomocí statických zkoušek

Mechanické vlastnosti elastomerů

Pro počáteční výpočty byly v rámci této práce elastomery uvažovány jako lineární elastické izotropní materiály (viz. *tab.8.6.*).

Oblast pneumatiky	E [MPa]	PR [-]
Běhoun, patková guma a boční klínek	14	0,49
Vnitřní guma,bočnice	5,5	0,49
Jádro	21	0,49

Tab.8.6. - Vstupní materiálové údaje

V ostatních případech byly elastomery modelovány již jako hyperelastické nelineární materiály pomocí 2-parametrického Mooney-Rivlinova konstitutivního modelu, podrobněji popsaného v kapitole 8.3.1. Vlastnosti hyperelastického materiálu byly zadány přímo elastickými parametry C_{10} , C_{01} a d (viz.*tab.8.7.*).

Oblast pneumatiky	C_{10} [MPa]	C_{01} [MPa]	d [1/MPa]
Běhoun	0,417	0,519	0,103
Vnitřní guma	0,109	0,259	0,267
Patková guma	0,692	0,371	0,877
Bočnice, boční klínek	0,532	0,065	0,151
Jádro	0,638	0,284	0,101

Tab.8.7. – Materiálové údaje pro hyperelastický model materiálu

Měrné hmotnosti

Pro výpočty zahrnující vliv odstředivých sil je potřeba znát měrné hmotnosti jednotlivých materiálů, ty udává Tab.8.8.

Oblast pneumatiky	Měrná hmotnost ρ [kg/m ³]
Ocelokordový nárazník	4000
Kostrová vložka a překrývací nárazník	1600
Patkové lano	7850
Elastomery	1250

Tab.8.8. – Měrné hmotnosti použité v úloze simulující vliv odstředivých sil

8.3. Vstupní údaje o vazbách

Při řešení problému je možné použít symetrie. Rovina symetrie je u plošné axisymetrické úlohy tvořena rovinou kola (*obr.8.1.*)

V místě styku patky pláště s diskem kola nedochází při působení tlakového media k relativním posuvům. Vazba bude podrobněji popsána dále.

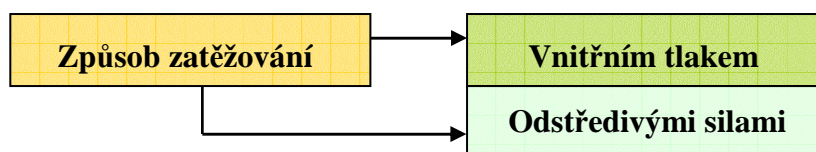
8.4. Vstupní údaje o zatížení

Při výpočtovém modelování lze uvažovat tři základní způsoby silového působení na pneumatiku:

- Pneumatika je zatěžována rotačně symetrickým zatížením, jako je tlak huštění a objemové síly při rotaci

- Pneumatika je vertikálně zatěžována
- Pneumatika se odvaluje a je deformována současným působením vertikálního, bočního a torzního zatížení

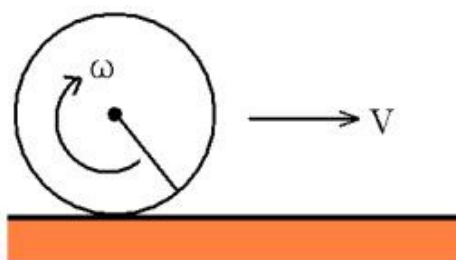
Tato práce se bude zabývat pouze prvním způsobem silového působení na pneumatiku (obr.8.3.). Z toho vyplývá možnost řešit úlohu pomocí axisymetrického plošného modelu.



Obr.8.3. – Řešené způsoby zatěžování pneumatiky

Úloha simulující nafukování pláště – Plášť je zatěžován vnitřním tlakem od tlakového média. U řešené pneumatiky Matador je za provozní tlak považována hodnota 180kPa. Pro posouzení vlivu hodnoty vnitřního tlaku bude v některých případech uvažováno *podhuštění* (140kPa) či *přehuštění* pláště (220kPa).

Úloha simulující vliv odstředivých sil – Zde je úloha rozšířena o vliv odstředivých sil vznikajících při rotaci pláště. Jedná se tedy o teoretickou situaci, kdy plášť nahuštěný na určitý tlak (dále jinak nezatížený) se otáčí určitou úhlovou rychlostí (obr.8.4.).



Obr.8.4. – Schématické znázornění působení úhlové rychlosti ω

Pro úhlovou rychlost platí :

$$\omega = \frac{v}{r} \quad (8)$$

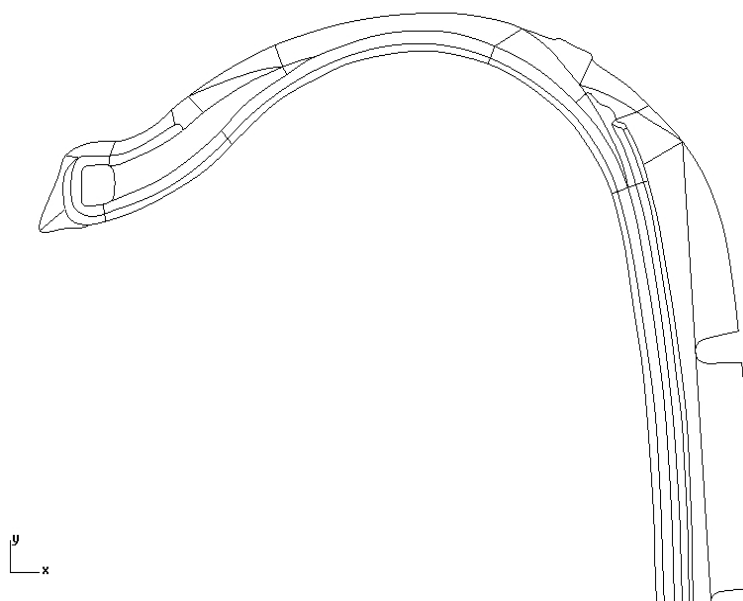
Výrobce udává u modelované pneumatiky Matador 165/65 R13 rychlostní index (SI) T. Maximální rychlost vozidla je tedy s tímto typem pneumatiky omezena na 190 km/h. Při průměru nového pláště 544mm to odpovídá úhlové rychlosti přibližně $194,04 \text{ s}^{-1}$.

9. VLASTNÍ PROCES ŘEŠENÍ PROBLÉMU

9.1. Model geometrie

Model geometrie pneumatiky se skládá z 10 částí, které se liší použitým materiálem. Tyto části byly dále účelově rozděleny do podoblastí kvůli snadnější tvorbě konečnoprvkové sítě a dále možnosti zahrnutí ortotropie kostrové vložky u *modelu 3*.

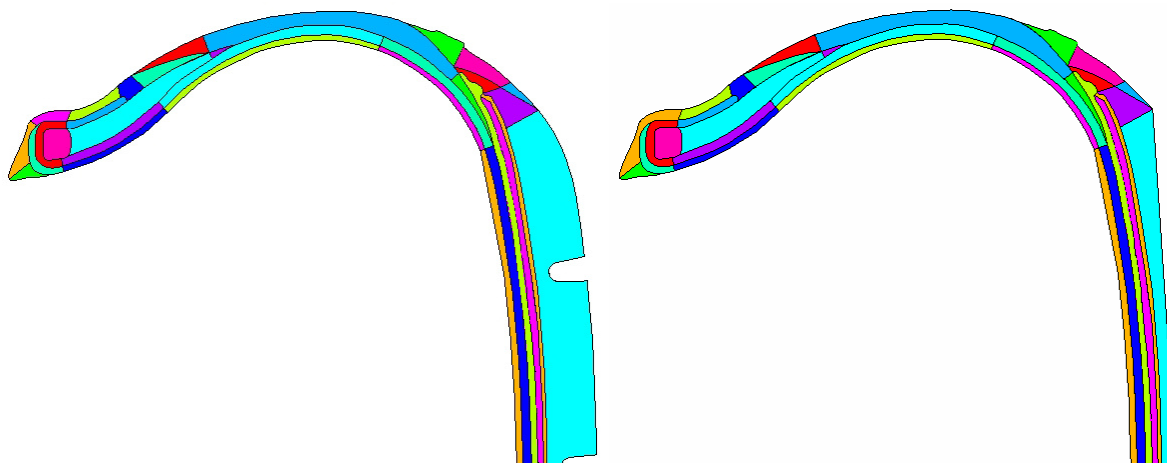
Z původní poskytnuté geometrie ve formátu IGES byly převzaty základní rozměry a tvary s využitím řídicích bodů křivek. Jednotlivé křivky byly tvarově navázány pomocí funkce *navázání křivek*, tak aby byl průběh jejich koncových částí tečný k předchozí křivce.



Obr.9.1. – výsledný model geometrie tvořený křivkami

Výsledná geometrie tvořená křivkami byla importována pomocí formátu IGES do programu ANSYS, kde byly vytvořeny plochy jednotlivých oblastí (příkaz *AL*). Byly vytvořeny dva modely lišící se tvarem běhounové vrstvy pláště. První verze s „plným“ běhounem představuje novou pneumatiku, druhá se „seříznutým“ běhounem, vytvořená pro jednu ze srovnávacích úloh, představuje pneumatiku po dlouhé době používání.

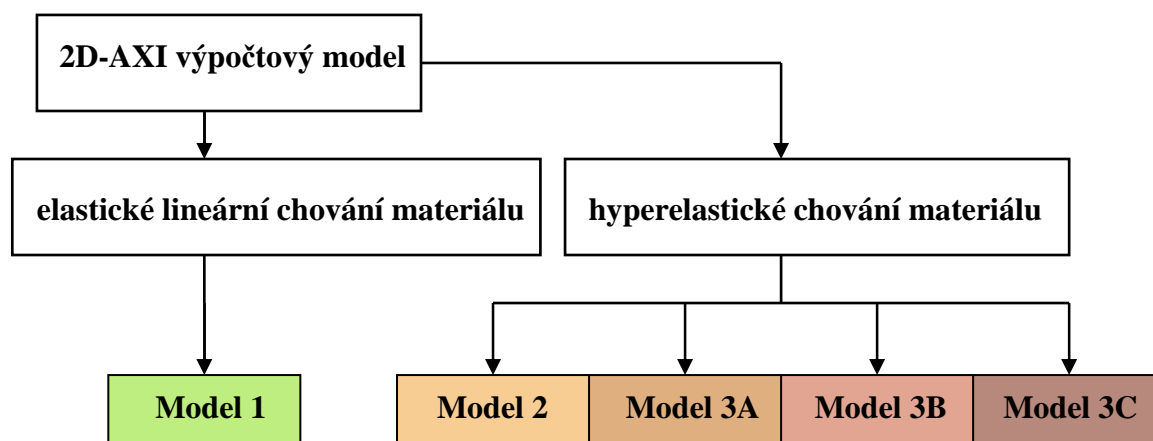
Vzhledem k řešení úlohy pomocí osové symetrie bylo důležité, aby osa rotace pneumatiky byla shodná s *osou y* hlavního souřadného systému programu ANSYS.



Obr.9.2. – zobrazení ploch modelu geometrie s „plným“ a „seříznutým“ běhounem

9.2. Model materiálu

Při modelování pláště pneumatiky bylo použito několik úrovní modelování vlastností materiálu (*modely 1,2,3A*), pro srovnání vlivu materiálových charakteristik byly vytvořeny modely *3B* a *3C*. Podrobný popis jednotlivých společných a rozdílných prvků modelů je důležitý pro pochopení jejich chování.



Obr.9.3. – Schéma rozdělení jednotlivých modelů dle použitého modelu chování elastomeru

Model 1

Tento model zahrnuje nejvíce zjednodušujících předpokladů. Všechny materiály jsou uvažovány jako **izotropní lineárně elastické** s výjimkou překrývacího a ocelokordového nárazníku, ty jsou modelovány pomocí **lineárně elastického ortotropního** chování materiálu. Uva-

žovány jsou stejné vlastnosti obou těchto prvků (viz. *Tab.8.4.*). Materiálové charakteristiky elastomerů viz. *Tab.8.6.*

Shrnutí:	Elastomery	Lineárně elastické izotropní chování materiálu
	Překrývací nárazník	Lineárně elastické ortotropní chování materiálu
	Ocelokordový nárazník	Lineárně elastické ortotropní chování materiálu
	Kostrová vložka	Lineárně elastické izotropní chování materiálu
	Patkové lanko	Lineárně elastické izotropní chování materiálu

Model 2

Všechny druhy elastomerů využívají u tohoto modelu **dvouparametrický Money-Rivlinový** hyperelastický konstitutivní model (viz. *Tab.8.7.*), který by měl být pro očekávaný rozsah deformací postačující. Není zde, ale dodržena ortotropie kostrové vložky, ta je zde stále uvažována jako **izotropní lineární** materiál (viz. *Tab.8.4.*). Tento model dále již využívá materiálové charakteristiky zjištěné pomocí experimentálních zkoušek vzorků jednotlivých částí pneumatiky (viz. *Tab.8.5.*).

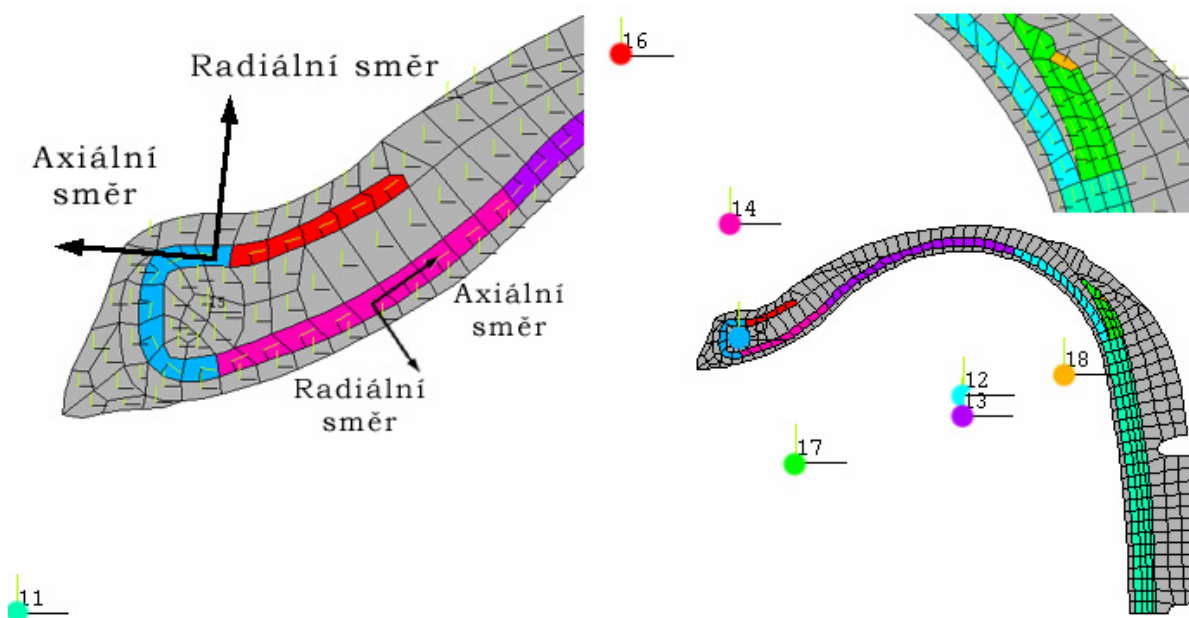
Shrnutí:	Elastomery	Hyperelastické izotropní chování materiálu
	Překrývací nárazník	Lineárně elastické ortotropní chování materiálu
	Ocelokordový nárazník	Lineárně elastické ortotropní chování materiálu
	Kostrová vložka	Lineárně elastické izotropní chování materiálu
	Patkové lanko	Lineárně elastické izotropní chování materiálu

Model 3A

Oproti předchozímu (*model 2*), již tento model plně respektuje výraznou **ortotropii kostrové vložky** a také upravuje orientaci hlavních materiálových směrů u ocelokordových nárazníků. Dodržení jednotlivých hlavních směrů ortotropních materiálů nebylo snadné. Dosaženo toho bylo vytvořením sedmi vhodně umístěných polárních souřadných systémů, které respektují hlavní materiálové osy kostrové vložky a ocelokordových nárazníků (viz. *obr.9.4.*).

