

UNIVERZITA PARDUBICE

Dopravní Fakulta Jana Pernera

**Návrh výpočtového modelu dlouhovláknových
kompozitů s kovovou vyztuží a nelineární maticí**

AUTOR PRÁCE: Bc. Jan Matěna

VEDOUCÍ PRÁCE: Ing. Jan Krmela, Ph.D.

**Diplomová práce
2009**

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Jan MATĚNA**

Studijní program: **N3708 Dopravní inženýrství a spoje**

Studijní obor: **Dopravní prostředky-Silniční vozidla**

Název tématu: **Návrh výpočtového modelu dlouhvláknových kompozitů s kovovou vyztuží a nelineární maticí**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1.Úvod 2.Kompozity 3.Dlouhvláknové kompozity 4.Výpočtové modelování kompozitních materiálů 5.Využití kompozitů pro automobily (rozdělení, použití aj.) 6.Experimentální stanovení materiálových charakteristik 7.Aplikace vstupů pro výpočtový model vybraného kompozitu 8.Verifikace a závěr.

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná**

Seznam odborné literatury:

AGARWAL, Bhagwan D., BROUTMAN, Lawrence J. Vláknové kompozity. 1. vyd. Praha : SNTL, 1987. 296 s. ISBN 04-216-87.

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Jan Krmela, Ph.D.

Katedra dopravních prostředků a diagnostiky

Datum zadání diplomové práce: **20. února 2009**

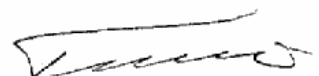
Termín odevzdání diplomové práce: **25. května 2009**



prof. Ing. Bohumil Culek, CSc.

děkan

L.S.



doc. Ing. Miroslav Tesař, CSc.

vedoucí katedry

dne

Prohlašuji:

Tuto práci jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Souhlasím s prezenčním zpřístupněním své práce v Univerzitní knihovně.

V Pardubicích dne 24.5.2009

Bc. Jan Matěna

ANOTACE

Diplomová práce se zabývá návrhem materiálových vstupů do výpočtového modelu dlouhovláknových kompozitů s kovovou výztuží a elastomerovou maticí. Tyto kompozitní materiály se vyskytují například v pneumatikách jako tzv. ocelokordové nárazníky. Experimentální měření materiálových charakteristik kompozitních vzorků a samostatných elastomerů pro potřeby výpočtového modelování je obsaženo v práci.

KLÍČOVÁ SLOVA

Elastomer, dlouhovláknový kompozit, pneumatika, výpočtové modelování

TITLE

Design of Computational Model of Long Fibre Composites with Metal Reinforcement and Non-linear Matrix

SUMMARY

Diplom thesis deals with design material input to the computational model of long fibre composite with metal reinforcement and elastomer matrix. These composite materials occur for example in tyres as steel cord belts. The experimental testing for obtaining basic material characteristics composite and elastomer specimens for the needs of computational modelling are included in this work.

KEYWORDS

Eleastomer, long fibre composite, tyre, computational modelling

Poděkování:

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu diplomové práce ing. Janu Krmelovi, Ph.D. za jeho cenné odborné rady a ochotu při poskytování konzultací.

V neposlední řadě bych chtěl poděkovat mé rodině a přátelům, kteří mě podporovali nejen při vytváření této práce, ale i v průběhu celého mého studia na vysoké škole.

OBSAH

| | |
|---|----|
| 1. ÚVOD | 8 |
| 2. CÍL PRÁCE | 10 |
| 3. KOMPOZITY | 11 |
| 3.1 Definice kompozitu..... | 11 |
| 3.2 Rozdělení kompozitů | 13 |
| 3.3 Vláknové kompozity..... | 14 |
| 3.4 Dlouhovláknové kompozity..... | 15 |
| 3.5 Materiály výztužných vláken..... | 18 |
| 3.6 Materiály matric..... | 21 |
| 4. VYUŽITÍ KOMPOZITŮ PRO AUTOMOBILY | 23 |
| 5. PNEUMATIKA JAKO KOMPOZIT | 26 |
| 5.1 Definice pneumatiky..... | 26 |
| 5.2 Struktura pneumatiky..... | 28 |
| 5.3 Strukturní části pneumatiky..... | 30 |
| 5.4 Materiálové složení pneumatiky..... | 31 |
| 5.5 Kompozitní materiály v pneumatice..... | 33 |
| 6. EXPERIMENTÁLNÍ STANOVENÍ MATERIÁLOVÝCH CHARAKTERISTIK | 35 |
| 6.1 Zkouška kompozitů jednoosým tahem | 36 |
| 6.2 Vyhodnocení tahové zkoušky kompozitů..... | 42 |
| 6.3 Porovnání jednotlivých typů kompozitních vzorků..... | 45 |
| 6.4 Tahová zkouška elastomerových matric..... | 51 |
| 7. APLIKACE VSTUPŮ PRO VÝPOČTOVÝ MODEL VYBRANÉHO KOMPOZITU | 55 |
| 7.1 Výpočtové modelování kompozitních materiálů..... | 55 |
| 7.2 Stanovení parametrů materiálového modelu | 62 |
| 8. ZÁVĚR | 66 |
| Seznam použité literatury..... | 68 |
| Seznam obrázků | 70 |
| Seznam tabulek | 71 |
| Seznam příloh..... | 71 |