Shrnutí:	Elastomery	Hyperelastické izotropní chování materiálu
	Překrývací nárazník	Lineárně elastické ortotropní chování materiálu

Ocelokordový nárazník	Lineárně elastické ortotropní chování materiálu
Kostrová vložka	Lineárně elastické ortotropní chování materiálu
Patkové lanko	Lineárně elastické izotropní chování materiálu



Obr.9.4. – Rozmístění pomocných cylindrických souřadných systémů a směry materiálových parametrů jednotlivých elementů kompozitních prvků pláště

Model 3B

Tento model je svými materiálovými charakteristikami shodný s *modelem 3A* a slouží pouze pro porovnání vlivu tloušťky běhounové vrstvy na celkové deformační vlastnosti pneumatiky.

Shrnutí: viz. *model3A*

Model 3C

Další z modelů sloužících pro porovnání změny vlastností materiálů na celkovou deformačně napěťovou charakteristiku pneumatiky. Základem je *model 3A* u kterého byly změněny hodnoty hlavních materiálových konstant (E_i , PR_{ij} , G_{ij}) ocelokordového nárazníku viz. *Tab.8.4*. Tak aby bylo dosaženo větší ohybové tuhosti tohoto prvku.

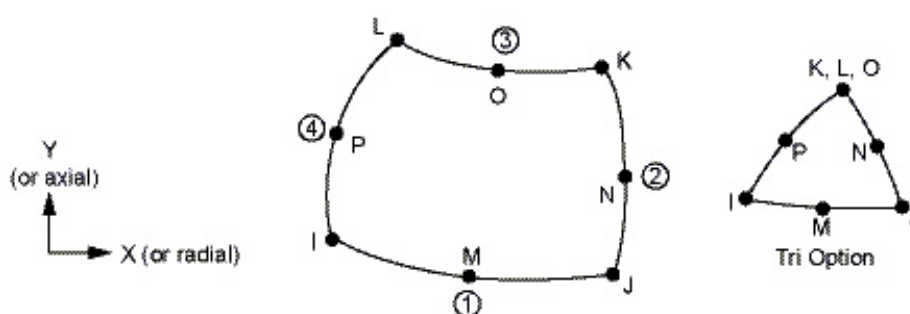
Shrnutí: viz. *model3A*

9.3. Konečnoprvkový model

9.3.1. Popis použitých prvků

PLANE183 – Tento kvadratický prvek je vhodný pro modelování plně nestlačitelných hyperelastických materiálů a také je vhodný pro generování sítě nepravidelných modelů. Je definován osmi uzly a dvěma stupni volnosti – UX, UY.

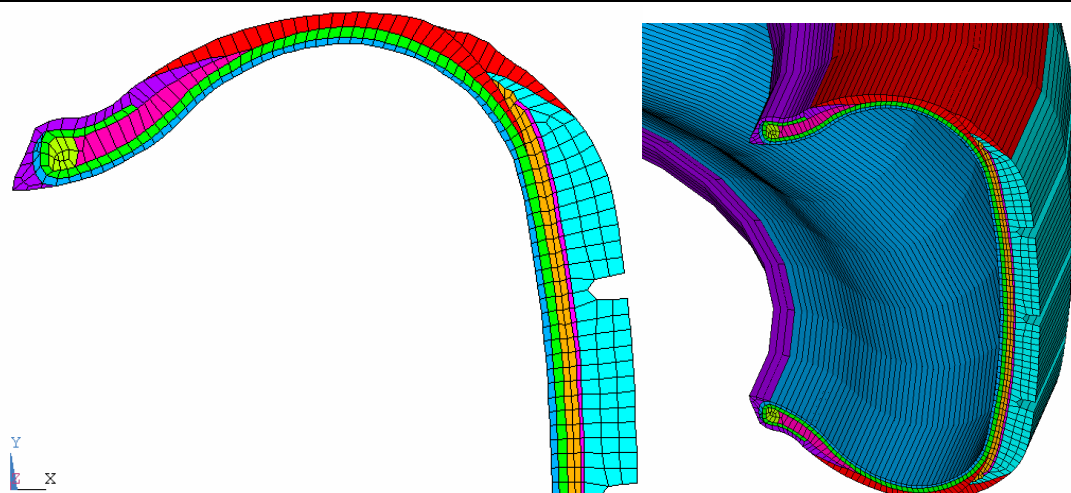
Pro řešení 2D-axisymetrické úlohy je nutno nastavit chování prvku (Element Behavior) na *Axisymmetric*.



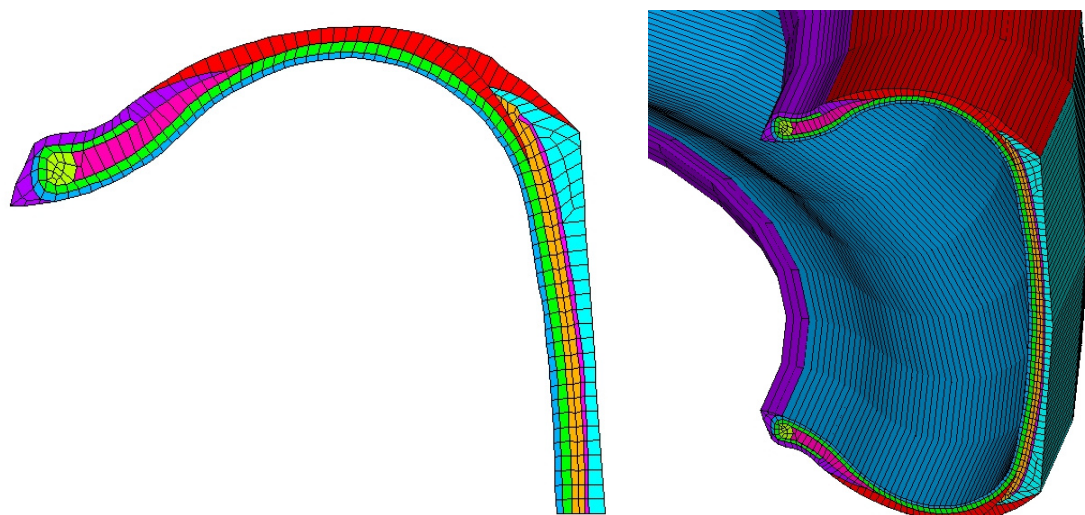
Obr.9.5. – Prvek PLANE183

9.3.2. Konečnoprvková síť modelu

Vzhledem k tvarové složitosti jednotlivých částí pláště pneumatiky nebylo možné použít přímo rovnoměrně generované (mapované) síť. Síť byla za použití prvku PLANE183 nejprve vytvořena jako automaticky generovaná (Free Mesh) s globální velikostí prvku na křivkách 2,5mm. Poté bylo postupně upravováno dělení jednotlivých křivek, tak aby vznikla co nejvíce rovnoměrná konečnoprvková síť. Výsledný počet prvků je 446. Síť je bez degenerovaných prvků (Warnings Elements), tedy prvků jejichž geometrie nespĺňuje tvarové tolerance.



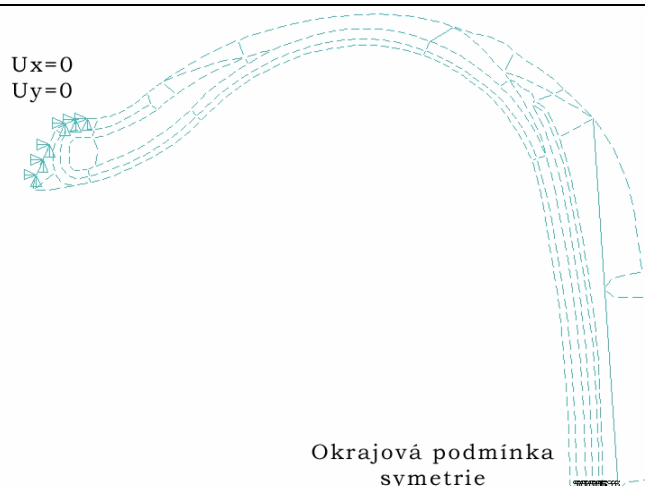
Obr.9.6. - Síť pneumatiky s „plným“ běhounem (vpravo zobrazení axisymetrie)



Obr.9.7. - Síť pneumatiky se „seříznutým“ běhounem (vpravo zobrazení axisymetrie)

9.4. Model vazeb

Jak bylo zmíněno v *kap. 8.* bude, kromě okrajové podmínky symetrie v rovině pneumatiky, zamezeno radiálním (U_x) i axiálním (U_y) posuvům v místě styku patkové gumy a ráfku disku kola (viz. *obr.9.3*). To z pohledu úrovně řešeného problému odpovídá reálným podmínkám.

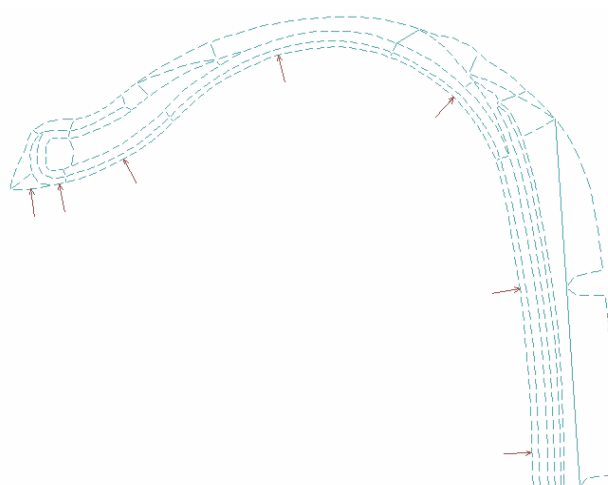


Obr.9.8. – použitý model vazeb

Vazba mezi jednotlivými prvky pláště pneumatiky byla realizována pomocí společně konečnoprvkové sítě a následným „svázáním“ uzlů (*Merge Items*).

9.5. Model zatížení

Při simulování nafukování pláště je model zatížen na vnitřní straně provozním tlakem 180kPa (pro srovnávací úlohy bylo uvažováno přehuštění pláště tlakem 220kPa). V úlohách simulujících vliv odstředivých sil je navíc aplikována úhlová rychlost (Angular velocity – Ω). V kapitole 8.4. byla uvedena jako mezní hodnota $\omega=194,04 \text{ s}^{-1}$. Při výpočtu, ale bude uvažována jako mezní hodnota $\omega=204,25 \text{ s}^{-1}$ (odpovídá 200km/h), důvodem je snadnější „krokování“ výpočtu a následné vyhodnocení. Dále je nutné zadat měrné hmotnosti jednotlivých materiálů viz. *Tab.8.8*.



Obr.9.9. – Zatížení pneumatiky vnitřním tlakem

9.6. Nastavení řešiče vypočtového modelu

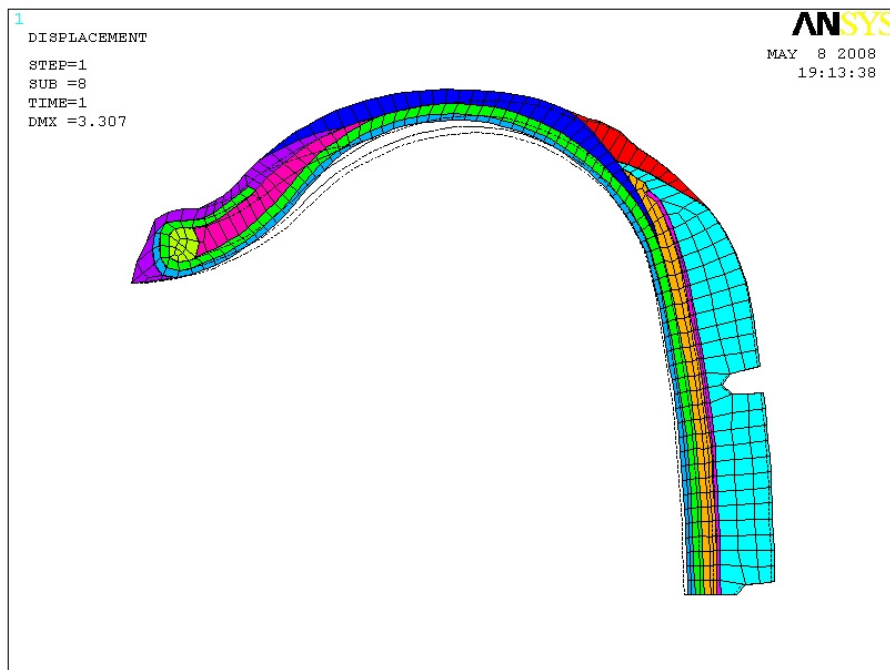
Pro efektivní řešení je třeba vhodně zvolit typ a nastavení řešiče. Pro všechny výpočty byl zvolen iterační řešič *The Preconditioned Conjugate Gradient* (PCG). Vzhledem k tomu že je úloha nelineární je potřeba vhodně nastavit počet substepů (NSUBST) a toleranci řešiče PCG (EQSLV). Z důvodu vyhodnocování výsledků se budou zapisovat všechna data každého substepu.

Nastavení řešiče: NLGEOM,1
NSUBST,20,30,10
OUTRES,ALL,ALL
EQSLV,PCG,1e-6

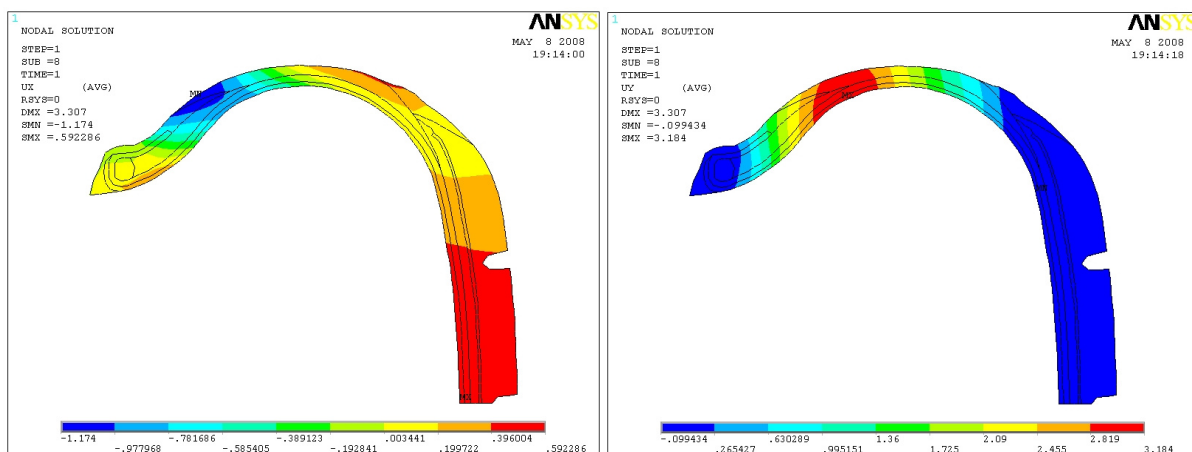
10. PREZENTACE VÝSLEDKŮ

10.1. Model s využitím izotropních elastických lineárních modelů chování materiálu

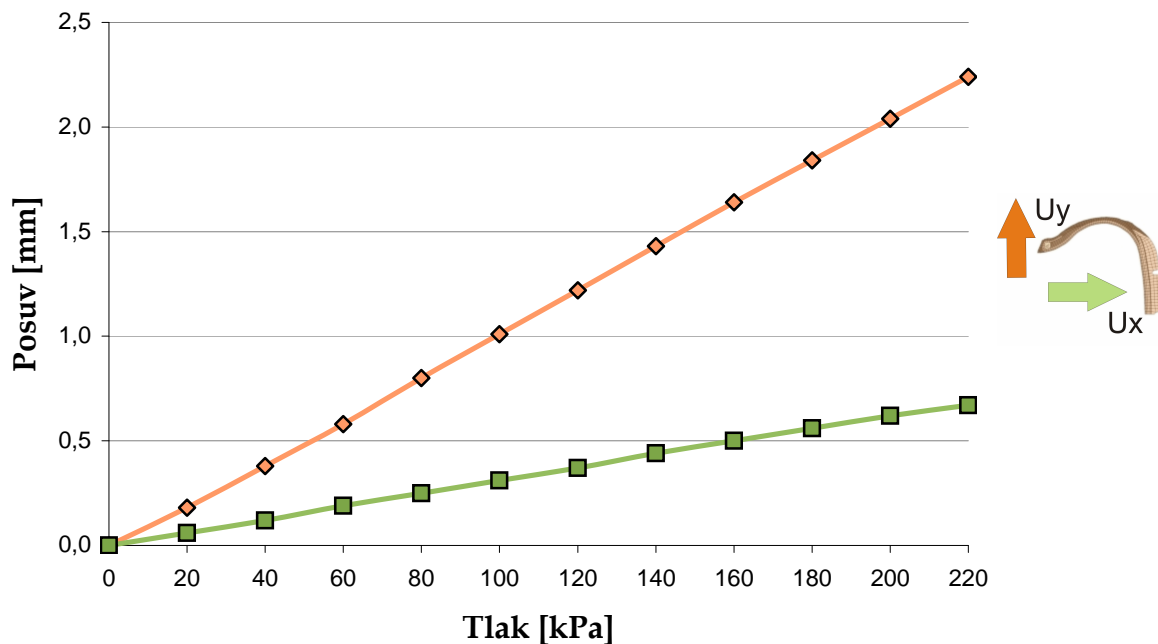
10.1.1. Rotačně symetrická úloha simulující nafukování pláště (*model 1*)



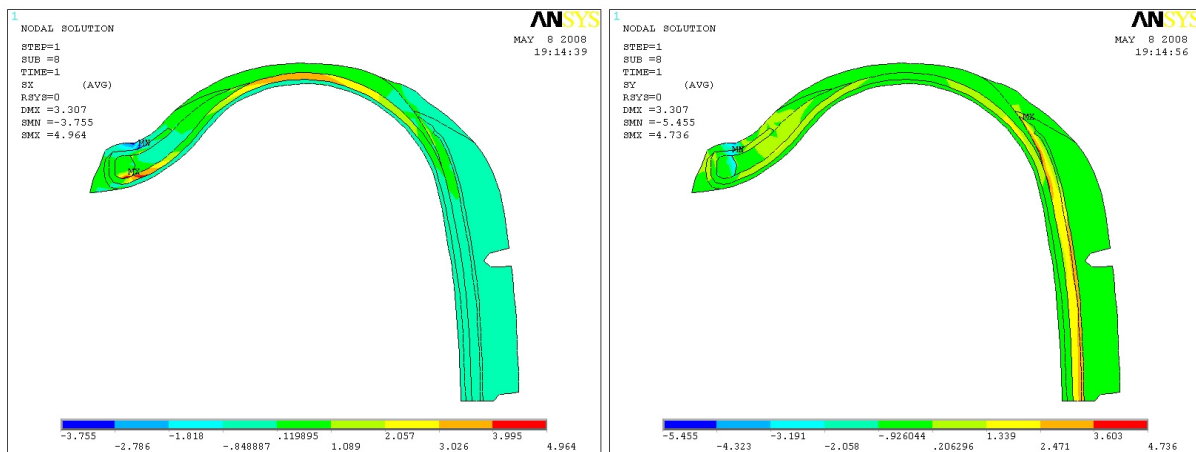
Obr. 10.1.– Deformace Modelu 1 při zatížení provozním tlakem 180kPa



Obr.10.2. – Posuvy Modelu 1 v radiálním směru (vlevo) a axiálním směru (vpravo) při zatížení provozním tlakem 180kPa

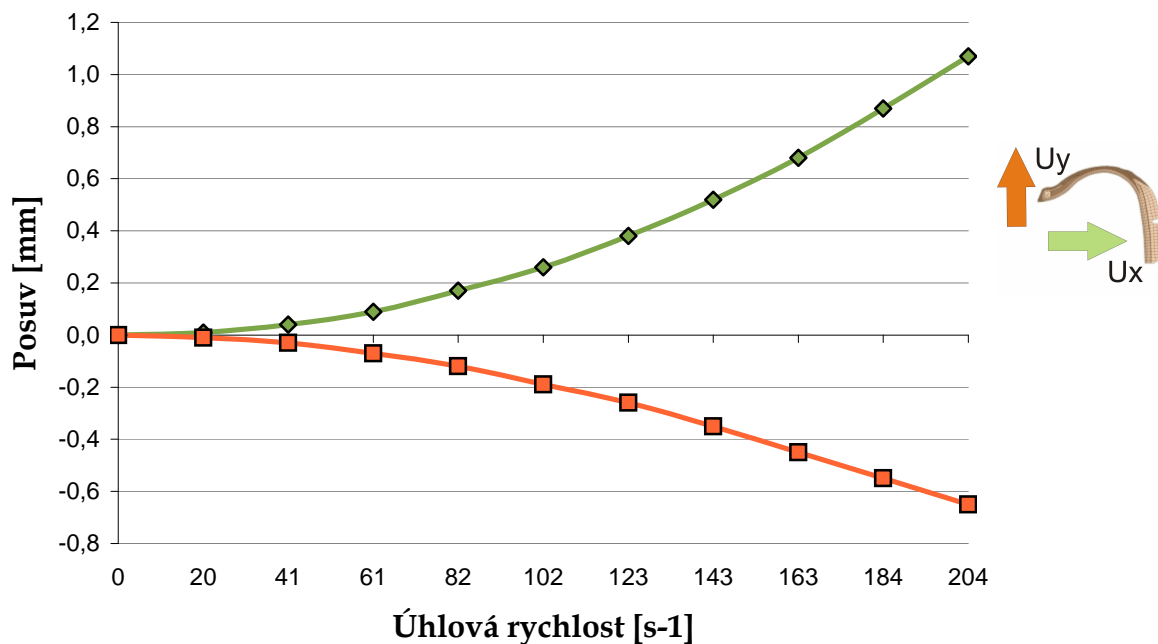


Graf 10.1. Závislost posuvu měřeného místa na vnitřním tlaku (*Model 1*)

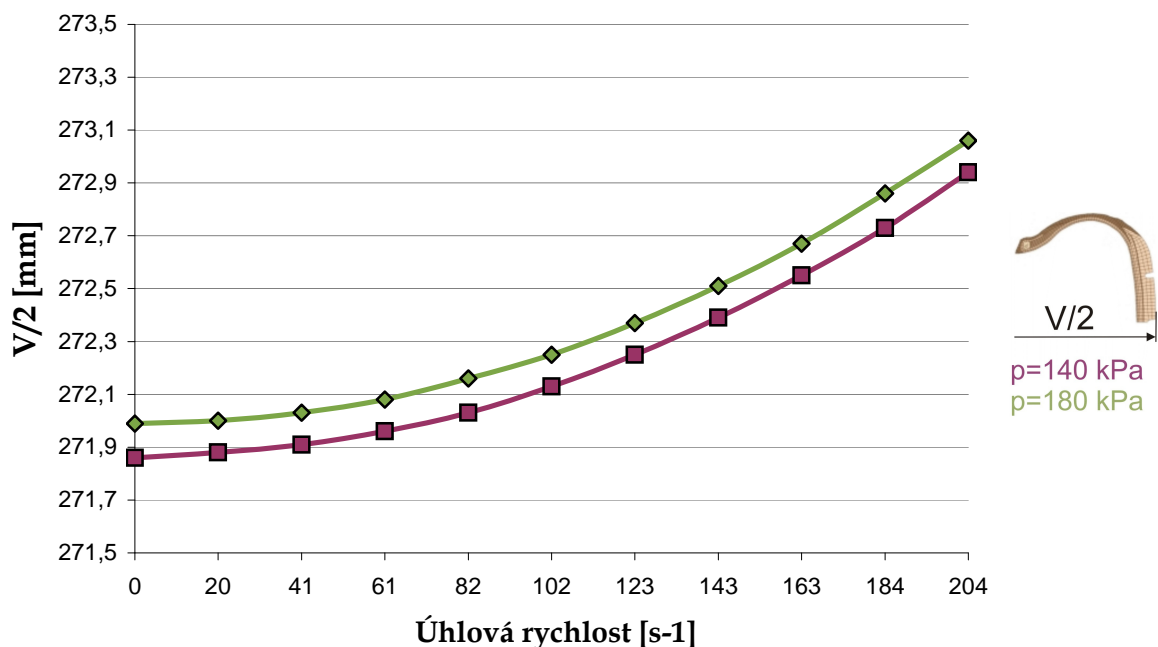


Obr.10.3. – Napětí v *Modelu 1* v radiálním (vlevo) a axiálním směru (vpravo) při zatížení provozním tlakem 180kPa

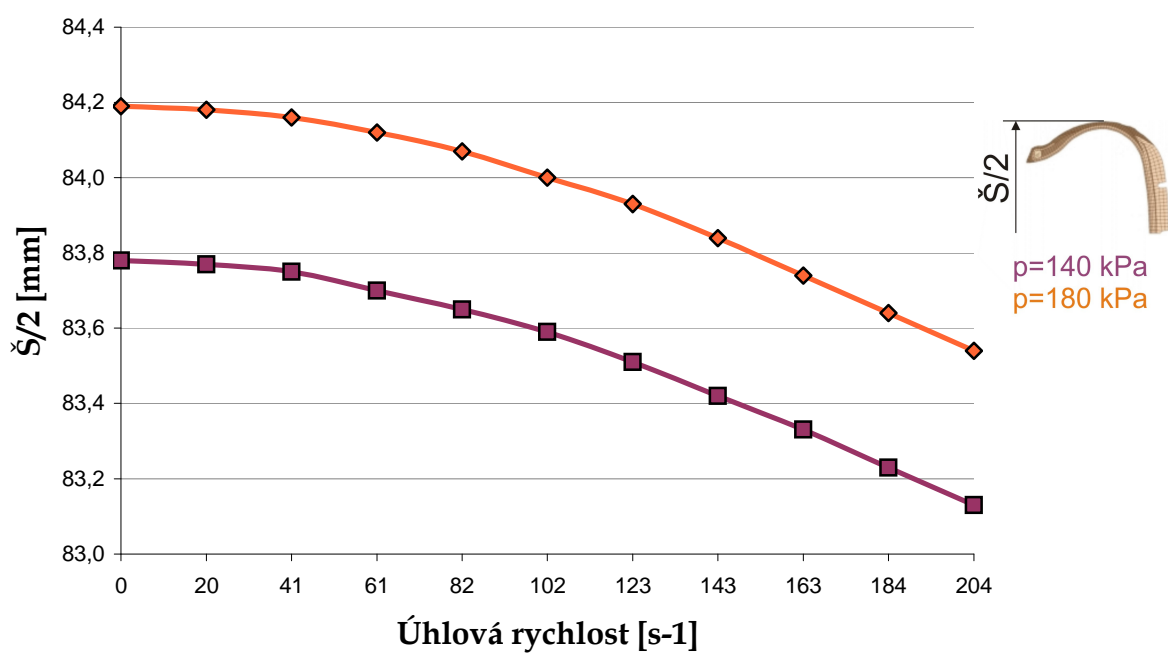
10.1.2. Rotačně symetrická úloha simulující vliv odstředivých sil (*model 1*)



Graf 10.2. - Závislost posuvu měřeného na úhlové rychlosti (*Model 1*)



Graf 10.3. - Závislost poloviny výšky pláště ($V/2$) na úhlové rychlosti (*Model 1*)

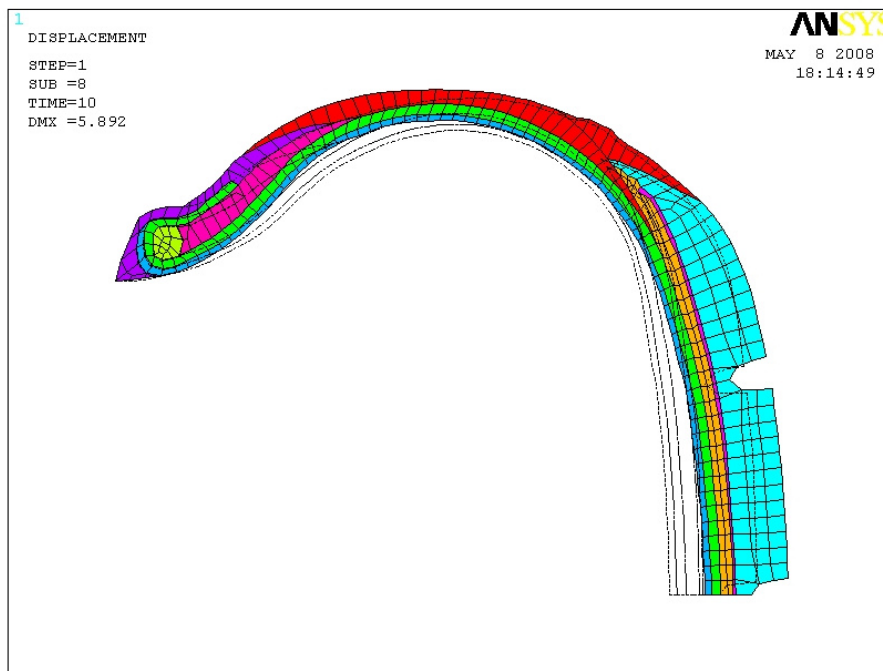


Graf 10.4. - Závislost poloviny šířky pláště ($\check{S}/2$) na úhlové rychlosti (*Model 1*)