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

| | |
|--------------------------|---|
| MKP..... | Metoda konečných prvků |
| VM..... | Výpočtový model |
| M-R..... | Mooney-Rivlin |
| CNG..... | stlačený zemní plyn |
| F_{\max} | maximální síla při přetržení vzorku [N] |
| l_{\max} | prodloužení vzorku při přetržení [mm] |
| F | zatěžující síla [N] |
| l | prodloužení [mm] |
| b_v | šířka kompozitního vzorku [mm] |
| b | tloušťka vzorku elastomerové matrice [mm] |
| E | Youngův modul pružnosti [MPa] |
| σ | smluvní napětí [MPa] |
| ε | smluvní přetvoření |
| σ_{ij} | tenzor napětí |
| ε_{ij} | tenzor deformace |
| E_{ijkl} | tenzor Youngových modulů pružnosti |
| ν | Poissonova konstanta |

1. ÚVOD

Vzrůstající trend využívání automobilů a s nimi spojená rostoucí hustota silničního provozu vede ke stálému zvyšování nároků na vozidla. Z pohledu uživatele se jedná především o plnění přísných bezpečnostních kritérií. K udržení kvality automobilů na takové úrovni, aby splňovaly stále přísnější normy, je potřeba vyvíjet nové technologie a v neposlední řadě nové materiály.

Progresivně se rozvíjející materiálové inženýrství nabízí pro konstrukci vozidel možnosti pro zlepšení jejich vlastností například použitím vysokopevnostních ocelí pro nejvíce namáhané prvky karoserie nebo kompozitních materiálů, které svými specifickými vlastnostmi předčí některé tradiční materiály. Použití kompozitů v automobilech je v mnoha případech spojeno se snahou o snížení hmotnosti při zachování stejných nebo vyšších hodnot pevnosti. Z hlediska bezpečnosti silničního provozu je automobilová pneumatika na jednom z předních míst, protože je jako jediná část vozidla ve styku s vozovkou. Přesto pro výrobu pneumatik zatím nebyl vynalezen jednosložkový (homogenní) materiál, který by plně zajistil jejich funkci. Jedinou možností je použití polykomponentních materiálů, které svými specifickými vlastnostmi dokáží zajistit funkci pneumatik.

Polykomponentní materiály se v pláštích automobilových pneumatik uplatňují jako výztužné struktury plášťů, může se jednat například o tzv. ocelokordové nárazníky. Výsledné vlastnosti pneumatik výrazně ovlivňují bezpečnost provozu, kvalitu jízdy a výkony silničních vozidel i letadel a příp. jiných dopravních prostředků a pracovních strojů, proto jim je třeba věnovat dostatečnou pozornost.

Nejen pro vývoj pneumatik, ale i pro modifikaci ostatních součástí všech typů dopravních prostředků je nezbytné provádět experimentálně a výpočtově podporované ověřování navržených konstrukčních parametrů. V této oblasti se za podpory rychle se rozvíjející výpočetní techniky uplatňuje metoda konečných prvků (dále také MKP). Pomocí MKP lze simulovat různé zatěžující stavy i složitých součástí, u kterých se dříve vycházelo pouze z empirických výpočtů a experimentální ověření bylo a stále je velice časově a finančně náročné a v některých případech velmi omezené nebo dokonce nemožné.

Pro provedení výpočtového modelování pomocí metody konečných prvků je nutné mít dostatečné znalosti z oblasti materiálů, konstrukce a funkce navrhované součásti. Bez těchto poznatků se žádný výpočtář neobejde.

Úvodní část práce se zaměřuje na problematiku kompozitních materiálů, jejich definici, rozdělení a možnosti jejich uplatnění v automobilovém průmyslu. Pozornost je věnována pneumatikám, jejich struktuře, funkci a materiálové skladbě.