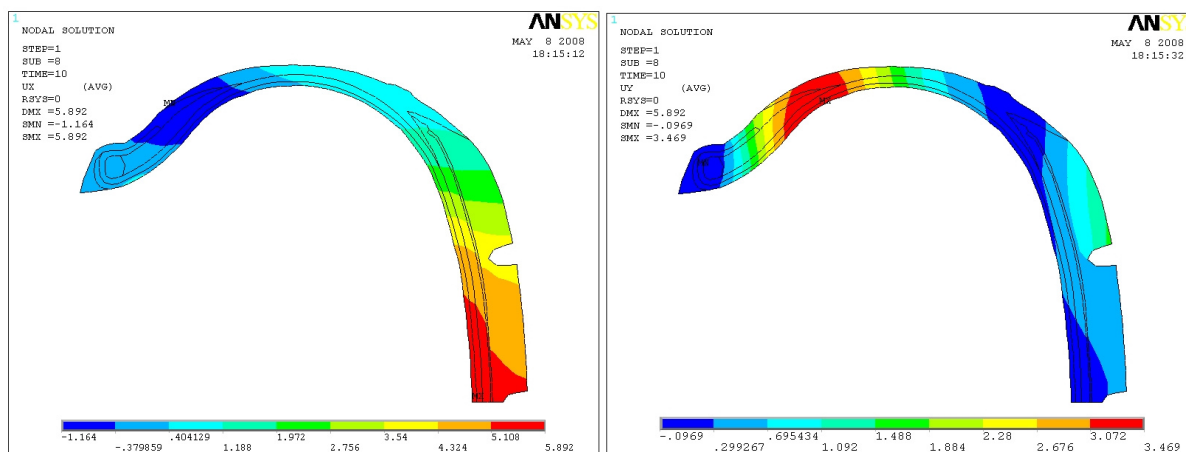
10.2. Modely s využitím hyperelastických modelů chování materiálu

10.2.1. Rotačně symetrická úloha simulující nafukování pláště

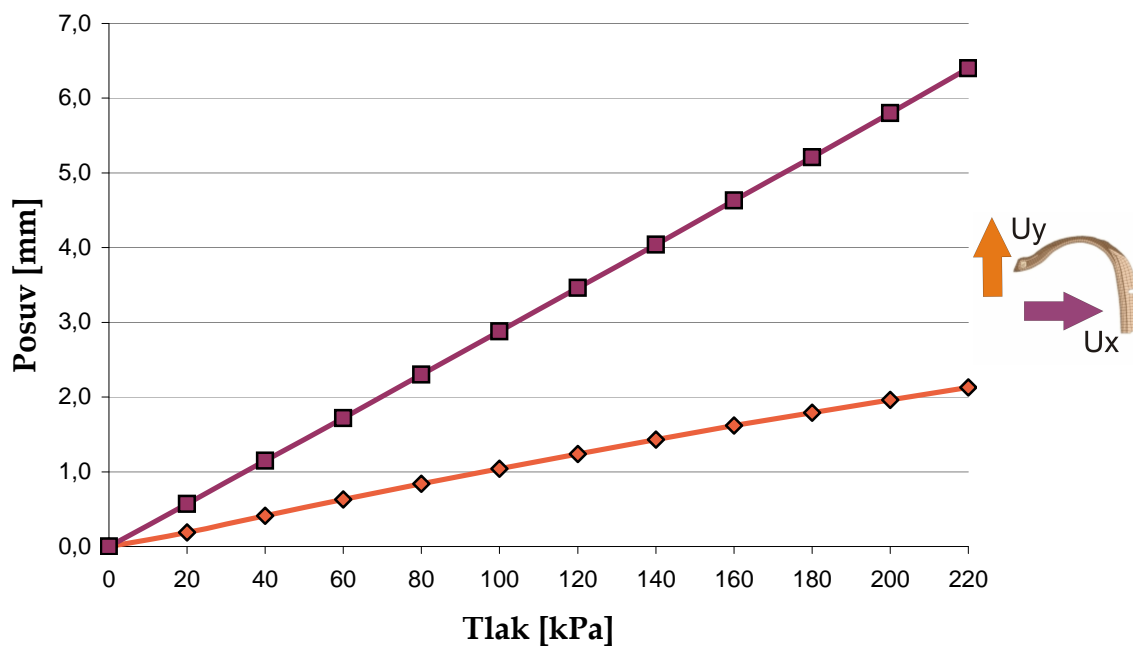
Model 2A



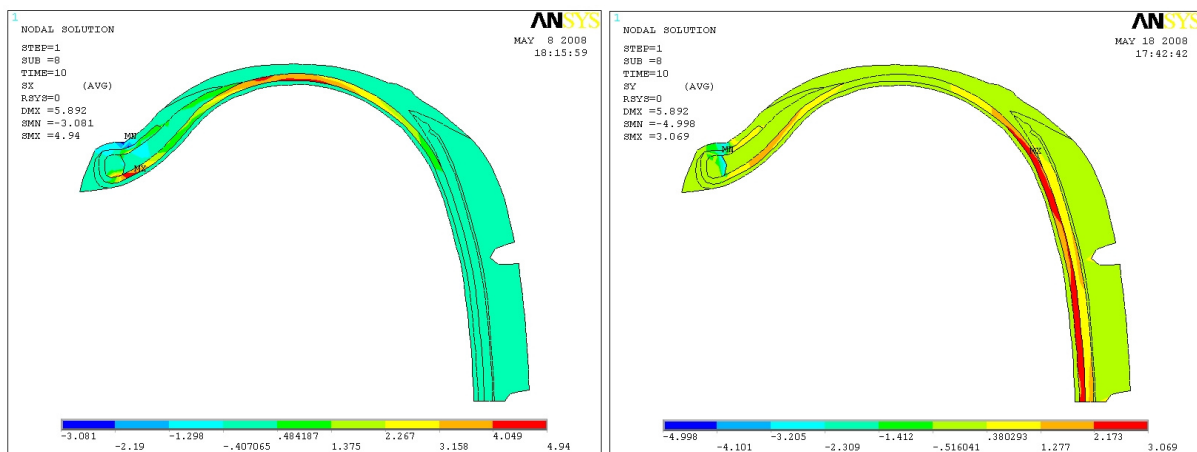
Obr.10.4. – Deformace Modelu 2 při zatížení provozním tlakem 180kPa



Obr.10.5. – Posuv Modelu 2 v radiálním směru (vlevo) a axiálním směru (vpravo) při zatížení provozním tlakem 180kPa

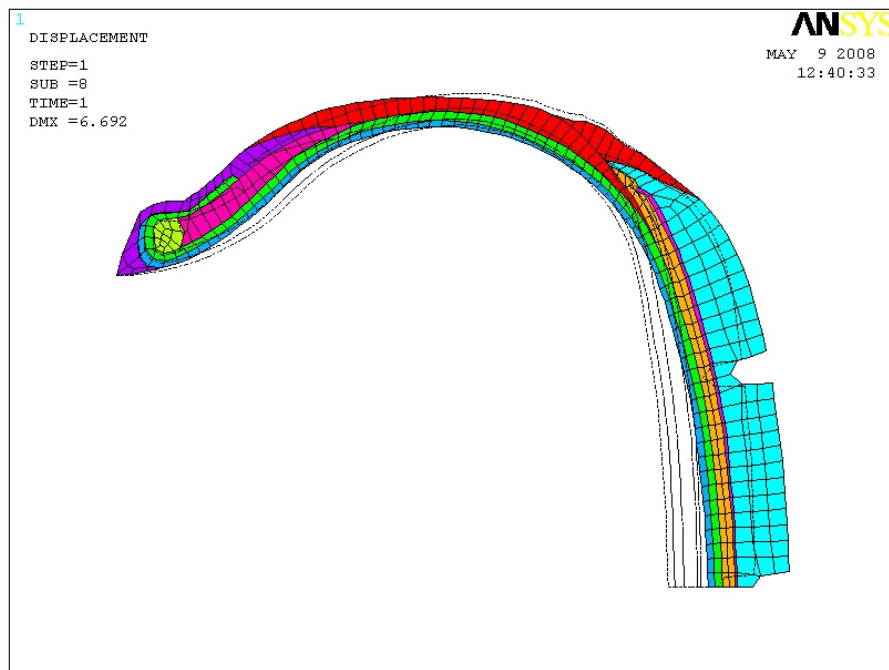


Graf 10.5. závislost posuvu měřeného místa na vnitřním tlaku (Model 2)

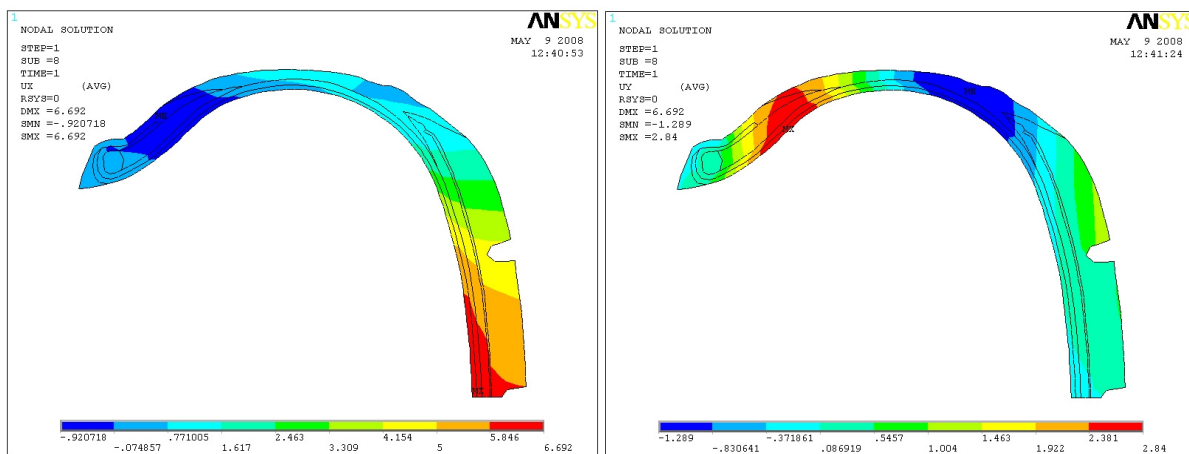


Obr.10.6. – Napětí v Modelu 2 v radiálním (vlevo) a axiálním směru (vpravo) při zatížení provozním tlakem 180kPa

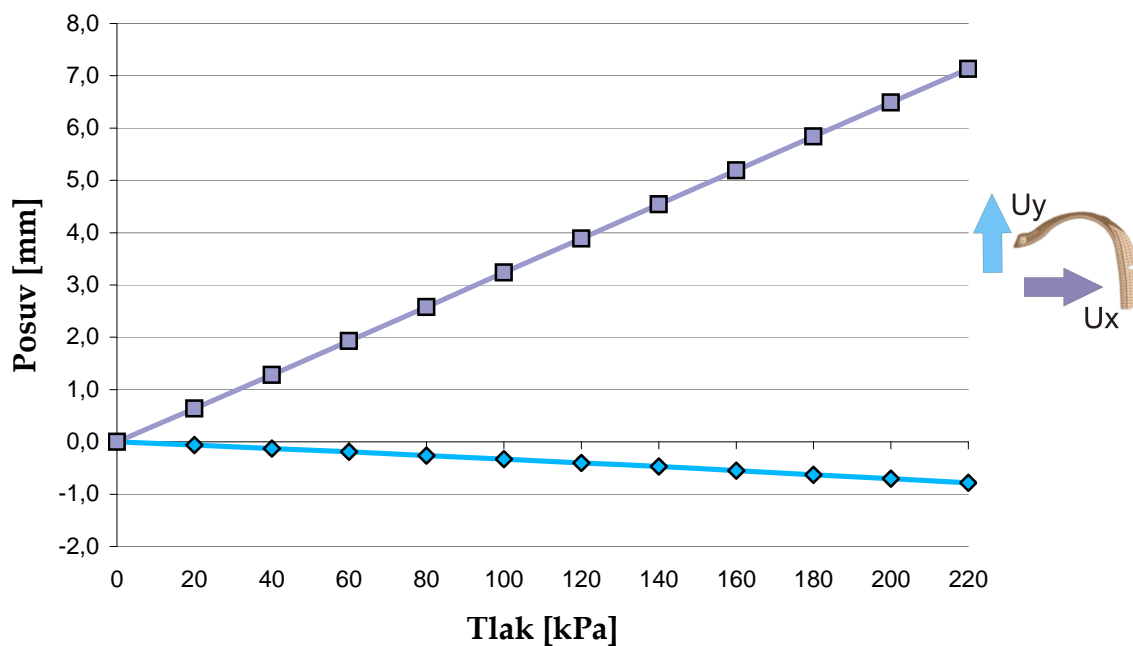
Model 3A



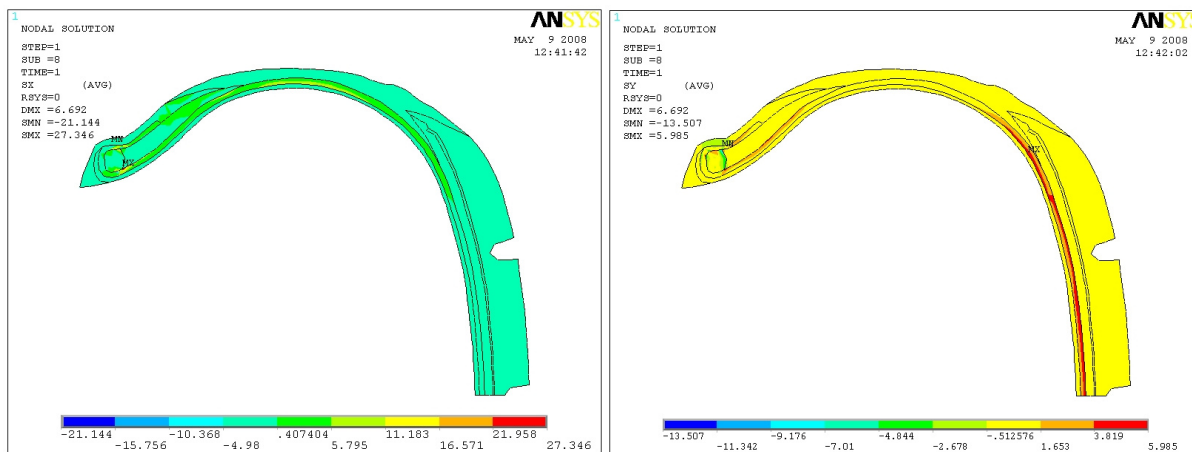
Obr.10.7. – Deformace Modelu 3A při zatížení provozním tlakem 180kPa