Pro výpočtové modelování je třeba experimentálně stanovit materiálové charakteristiky. Experimentální část práce se věnuje zkouškám v tahu vybraných vzorků kompozitů a elastomerových matric a návrhu geometrických parametrů vzorků. Podmínky metodiky zkoušení dlouhovláknových kompozitů z důvodu, že parametry zkoušek pro ocelokordové nárazníky nejsou normalizovány, budou v práci navrženy.

Závěrečná část práce se bude zabývat aplikací experimentálně stanovených charakteristik vybraných kompozitů do výpočtového modelování na bázi metody konečných prvků a návrhem vstupů a metodiky pro výpočtové modelování vybraných typů kompozitů.

2. CÍL PRÁCE

1. Návrh zkušebních vzorků a podmínek zkoušek pro ocelokordové nárazníky a elastomerové matrice.
2. Experimentální stanovení materiálových charakteristik.
3. Návrh vstupů do výpočtového modelování.
4. Závěry a doporučení pro praxi.

3. KOMPOZITY

Celý evoluční vývoj člověka je spojený s přírodními kompozitními materiály, kterými bylo například dřevo složené s celulosových vláken (ohebných a pevných v tahu) a ligninu jako pojiva k zajišťování tuhosti. Stejným způsobem je tvořena každá část všech rostlin a stejně tak i části živého organismu jsou v podstatě kompozity. Dalším takovým příkladem mohou být kosti živočichů, které se vyvinuly podle působícího namáhání. Tuhý plášť z ostinu složený z ohebných a poddajných kolagenních vláken ve tvrdém, křehkém apatitu, vytváří hlavní nosný prvek pro namáhání tahem a ohybem. Vnitřní části kosti, tvořené méně pevným spongiózním materiálem, zajišťují stabilitu tuhého pláště při namáhání tlakem a při přenosu smykových namáhání při namáhání ohybem. Střední část, která je z hlediska nosné funkce nepodstatná, se využívá pro jiné biologické funkce.

U lidstva se už od nejstarších dob lze setkat s využíváním kompozitních materiálů pro stavbu stěn obydlí. Na stavbu se používala hlína a jíl vyztužené kousky slámy nebo jiných rostlinných vláken. Cihly zhotovené z těchto surovin v Izraeli 800 let před naším letopočtem dosahovaly pevnosti v tlaku 7MPa tj. asi jedna čtvrtina pevnosti dnešních cihel [4]. Další oblastí kde lidé využívali kompozitních materiálů od pradávna, byly zbraně - mongolské laminované luky, damašské dělové hlavně, apod.

Největšího rozmachu se kompozitům dostalo až ve dvacátém století, např. ve formě asfaltových granulačních směsí, pryže vyztužené černými sazemi, výrobků z pryže a plastů vyztužených skleněnými nebo jinými vlákny aj. V dnešní době se používají matrice na základě různých kovů a keramických materiálů, vyztužené uhlíkovými, kevlarovými a jinými vlákny.

3.1 Definice kompozitu

Výraz „kompozitní“ znamená v překladu „skládající se ze dvou nebo více různých částí“. Jako kompozit se označuje takový materiál, který je složený ze dvou nebo více odlišných materiálů složek. Musí být splněna podmínka, že mají značně odlišné fyzikální vlastnosti. Výsledný materiál má zřetelně odlišné vlastnosti od jeho základních složek.

Pokud se na danou problematiku nahlíží z co nejobjektivnějšího hlediska, lze téměř o každém materiálu prohlásit, že se jedná o kompozit. Uvažují-li se materiály v atomickém nebo molekulárním měřítku, jsou téměř vždy složené z různých atomů a molekul. Velká

skupina pevných materiálů představuje souvislou řadu prostorového uspořádání krystalových mřížek a různých typů struktur, kde na jedné straně stojí například diamant s vysoce systematickou strukturou s meziatomovou vzdáleností uhlíkových atomů 0,1555 nm [1] a na opačné straně například beton skládající se z pojiva v podobě cementu a náhodně uspořádaných pevných částic. Běžné kovy téměř vždy obsahují nějaké nežádoucí nečistoty nebo legující prvky, plasty obsahují malá množství plniv, barviv a dalších přísad pro usnadnění výroby apod. Tyto materiály se obecně nepovažují za kompozity. Proto se často zdůvodňuje označení určitých materiálů jako kompozitních tím, že se změny jejich vlastností dostaví jako výsledek kombinace dvou a více odlišných složek. Tyto změny vlastností budou zvláště patrné, bude-li jedna ze složek v destičkové nebo vlákně podobě, její objemový podíl bude alespoň 5% [10] (v některých literaturách se uvádí hodnota 10% [1]) a její vlastnost bude mnohem výraznější.