Obr.10.8. – Posuv Modelu 3A v radiálním směru (vlevo) a axiálním směru (vpravo) při zatížení provozním tlakem 180kPa



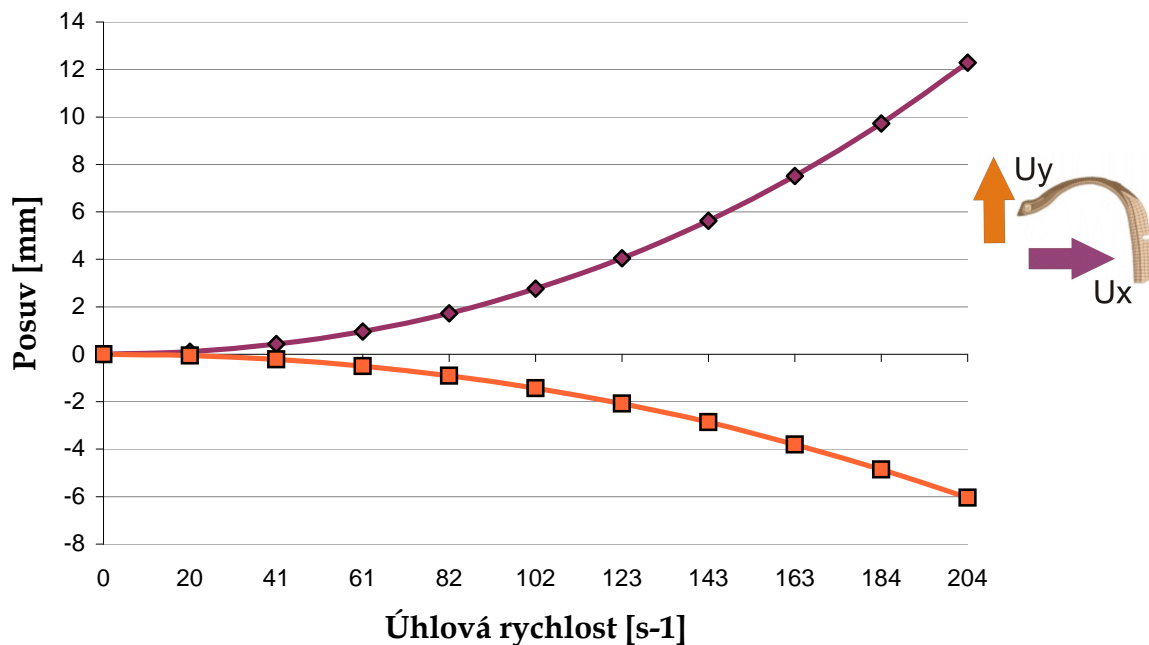
Graf 10.6. - Závislost posuvu měřeného místa na vnitřním tlaku (*Model 3A*)



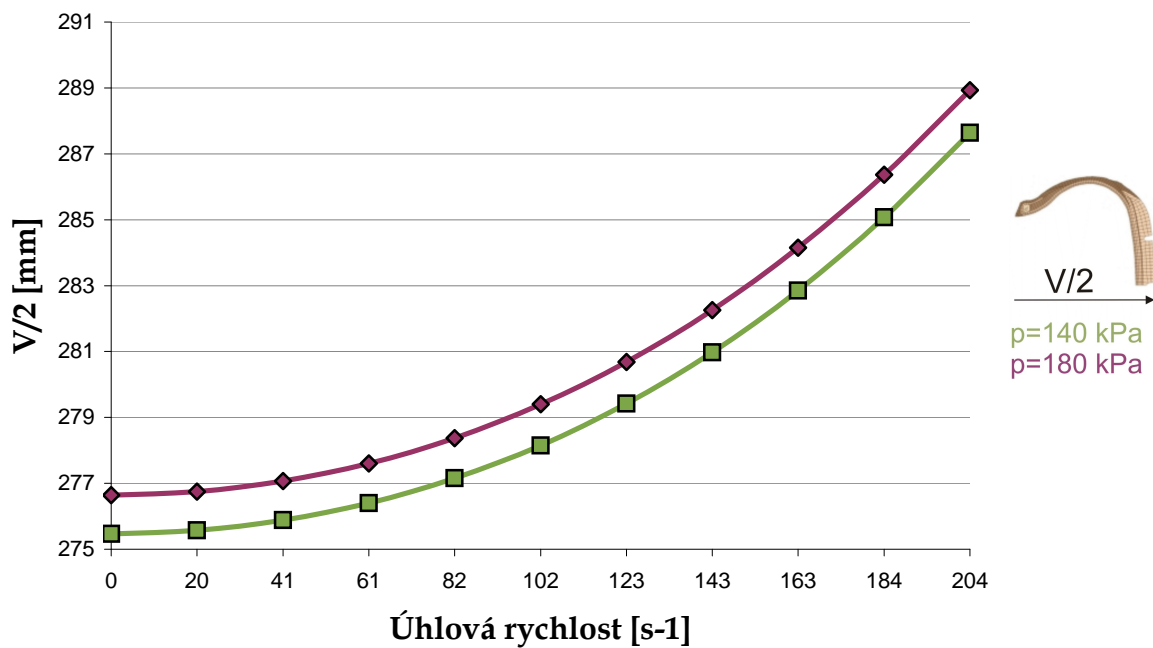
Obr.10.9. – Napětí v *Modelu 3* v radiálním (vlevo) a axiálním směru (vpravo) při zatížení provozním tlakem 180kPa

10.2.2. Rotačně symetrická úloha simulující vliv odstředivých sil

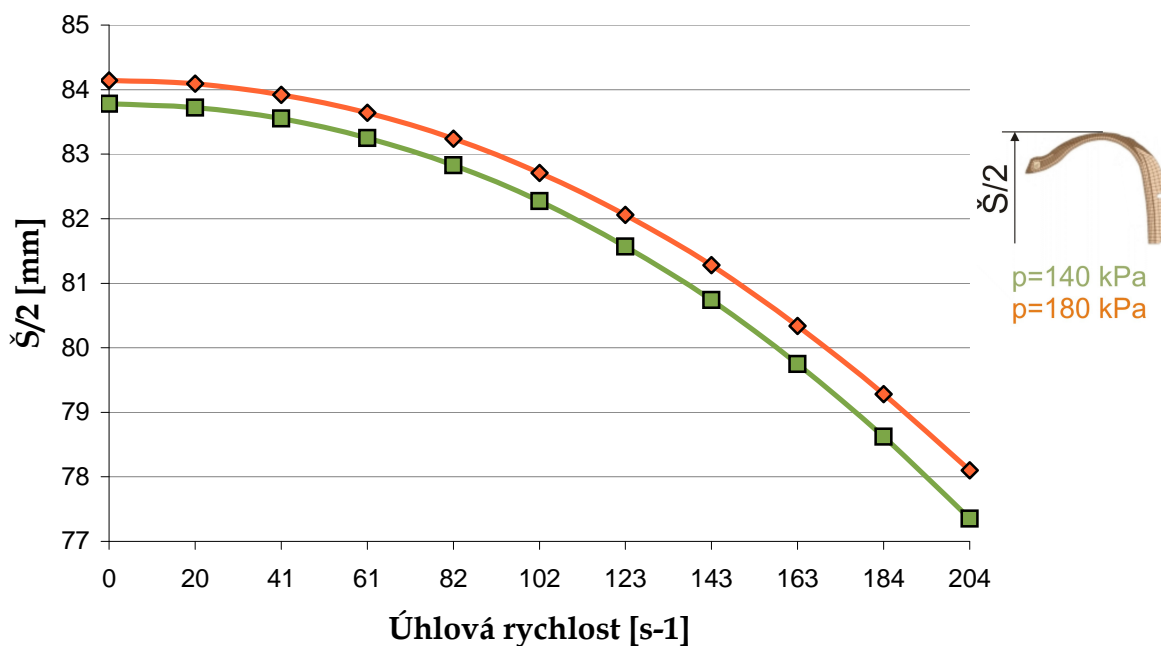
Model 2



Graf 10.7. - Závislost posuvu měřeného na úhlové rychlosti (Model 2)

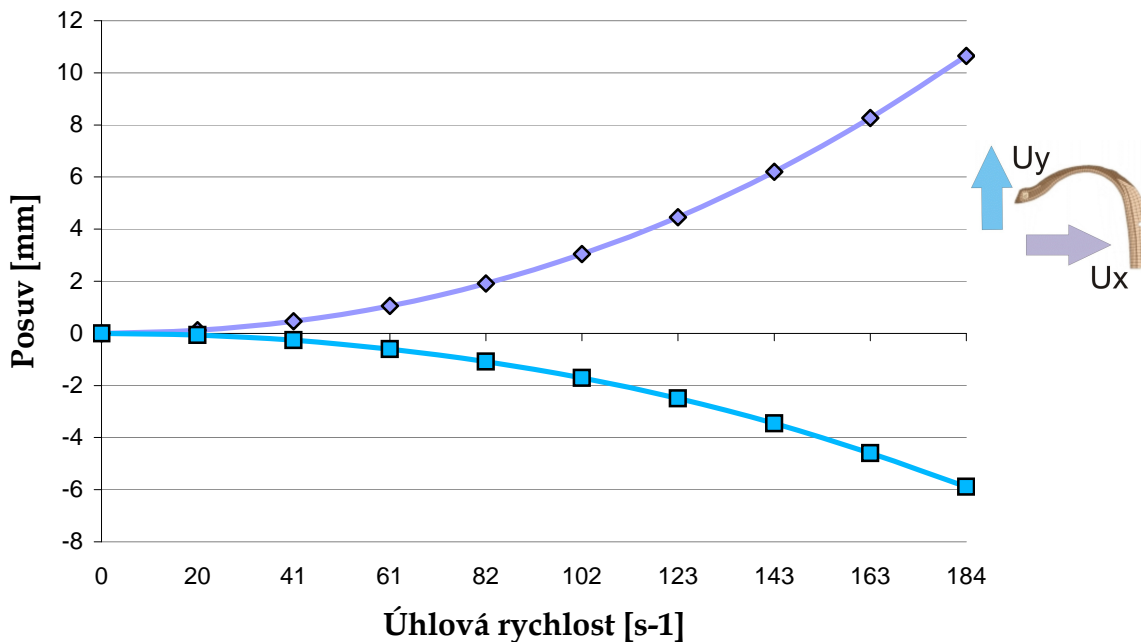


Graf 10.8. - Závislost poloviny výšky pláště (V/2) na úhlové rychlosti (Model 2)

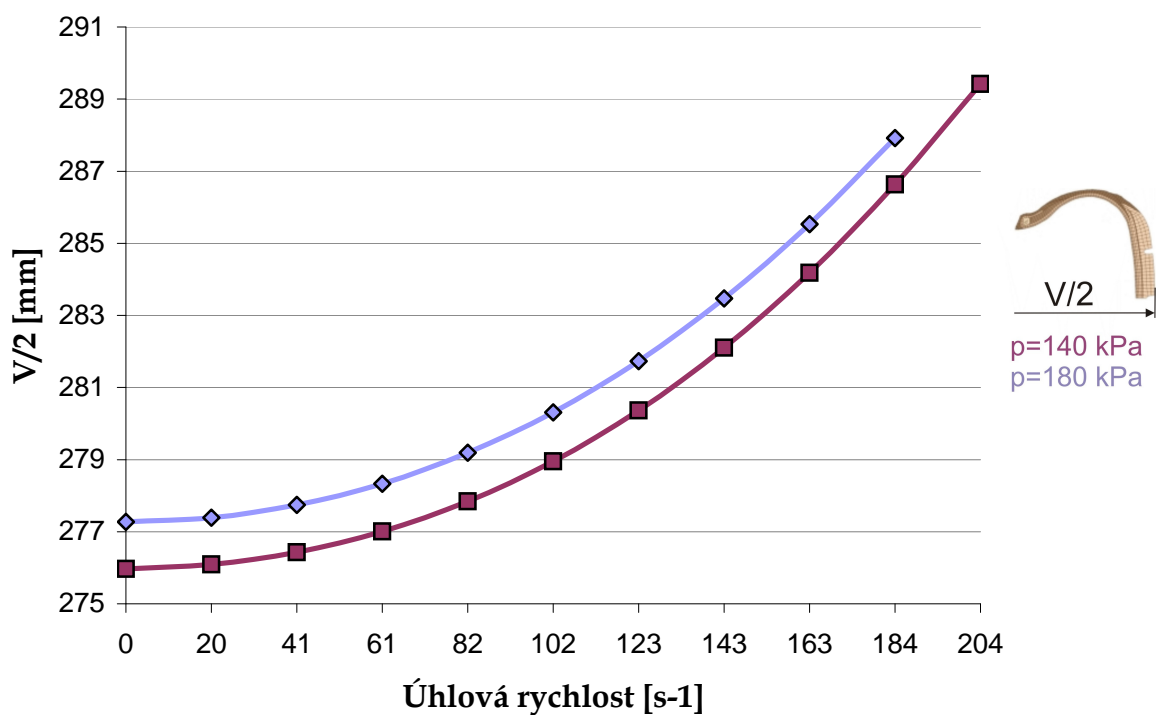


Graf 10.9. - Závislost poloviny šířky pláště ($\dot{S}/2$) na úhlové rychlosti (*Model 2*)