Kompozitní materiály se skládají z jedné nebo více nespojitých fází, které jsou ponořeny ve spojitě fázi. Diskontinuitní fáze má obvykle vyšší hodnoty tvrdosti a pevnosti než fáze spojitá a označuje se jako vyztužení nebo také vyztužovací materiál. Spojitá fáze se nazývá matrice. Tvar jednotlivých částic nespojitě fáze se uvažuje jako koule nebo válec, jejich velikost a distribuce řídí konečnou texturu materiálu. Spolu s objemovým podílem určují mezifázový povrch, který je důležitý pro vzájemné působení mezi vyztužením a maticí.

Vlastnosti kompozitního materiálu silně ovlivňují vlastnosti jednotlivých složek, jejich distribuce a interakce mezi nimi. Výsledné vlastnosti mohou být pouze prostým součtem vlastností tvořících složek podle jejich objemových podílů nebo na sebe mohou složky působit synergicky. Při tomto působení jsou výsledné vlastnosti dokonce lepší než vlastnosti, které jsou dosaženy prostým součtem podle objemových podílů. Toto je označováno za jednu z největších předností kompozitních materiálů.

Při popisu kompozitu jako materiálového celku je třeba brát v úvahu také geometrii vyztužení, jak z hlediska tvaru, tak i z hlediska rozložení a orientace v základní spojitě fázi. Všechny tyto faktory jsou důležité pro zjišťování vlastností kompozitů, ale zpravidla nejsou všechny obsaženy v teoretických vztazích. Obecně se za jediný nejdůležitější parametr ovlivňující výsledné vlastnosti celého kompozitu považuje koncentrace. Ta se obvykle uvádí v objemovém nebo hmotnostním podílu. Příspěvek některé složky k vlastnostem kompozitu je zpravidla určován právě tímto parametrem. Je také výhodná pro snadnou kontrolu výrobního procesu a pro úpravu vlastností.

Další charakteristikou je koncentrační distribuce, která informuje o vzájemných prostorových vztazích mezi jednotlivými částicemi. Ty mohou být rovnoměrně rozptýleny v celém objemu a umístěny s pravidelnými odstupy, takže se žádné částice nedotýkají. Nebo mohou vytvářet síť umožňující spojitě propojení všech částic, což může ovlivnit například elektrické vlastnosti.