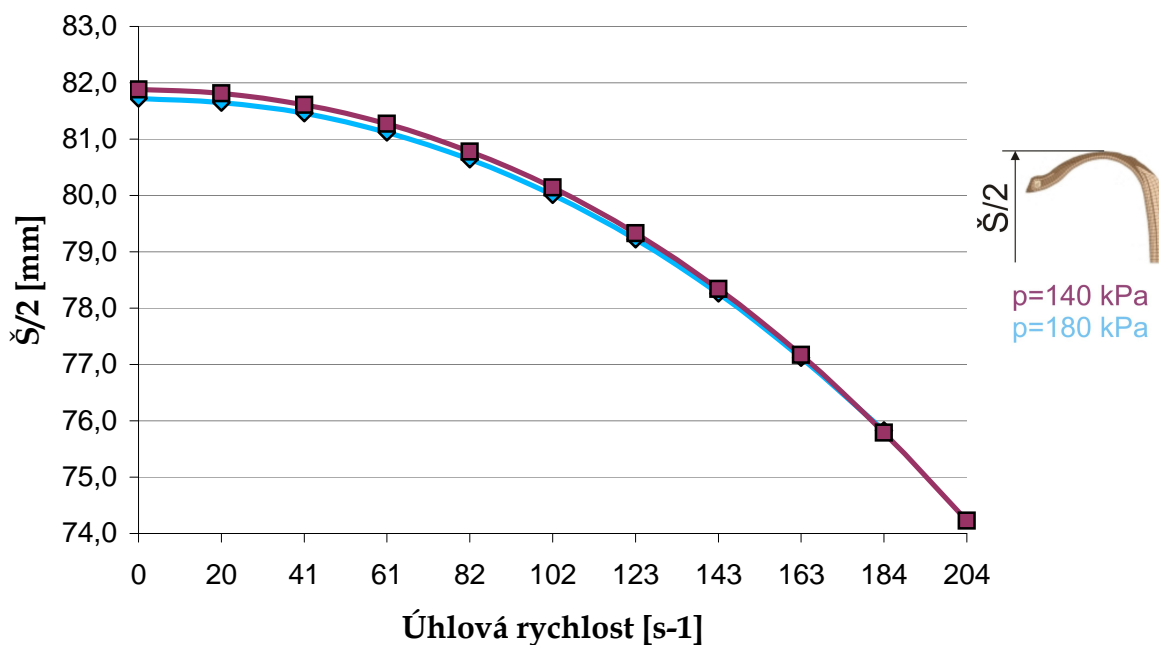
Model 3A



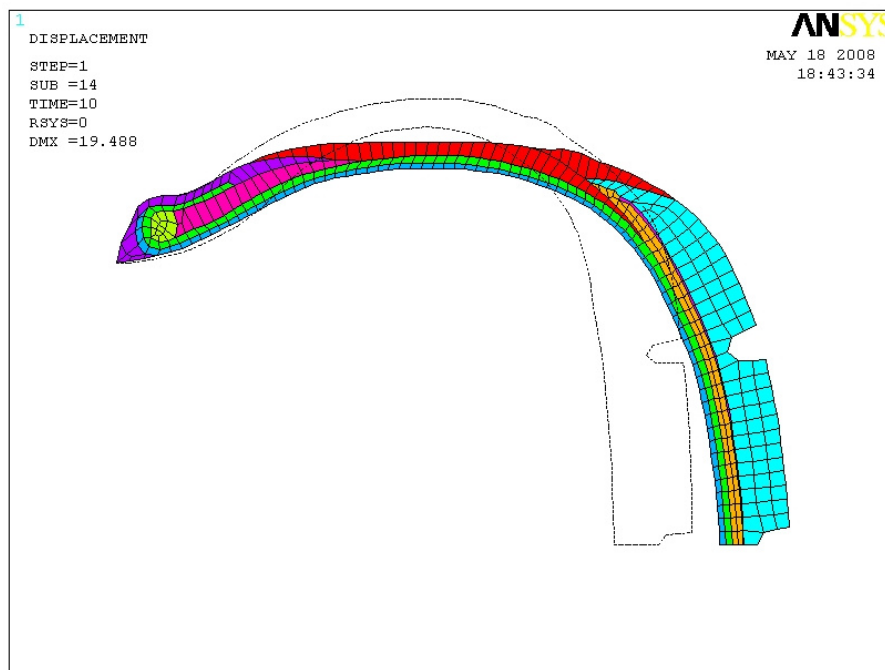
Graf 10.10. - Závislost posuvu měřeného na úhlové rychlosti (*Model 3A*)



Graf 10.11. - Závislost poloviny výšky pláště ($V/2$) na úhlové rychlosti (Model 3A)



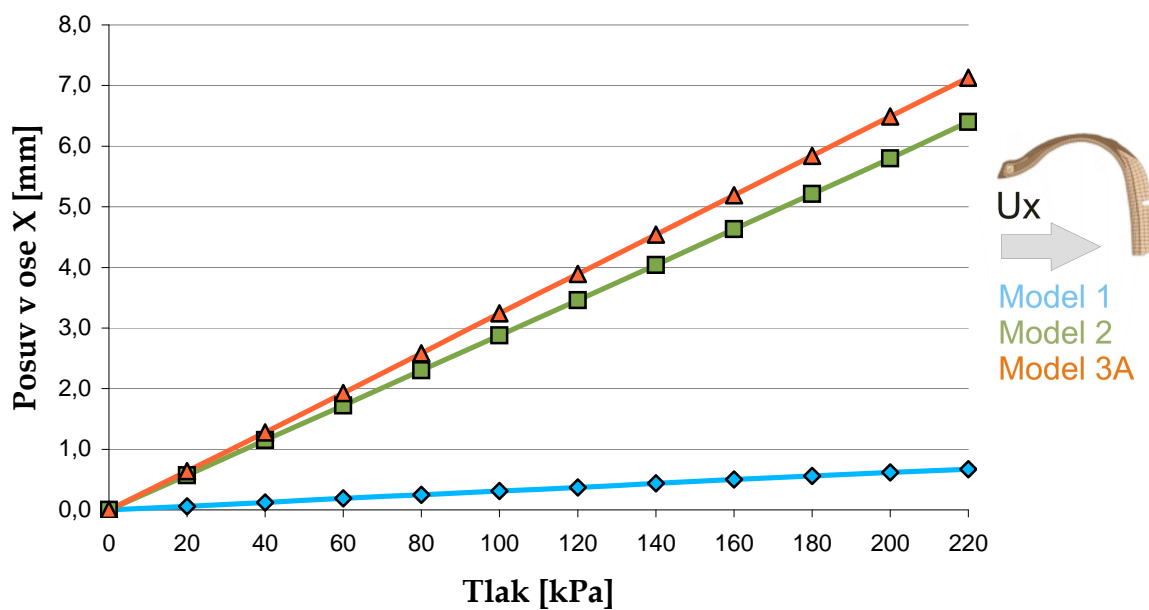
Graf 10.12. - Závislost poloviny šířky pláště ($\check{S}/2$) na úhlové rychlosti (Model 3A)



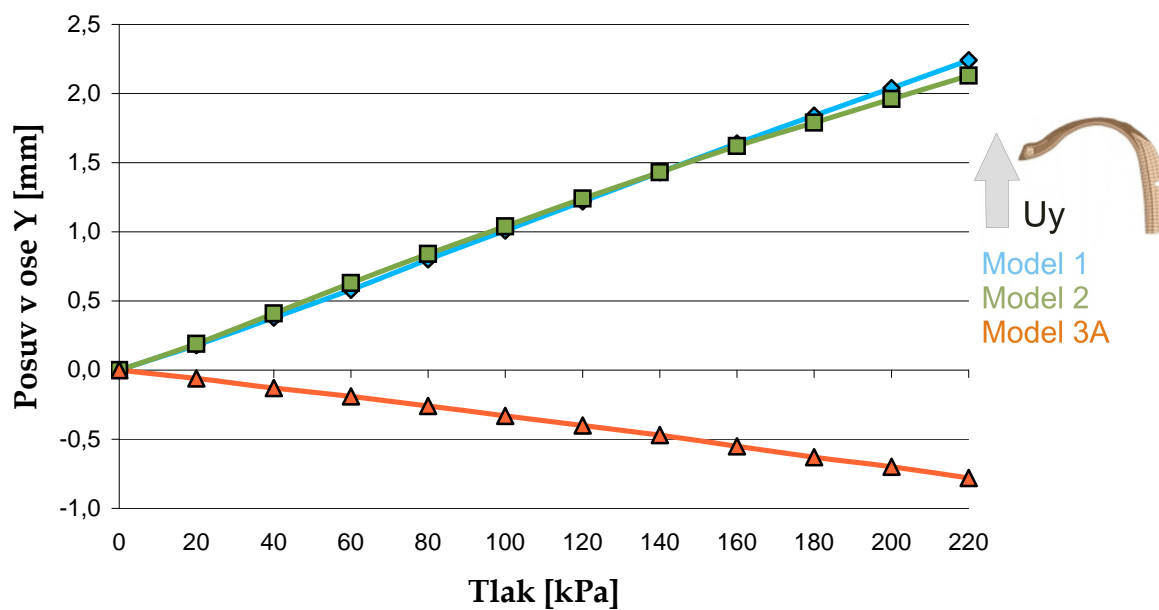
Obr.10.10. – Deformace Modelu 3A při zatížení provozním tlakem 140kPa a úhlovou rychlostí $204,25s^{-1}$

10.3. Srovnání jednotlivých modelů

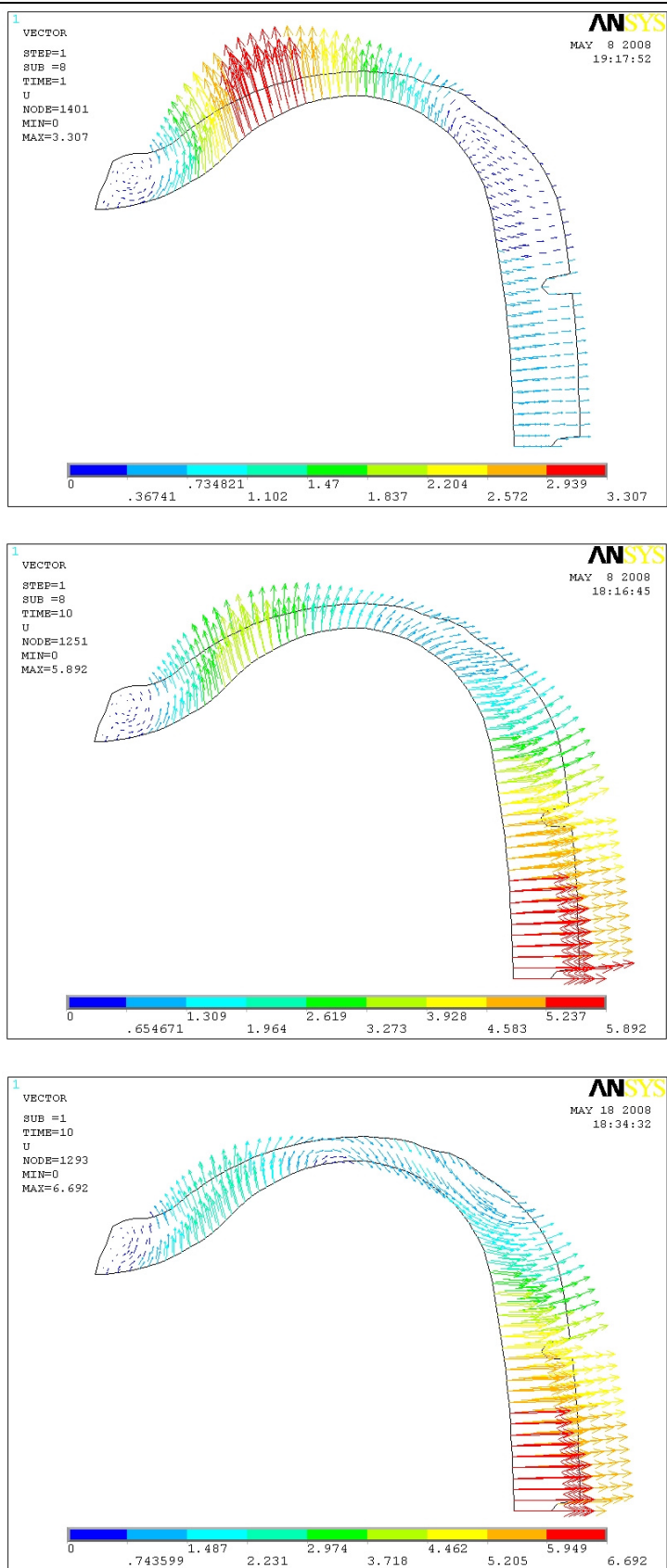
10.3.1. Úloha simulující nafukování pláště



Graf 10.13. - Závislost posuvu měřeného místa na vnitřním tlaku

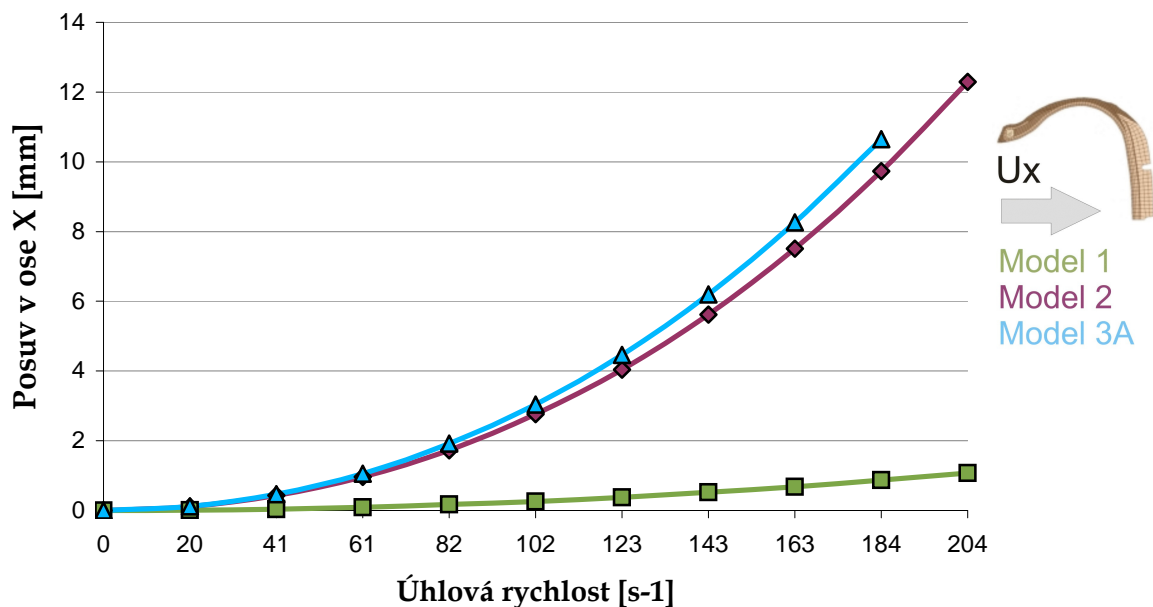


Graf 10.14. - Závislost posuvu měřeného místa na vnitřním tlaku

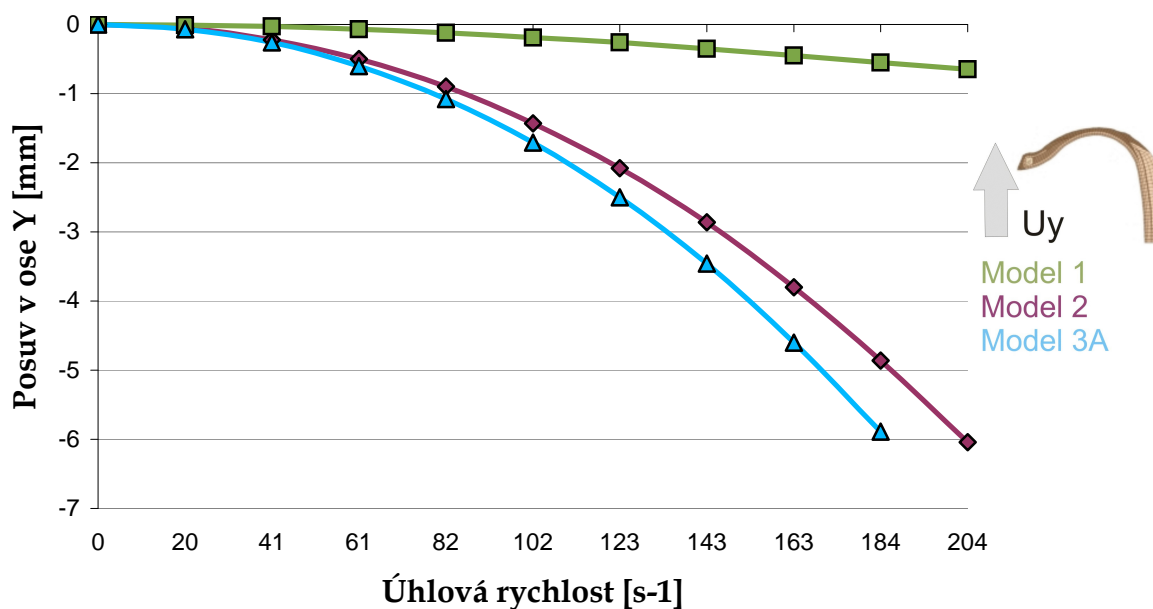


Obr.10.11. – Srovnání vektorového vyjádření deformace Modelu 1, 2 a 3A (shora) při zatížení provozním tlakem 180kPa

10.3.2. Úloha simulující vliv odstředivých sil



Graf 10.14. - Závislost posuvu měřeného na úhlové rychlosti

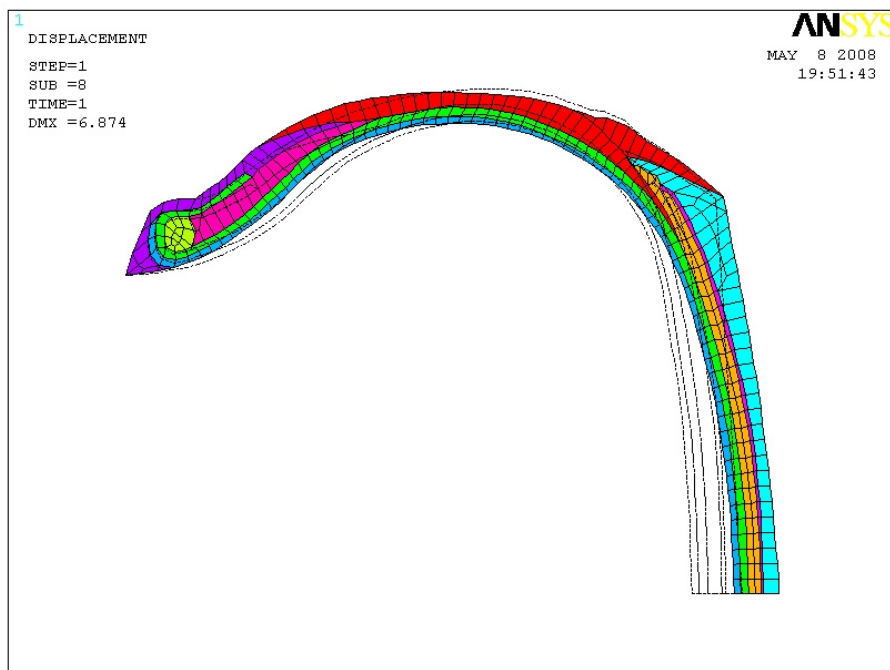


Graf 10.15. - Závislost posuvu měřeného na úhlové rychlosti

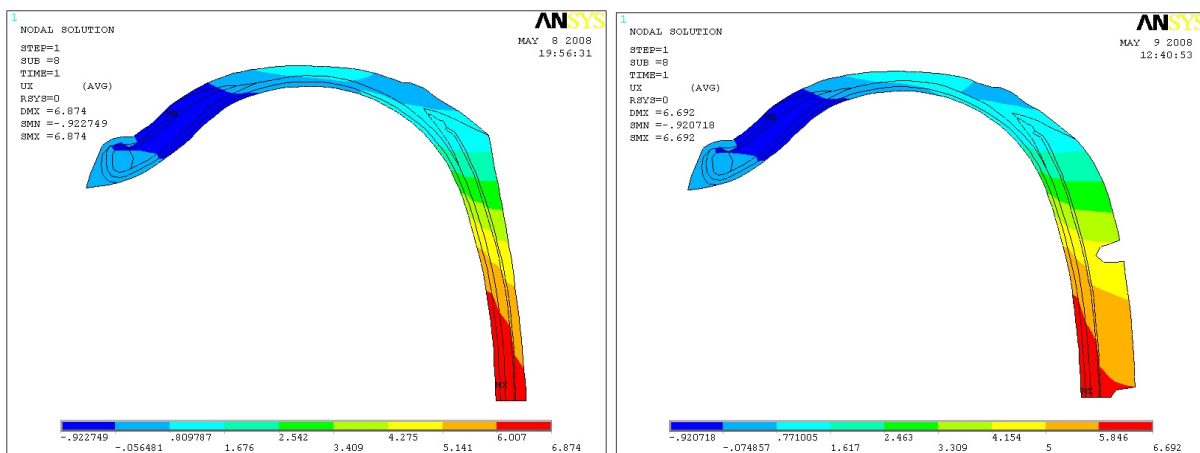
10.3.3. Další srovnávací úlohy

V rámci srovnávání jednotlivých modelů bylo provedeno několik dalších úloh pro ověření vlivu vlastností některých komponentů na chování modelu pneumatiky.

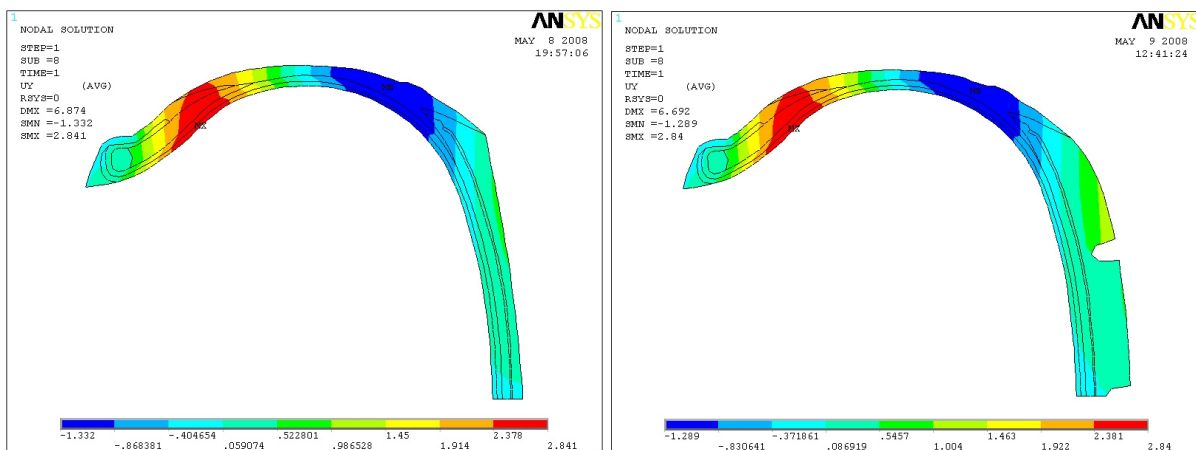
Vliv tloušťky běhounové vrstvy na deformaci pláště:



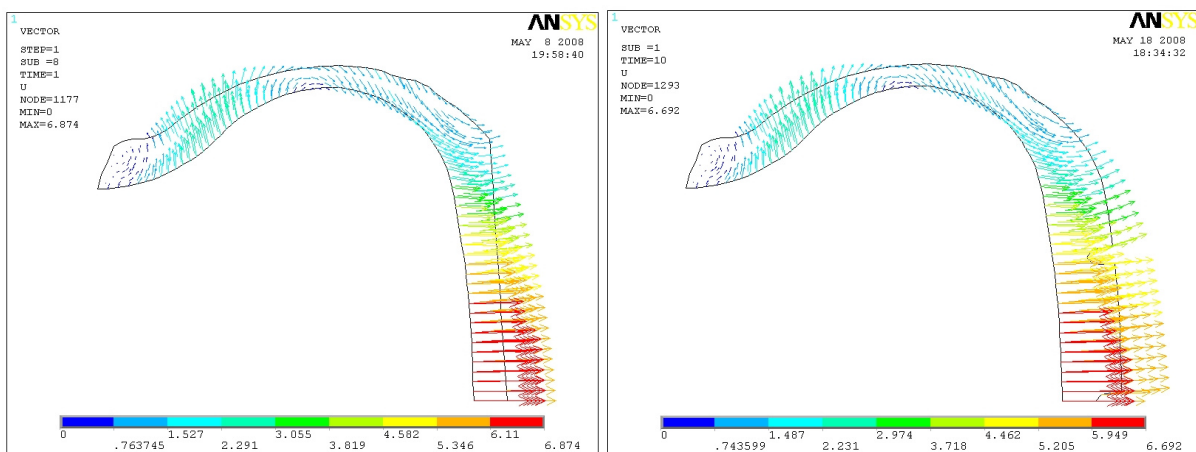
Obr10.12. – Deformace Modelu 3B při zatížení provozním tlakem 180kPa



Obr.10.13. – Srovnání posuvu v radiálním směru Modelu 3B a Modelu 3A při zatížení provozním tlakem 180kPa

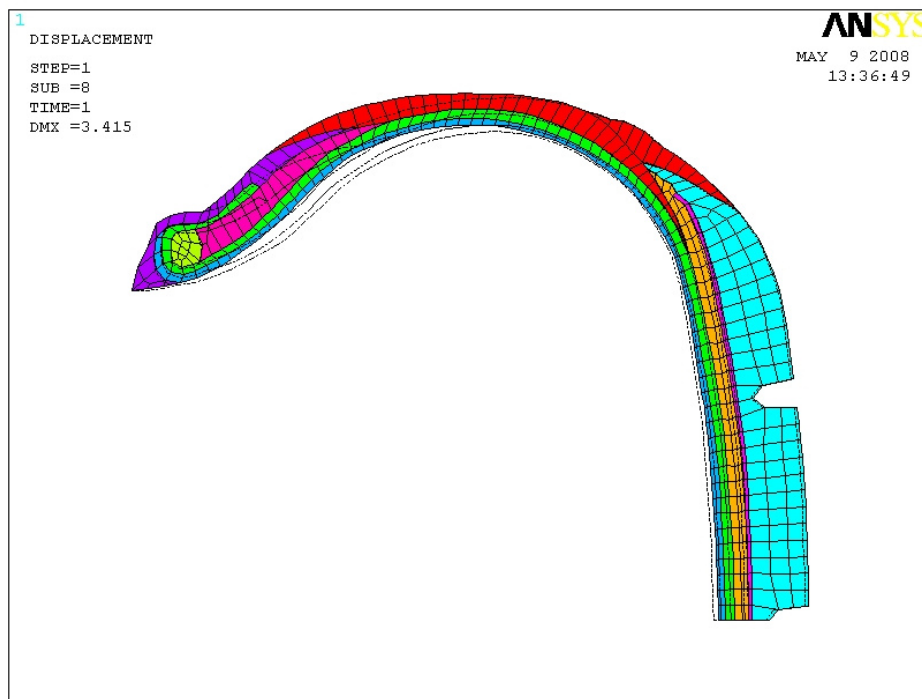


Obr.10.14. – Srovnání posuvu v axiálním směru *Modelu 3B* a *Modelu 3A* při zatížení provozním tlakem 180kPa

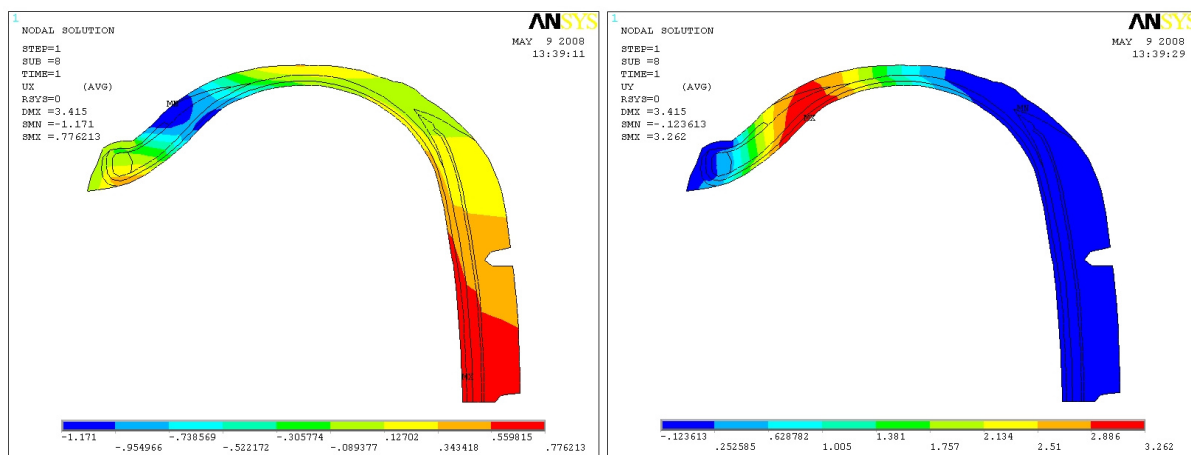


Obr.10.15. – Srovnání vektorového vyjádření deformace *Modelu 3B* a *Modelu 3A* při zatížení provozním tlakem 180kPa

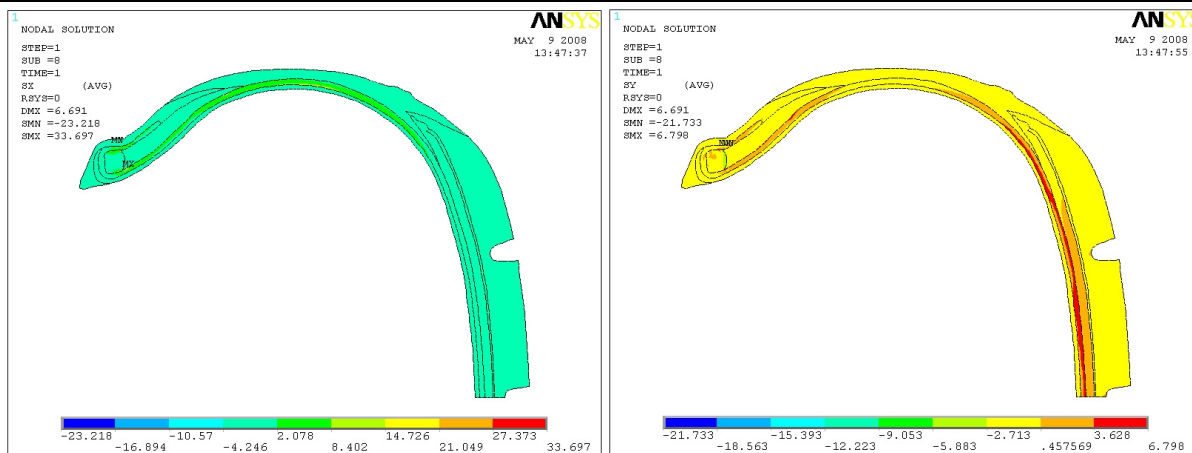
Srovnání vlivu materiálových vlastností ocelokordového nárazníku:



Obr.10.16. – Deformace Modelu 3C při zatížení provozním tlakem 180kPa



Obr.10.17. – Posuv Modelu 3C v radiálním směru (vlevo) a axiálním směru (vpravo) při zatížení provozním tlakem 180kPa



Obr.10.18. – Napětí v *Modelu 3C* v radiálním směru (vlevo) a axiálním směru (vpravo) při zatížení provozním tlakem 180kPa

11. ANALÝZA VÝSLEDKŮ

Použití homogenizace materiálových vlastností neumožňuje určit rozložení napětí v jednotlivých komponentách pneumatiky. Z tohoto důvodu je hodnocení zaměřeno na deformace jednotlivých modelů a průběhy napětí slouží pouze k ověření funkce prvků pláště pneumatiky. Pro posuvy v nejvyšším místě pláště je v textu použito označení U_x , v nejširším místě pláště U_y . $U_{x_{Max}}$ a $U_{y_{Max}}$ označují největší hodnoty posuvů v radiálním a axiálním směru.