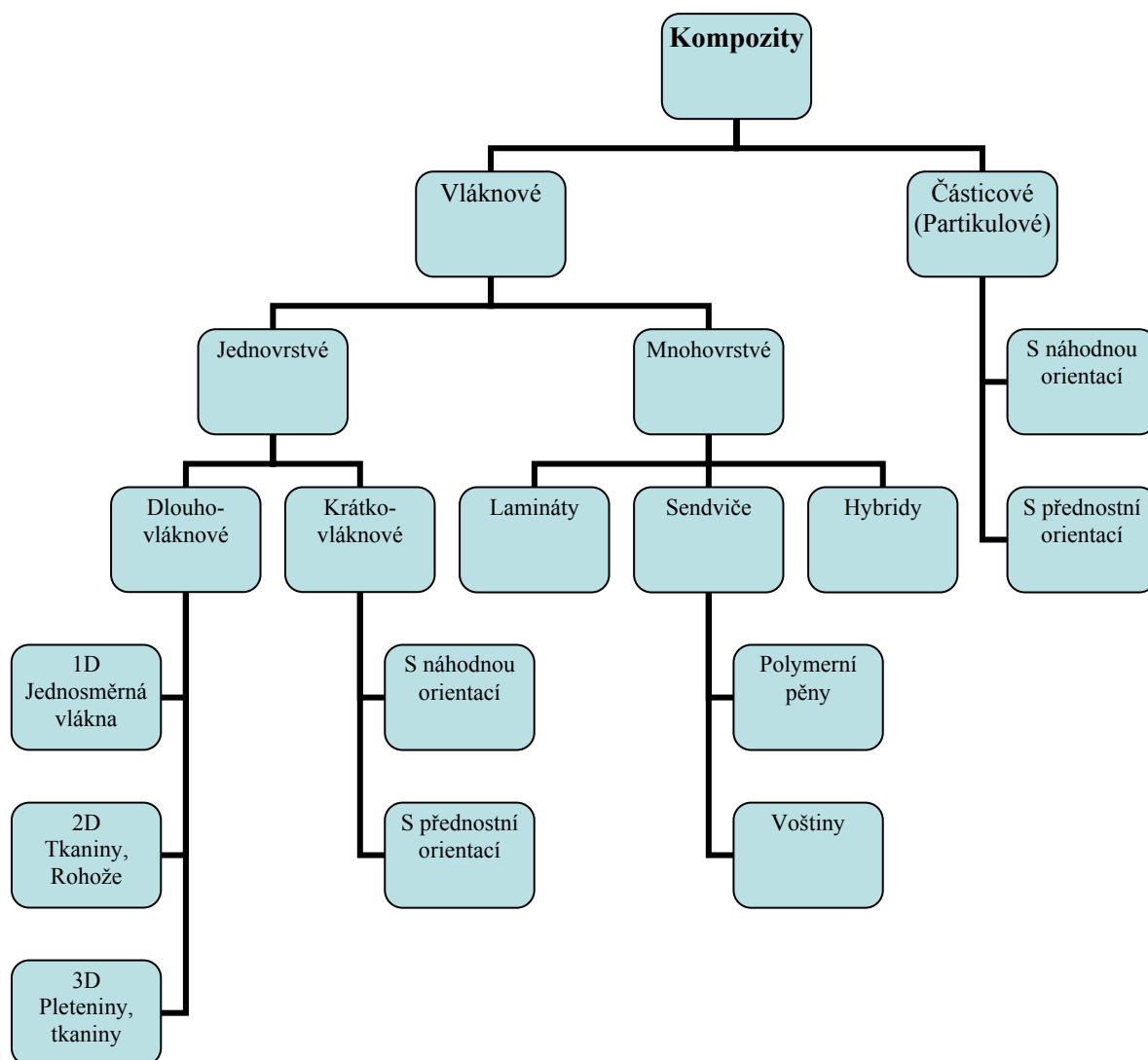
Orientace částic vyztužujícího materiálu v objemu kompozitu ovlivňuje izotropii systému. Pokud mají tyto částice tvar a rozměry ve všech směrech přibližně stejné, chová se kompozit v podstatě jako izotropní materiál, jehož vlastnosti jsou nezávislé na směru. Pokud tomu tak není a rozměry vyztužovacích částic nejsou ve všech směrech stejné, tak se stále může kompozit chovat jako izotropní materiál a to za předpokladu, že jsou vyztužovací částice náhodně orientovány. V ostatních případech může být například vlivem výrobního postupu způsobena jistá orientace vyztužení, která způsobí jistou anizotropii. Zvláštním případem jsou kompozity vyztužené spojitými vlákny, kde může být anizotropie žádoucí.

Nesmírnou výhodou kompozitů představuje možnost měnit jejich elastické vlastnosti a pevnost změnou prostorového uspořádání výtzuže, jejího druhu, poměru mezi obsahem výtzuže a matrice a technologií výroby. Při použití stejných komponent (např. sklo a pryskyřice) lze vytvořit širokou škálu materiálů s odlišnými vlastnostmi. Tohoto nelze u žádného tradičního materiálu, jako je například ocel, prakticky dosáhnout. Jestliže má tedy konstruktér ve své práci použít kompozit a ne tradiční materiály, musí mít dostatečné znalosti o chování a vlastnostech kompozitních materiálů, které chce použít.

3.2 Rozdělení kompozitů

V dnešní době existuje velké množství druhů kompozitních materiálů a nové stále vznikají, a proto je třeba je třídit do skupin. Mechanismus kompozitního působení je závislý na geometrii vyztužujících částic, proto je vhodné je rozřadit podle geometrie reprezentativní jednotky vyztužení. V klasifikaci podle obr.1 je základním rozlišovacím znakem typ částic, tzn. zda je částice vláknová či nikoliv. Z hlediska tvaru mohou být částice kulové, krychlové, čtyřstěnné, destičkové aj.

Vláknem je geometrický útvar, který je charakterizován svojí délkou, která výrazně převyšuje jeho průřezové rozměry.



Obr. 1 Rozdělení kompozitů

3.3 Vláknové kompozity

V technických aplikacích nelze používat přímo samotná vlákna z důvodu jejich malých průřezových rozměrů. Proto se vlákna vkládají do matric a tvoří se vláknové kompozity. Matrice slouží k tomu, aby spojovala výztužná vlákna dohromady, přenášela do nich namáhání a chránila výztužná vlákna proti vlivům okolního prostředí.

Vlákna lze charakterizovat podle jejich délky na krátká a dlouhá. Kompozity s krátkými vlákny krátkovláknové (vyztužené diskontinuitními vlákny) a kompozity s dlouhými vlákny se nazývají dlouhovláknové (vyztužené spojitými vlákny).

V krátkovláknových kompozitech je přenosová funkce matrice významnější než v dlouhovláknových. Jiný způsob třídění kompozitů je založen na tom, že délka vlákna ovlivňuje jeho vlastnosti.

V kompozitech s dlouhými spojitými vlákny lze předpokládat, že zatížení působí přímo na vlákna, která jsou ve směru namáhání hlavní nosnou složkou. Toto především platí u vysokomodulových vláken ve velké objemové koncentraci. Porušování tohoto typu kompozitu je určeno především vlákny.

Vláknové kompozity se stávají nejdůležitější třídou kompozitních materiálů pro svoji schopnost dosahovat vysokých hodnot pevnosti. Obecně je známo, že hodnoty pevnosti, které lze u většiny materiálu naměřit, jsou podstatně menší než hodnoty teoretické. Tento rozdíl je přičítán nedokonalostem a vadám materiálu. Jeden ze způsobů zvyšování pevnosti je snižování nebo vyloučení vad. Vlastní pevnost materiálu poškozují zejména takové vady, které mají tvar trhliny umístěné kolmo ke směru zatěžování. U vláken, která mají malé průřezové rozměry, jsou tyto vady minimalizovány. To je také důvod, proč mají vlákna z plastu nebo polymerních materiálů mnohem vyšší pevnost než kompaktní materiál. Technicky nejdůležitější výztužné vlákno se vyrábí z E-skla, protože je poměrně levné. Pozoruhodná jsou svými vysokými hodnotami tuhosti vlákna bórová a aramidová. V dnešní době nabízejí největší rozmanitost v použití vlákna uhlíková.

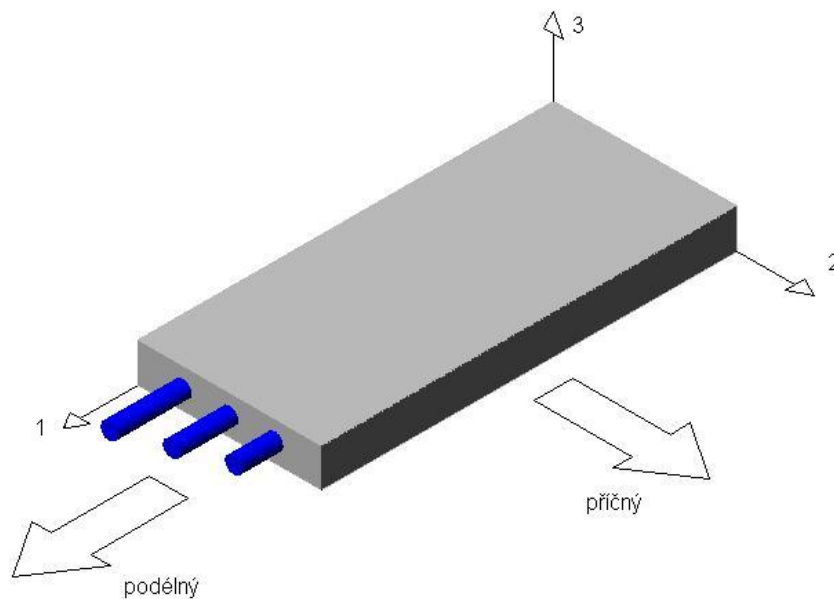
3.4 Dlouhoválnové kompozity

Tyto materiály patří k jedněm z nejstarších a nejvíce rozšířených složených materiálů. Jejich studium a použití jsou velmi rozvinuté, což je dáno rozsáhlými možnostmi obměny jejich struktury a vlastností. Konstruktivní prvky vytvořené z dlouhoválnových kompozitů se skládají z jedné nebo více vrstev (lamin). Každá z těchto vrstev je většinou vytvořena ze stejných složek, ale mohou se lišit v objemovém zastoupení jednotlivých fází, tvarem a strukturou výztuže nebo orientací vláken. Samozřejmě lze také vytvářet i tzv. hybridní (heterogenní) kompozity složené z vrstev o různém složení. Pro správnou analýzu kompozitu jako celku je třeba znát vlastnosti jednotlivých vrstev a pak lze studovat kompozit jako celek. Proto je vhodné začít studiem vlastností a chování jednosměrových kompozitů.

Pod pojmem jednosměrový kompozit se rozumí systém tvořený rovnoběžnými vlákny včleněnými do matrice. Ty pak lze spojovat v určitém pořadí do sebe a vytvářet tak tzv. lamináty s požadovanou tuhostí a pevností. Každá vrstva se nazývá lamina nebo kompozitní vrstva.