11.1. Rotačně symetrická úloha simulující nafukování pláště

Všechny modely byly v této úloze zatíženy vnitřním tlakem 180kPa.

Model 1

Průběh deformace při zatížení provozním tlakem je zobrazen na *Obr.10.1.*, slabou čarou je zobrazen výchozí stav (vnitřním tlakem nezatížená pneumatika). Hodnoty posuvů jsou shrnuty v *Tab.11.1.* U tohoto modelu je jako maximální posuv v radiálním směru ($U_{X_{MAX}}$) v tabulce uvedena hodnota kladného maximálního posuvu. Toto maximum je umístěno v rovině kola (na ose symetrie). K největšímu posuvu, ale dochází v oblasti patky pláště (-1,174mm), vzhledem k porovnání s ostatními modely je v tabulce uvedena hodnota kladného extrému.

Závislost posuvů v měřených místech na tlaku huštění ukazuje *Graf.10.1.*, šířka i výška pláště se s rostoucím tlakem zvětšuje. Průběh lze přibližně aproximovat lineární funkcí, to souvisí s použitím lineárního chování materiálu. Hodnoty deformace tohoto modelu jsou srovnatelné s experimentálním řešením. To je dáno především vstupními hodnotami materiálu, které byly v [4] vhodně voleny, právě pro přiblížení se k výsledkům experimentu.

Model 2

U toho modelu opět dochází při „tlakování“ ke zvětšování rozměrů šířky i výšky pláště (*Graf.10.5.*), ale oproti *Modelu 1* dochází k výrazně větší deformaci v radiálním směru (*Tab.11.1.*). Důvodem je použití experimentálně zjištěných materiálových údajů, které způsobují menší ohybovou tuhost nárazníků a tím větší deformaci. V axiálním směru (*Obr.10.5.*) se deformace oproti *Modelu 1* téměř nezměnila, to je dáno použitím stejného modelu materiálu pro kostrovou vložku. Použití hyperelastických prvků se projevilo při srovnání axiálních posuvů *Modelu 1* a *Modelu 2* (*Graf.10.14.*), kdy závislost posuvu na vnitřním tlaku má u *Mo-*

delu 2 mírně degresivní charakter. Radiální deformace má opět díky použití lineárního chování materiálu přibližně přímkový charakter.

Model 3

Se změnou modelu chování kostrové vložky došlo při zvyšování tlaku ke zmenšování šířky pláště (*Graf 10.6.*). Změna trendu v deformaci může být vysvětlena zvýšením tuhosti „ortotropní“ nosné kostrové vložky ve směru působení zatížení. Vlivem použití ortotropního modelu materiálu a změně materiálových parametrů u kostrové vložky došlo také k dalšímu zvýšení radiální deformace. To může mít také vliv na zmíněnou změnu trendu u axiální deformace *Modelu 3A*. Hodnoty zjištěných posuvů uvádí opět *Tab.11.1*.

Model	U _x [mm]	U _y [mm]	U _x MAX [mm]	U _y MAX [mm]
Model 1	0,56	1,84	0,59	3,18
Model 2	5,21	1,79	5,89	3,46
Model 3A	5,84	-0,63	6,69	2,84
Experiment	0,52	2,82	-	-

Tab.11.1. – Hodnoty posuvů při zatížení provozním tlakem 180kPa

Celkové zhodnocení

Z průběhu závislostí vnitřního tlaku na posuvu je zřejmé že pro statické zatěžování vnitřním tlakem mají na deformaci rozhodující vliv parametry kostrové vložky a ocelokordových nárazníků, tímto se potvrdila principiálně správná funkce chování všech modelů.

Vliv použitých modelů vlastností materiálu na průběh deformace při zatížení pláště vnitřním tlakem je vidět na trojici srovnávacích obrázků vektorového vyjádření deformace (*Obr.10.11.*).

Téměř lineární závislost vnitřního tlaku na posuvu v radiálním směru (*Graf.10.13.*) je způsobena ortotropním lineárním materiálovým modelem ocelokordového nárazníku a izotropním lineárním (*Model 1 a 2*) či opět ortotropním lineárním materiálem (*Model 3*) kostrové vložky, které jsou zatěžovány v místě maximální výšky pláště souběžně s radiální osou materiálu. V axiálním směru (*Graf.10.14.*) je na průběhu deformace (během zvyšování tlaku) u *Modelu*

2 a *Modelu 3A* vidět výraznější vliv použití prvků s hyperelastickým chováním materiálu. U *Modelu 3A* se v axiálním směru také výrazně projevuje zahrnutí ortotropického chování materiálu.

11.2. Rotačně symetrická úloha simulující vliv odstředivých sil

U všech modelů je průběh deformace při zatížení odstředivými silami velmi podobný, proto zde bude vyhodnoceno pouze vzájemné srovnání jednotlivých modelů a variant zatížení (zatížení provozním tlakem či „podhuštění“). U všech modelů má průběh deformace s narůstající úhlovou rychlostí progresivní průběh, který je výraznější u modelu s hyperelastickým modelem chování materiálu. Z *Tab.11.2.* a průběhů deformací při uvažování různém nahuštění pláště je vidět, že u *Modelu 1* (*Graf.10.3.* a *10.4.*) a *Modelu 2* (*Graf.10.8.* a *10.9.*) deformace způsobená odstředivými silami téměř nezávisí na hodnotě vnitřního tlaku. U *Modelu 3A* (*Graf.10.11.* a *10.12.*) je vliv vnitřního tlaku na průběh deformace výrazný. Příčinu lze opět hledat v ortotropním chování modelu kostrové vložky a velké pravděpodobně také ve výrazné deformaci v axiálním směru materiálu kostrové vložky.

Model	Pro 180kPa		Pro 140kPa	
	Ux [mm]	Uy [mm]	Ux [mm]	Uy [mm]
Model 1	0,87	-0,55	0,87	-0,55
Model 2	9,73	-4,86	9,6	-4,03
Model 3A	10,65	-5,89	10,66	6,09

Tab.11.2. – Srovnání posuvů při zatížení vnitřním tlakem a odstředivými silami

Srovnání posuvů bylo z důvodu nekonvergence posledního kroku zatěžování u *Modelu 3A* (zatížení vnitřním tlakem 180 kPa) provedeno pro zatížení úhlovou rychlostí $\omega=183,83s^{-1}$ (odpovídá rychlosti vozu 180km/h). Důvodem nekonvergence výpočtu je velká deformace v oblasti bočnice (*Obr. 10.10.*), tyto velké deformace jsou již pro použité prvky obtížně řešitelné a nepomáhá ani změna hustoty sítě.

11.3. Další srovnávací úlohy

Vliv tloušťky běhounové vrstvy na deformaci pláště

Porovnání bylo provedeno pro nahuštění provozním tlakem 180kPa. Grafické srovnání je vidět na *Obr. 10.13. až 10.15.*

Posuv	Model 3A	Model 3B	Rozdíl hodnot [%]
U_x [mm]	5,84	6,07	3,94
U_y [mm]	-0,63	-0,64	1,59
U_{xMAX} [mm]	6,69	6,87	2,69
U_{yMAX} [mm]	2,84	2,84	0

Tab.11.3. – Porovnání posuvů při zatížení provozním tlakem 180kPa

Z porovnání výsledků (Tab.11.13.) je zřejmé že tloušťka běhounové vrstvy má vliv na celkovou deformaci pneumatiky pouze v řádu procent. V případech kdy není nutné vyhodnocovat např. kontaktní tlak s vozovkou, lze tedy uvažovat „seřiznutí“ běhounu. Tím lze dosáhnout snížení počtu prvků konečnoprvkové sítě a snížení výpočtového času.

Vlivu materiálových vlastností ocelokordového nárazníku

Tato úloha měla za cíl zjistit chování modelu pneumatiky při změně materiálových charakteristik ocelokordového nárazníku. Snahou bylo přiblížit se více hodnotami deformace modelu využívajícího hyperelastického chování materiálu k experimentálním výsledkům. Toho bylo u *modelu 3C* dosaženo použitím materiálových charakteristik ocelokordového nárazníku z *Tab.8.4.* Průběh deformace pláště se (*Obr.10.16 a 10.17.*) se po této změně více blíží deformaci *Modelu 1.*(*Obr.10.1.*) Porovnání výsledků s experimentem a výchozím *Modelem 3A* je v *Tab.11.4.* Jak je vidět, změna vlastností nárazníků velmi výrazně ovlivnila i axiální deformaci pláště a dokonce došlo, oproti *Modelu 3A*, ke změně jejího trendu. To je velmi pravděpodobně způsobeno ortotropním chováním materiálu kostrové vložky.

K dosažení úplné shody s experimentem tedy nestačí pouze změna vlastností ocelokordového nárazníku a bylo by třeba měnit vlastnosti i dalších nosných částí pláště. Tento závěr nemohl být, ale vzhledem k nedostatku dalších vhodných vstupních dat ověřen.

Posuv	Model 3C	Model 3A	Experiment
U _x [mm]	0,61	5,84	0,52
U _y [mm]	0,67	-0,63	2,82

Tab.11.4. – Srovnání posuvů modelu 3C s experimentem (zatížení vnitřním tlakem 180kPa)

12 .ZÁVĚR

Cílem této práce bylo seznámit se s možnostmi výpočtového modelování mechanického chování elastomerů a kompozitů s pryžovou maticí a jejich využití pro tvorbu výpočtového modelu pneumatiky. Byl vytvořen vytvořen 2D-axisymetrický výpočtový model pneumatiky ve dvou geometrických variantách.

Model byl dále řešen v několika variantách lišících se použitou úrovní modelování materiálu. Nejprve byla provedena analýza vlivu vnitřního tlaku na deformaci jednotlivých modelů. Dále byl řešen vliv zatížení pneumatiky úhlovou rychlostí současně se zatížením vnitřním tlakem. Byl také ověřen vliv tloušťky běhounové vrstvy na celkovou deformaci pláště pneumatiky.

Z analýzy deformace pláště vyplynul výrazný vliv materiálových charakteristik a úrovně modelu materiálu nosných prvků pláště (kostrová vložka, ocelokordové nárazníky) na celkovou deformaci pneumatiky. Jako méně výrazný se ukázal vliv modelu chování elastomerů.

Je zřejmé, že vzhledem k omezeným možnostem získání vstupních údajů o materiálových charakteristikách jednotlivých prvků pneumatiky je obtížné dosáhnout reálných deformací. Příčinu rozporů dosažených výsledků s experimentem je možné také hledat v chování kompozitní struktury pryž-vlákno, která vzhledem k několika-řadovým rozdílům v modulech pružnosti komponent může vykazovat chování silně odlišné od použitého lineárně elastického ortotropního modelu. Proto je třeba modelovat strukturu jednotlivých vrstev, což v modelu celé pneumatiky není v současné době možné.

Lze konstatovat, že možnosti 2D-axisymetrického modelu jsou značně omezeny. Nelze u něj využít „solistikovanějších“ 3D prvků (např. SOLID65) či anizotropních konstitutivních modelů (např. Polynomický konstitutivní model materiálu), které svým chováním lépe dokáží postihnout homogenizaci struktury kompozitních prvků konstrukce pneumatiky.

13. POUŽITÁ LITERATURA

- [1] Ing. V.Dočkal, Doc.Ing. J.Kovanda CSc., Ing. F.Hrubec CSc.: *Pneumatiky*, ČVUT v Praze 1998.
- [2] Ing. J.Krmela PhD., Prof. Ing. F.Pešlová PhD.: *Aplikace výpočtového modelování pro vícevrstvé kompozitní materiály*, Computational Mechanics 2006.
- [3] J.Krmela : *Návrh výpočtového modelu pneumatiky* (Diplomová práce), Univerzita Pardubice, Doprvní fakulta Jana Pernera, Česká Třebová 2001.
- [4] J.Krmela : *Návrh výpočtového modelovní prostorového modelu radiální pneumatiky* (Diserteční práce), Univerzita Pardubice, Doprvní fakulta Jana Pernera, Česká Třebová, 2004.
- [5] doc. Ing. Jiří Burša, Ph.D.: *Výpočtové modelování problémů mechaniky živých a neživých těles z kompozitních materiálů umožňujících velké deformace* (habilitační práce), FSI VUT Brno 2005.
- [6] S.L.Skolov: *Calculation of the Stress-Strain State of Pneumatic Tires by the Finite Element Method*, Journal of Machinery manufacture and Realibility 2007, Vol.36, No.1.
- [7] MATADOR, a.s., Púchov: *Konstrukce pneumatik*. Firemní materiály, Púchov, Slovenská republika, 2000.
- [8] Kolektiv autorů: *Gumárska technológia II*. Púchov, Slovenská republika: Matador, GC TECH, 2003.
- [9] Zegelaar, P. W. A.: *The dynamic response of tyres to brake torque unevennesses* (PhD Thesis), Delft University of Technology, 1998.
- [10] S.Rao, I.M.Daniel, E.E.Gdoutos: *Mechanical properties and Failure Behavior of Cord/Rubber Composites*, Applied Composite Materials 11, 2004
- [11] DRÔTOVŇA a.s. Hlohovec: *Pneudrôt, Ocelové kordy do pneumatík*, Slovenská republika: Firemní materiály, Hlohovec, 2000.

- [12] A.Abe, T.Kamegawa, Y.Nakajima: *Optimization of Construction of Tire Reinforcement by Genetic Algorithm*, Optimization and Engineering, 5, 2004.
- [13] P. Skácel: *Výpočtové a experimentální modelování deformačně napjatostních a mezních stavů elastomerů a jejich rozhraní s tuhými materiály* (Diplomová práce), FSI VUT Brno, 2005.
- [14] G.A. Holzapfel: *Nonlinear Solid Mechanics*, Willey and Sons, Chichester, 2000.
- [15] Al Dorfmann: A Muhr: *Constitutive Models for Rubber*, Balkema, Rotterdam, 1999.
- [16] R.Urban: *Modelování konstrukčních prvků z pryže vyztužené nitěmi* (Diplomová práce), Fakulta strojní, Technická Univerzita v Liberci, 2004