Mechanika dlohvláknových kompozitů

Jednosměrové kompozitní vrstvy vykazují obecně ortotropní vlastnosti. Takový materiál má tři vzájemně kolmé roviny symetrie materiálových vlastností. Vlastnosti materiálu v každé z rovin jsou dané strukturou výztuže ve zmíněné rovině. Tyto roviny jsou zároveň rovinami symetrie struktury kompozitu. Roviny jsou určeny dvojicemi ortogonálních os popsanych číslicemi 1,2,3 viz. obr.2. Tyto osy se běžně nazývají materiálové osy. Směr podélný s vlákny osa 1. Směr kolmý na vlákna je směr příčný, to znamená libovolný směr v rovině tvořené osami 2,3.



Obr. 2 Ortogonální osy

Z toho plyne, že vrstva má největší pevnost v podélném směru a vlastnosti v obou dalších směrech jsou přibližně stejné. Jestliže vlastnosti materiálu nevykazují žádné roviny symetrie, jedná se o materiál anizotropní. Naopak pokud má materiál vlastnosti shodné ve všech směrech (nejsou funkcí orientace), jedná se o izotropní materiál. To znamená, že všechny roviny procházející jedním bodem tělesa vyrobeného z tohoto materiálu jsou rovinami symetrie materiálových vlastností. V teorii laminátů je známý pojem kvaziizotropní, který znamená, že daný laminát nebo kompozit je možno v makroskopickém měřítku (celý dílec) považovat za izotropní v rovině vláknité výztuže. Mikroskopicky je však takový materiál anizotropní.

Známé teorie výpočtů odezvy vláknových kompozitů na mechanické zatížení umožňují zjišťovat jejich tuhost, pevnost, tepelnou roztažnost aj. Jestliže jsou známy

vlastnosti složek, jejich objemové zastoupení, geometrie a prostorové uspořádání výztuže a adheze mezi jednotlivými složkami. Obvykle se studium mechaniky kompozitů rozděluje na mikromechaniku a makromechaniku.

Mikromechanika se zabývá výpočtem vlastností laminy (kompozitní vrstvy) z odpovídajících vlastností jednotlivých komponent a z informací o geometrii, orientaci, uspořádání, mezifázové adhezi a objemovém podílu výztuže. Mikromechanické výpočty jsou nejdůležitější při odlaďování materiálových vlastností a umožňují vypočítat limitující faktory při zlepšování vlastností kompozitů. Srovnání experimentálně získaných vlastností s hodnotami zjištěnými analyticky umožňuje posouzení, zda daný kompozit již dosáhl svého maxima užitných vlastností nebo zda jeho potenciál ještě nebyl zcela vyčerpán.

Makromechanika umožňuje na základě znalostí mechanických a materiálových vlastností jednotlivých vrstev (lamin) spočítat mechanické vlastnosti mnohvrstevnatého kompozitu (laminátu) z údajů o počtu, orientaci a uspořádání vrstev. Přitom je zanedbávána mikrostruktura kompozitu (tj. heterogenita) a jednotlivé vrstvy jsou považovány za homogenní a ortotropní. Makromechanické výpočty se vždy vztahují ke konkrétnímu tvaru dílce či kompozitního profilu a převládajícímu způsobu jeho namáhání. A navíc umožňují eliminovat předem varianty nevhodné pro řešení konkrétního problému a navrhnout optimální počet vrstev a jejich orientaci vůči působícímu, zpravidla víceosému namáhání.

Hookův zákon pro ortotropní materiály

Ortotropní materiály mají svoje specifické vlastnosti a tedy i vztahy mezi napětím a deformací. Stav napětí v daném bodě tělesa je obecně popsán devíti složkami tenzoru napětí σ_{ij} . Tomuto tenzoru odpovídá tenzor deformace rovněž s devíti složkami ϵ_{ij} .

Experimentálně bylo zjištěno, že většina materiálů užívaných pro konstrukční účely, má lineární vztah mezi deformací a vyvolaným napětím, protože mez úměrnosti těchto materiálů leží výše, než je použité konstrukční napětí. Navíc po ukončení působení napětí nebude namáhané těleso deformováno a vrátí se do svého původního stavu bez pozorovatelných známek o tom, že bylo zatěžováno. O takovém tělese lze říci, že bylo vytvořeno z lineárně elastického materiálu. Většina materiálů vykazuje lineárně elastické vlastnosti pouze pro malé deformace. Rozsah použití velké většiny materiálů, užívaných v inženýrské praxi, leží právě v oblasti malých deformací.

Nejobecnější lineární vztah mezi napětím a deformací je znám pod názvem Hookův zákon, který lze matematicky vyjádřit takto:

$$\sigma_{ij} = E_{ijkl} \varepsilon_{kl} \quad (1)$$

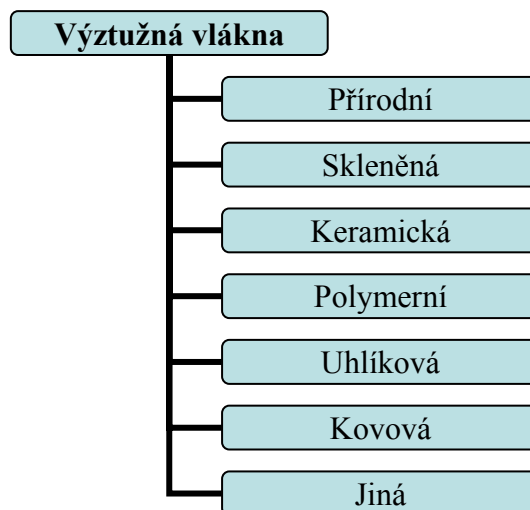
kde složky tenzoru čtvrtého řádu E_{ijkl} se nazývají moduly pružnosti. Ze vztahu (1) vyplývá, že každá složka tenzoru napětí je vyjádřena devíti složkami tenzoru deformace, takže obecně má tenzor E_{ijkl} 81 modulů pružnosti. Tento tenzor je naštěstí symetrický a podle pravidel symetrie a se sníží počet složek na 21 pro materiály, které nemají žádnou osu souměrnosti, jedná se o anizotropní materiály.

Ortotropní materiály jeví symetrii svých elastických vlastností vzhledem ke dvěma vzájemně kolmým rovinám. Úvahou této symetrie lze snížit počet složek na devět nezávislých konstant pro trojrozměrné ortotropní materiály. Dalšího zjednodušení je možno dosáhnout v případě, že tloušťka kompozitní vrstvy (laminy) je velmi malá a laminu lze tedy považovat za dvojrozměrný útvar. Napěťový stav má potom charakter rovinného napětí a počet nezávislých složek tenzoru napětí a deformace se redukuje na dvě normálové a jednu smykovou složku. Tenzor elastických konstant má potom obecně devět složek, ale v důsledku symetrie ortotropní laminy se počet nezávislých složek redukuje na dva Youngovy a jeden smykový modul pružnosti E a dvě Poissonovy konstanty ν_{ij} , tedy celkem na pět elastických konstant, z nichž pouze čtyři tyto konstanty jsou nezávislé.

Obvykle se jako nezávislé volí tři moduly pružnosti a jeden Poissonův poměr, především z důvodů snadnějšího experimentálního zjištění modulů pružnosti ve srovnání s měřením Poissonova poměru. Počet modulů pružnosti a konstant pružnosti pro izotropní prostředí je, jak pro dvojrozměrný, tak i trojrozměrný případ, stejný a činí pouze dvě nezávislé konstanty. Zvýšený počet elastických modulů ukazuje na větší složitost ortotropních problémů. O této problematice pojednává literatura [1], kde je také provedeno potřebné odvození matematických vztahů.

3.5 Materiály výztužných vláken

V současnosti je dispozici široké spektrum odlišných vláken použitelných pro kompozity a nové typy neustále přibývají. Největší rozvoj lze předpokládat v oblasti polymerů. Přehled materiálů používaných na výrobu vláken je uveden na obr. 3.



Obr. 3 Rozdělení výztužných vláken podle materiálu

a) Přírodní minerální vlákna

Minerální vlákna mají obdobné pevnostní a tepelné vlastnosti jako vlákna skleněná, avšak jsou levnější, například čedičová.

b) Organická přírodní vlákna

Přírodní vlákna jsou získávána pěstováním vybraných druhů rostlin, například bavlny, lnu, konopí a juty. Přírodní vlákna se používají jako výztuž tvarovaných velkoplošných dílů pro interiéry osobních automobilů (dřevěné piliny, obsahující vlákna celulózy). K jejich výhodám patří nízká cena a biologická odbouratelnost.

c) Skleněná vlákna

Skleněná vlákna se vyrábějí tažením z taveniny směsi oxidů křemíku s dalšími přísadami, které ovlivňují výsledné vlastnosti vláken. Pro kompozitní materiály se používají vlákna ze skloviny E, S, C a ACR a křemenná vlákna. Pevnost kompozitů s výztuží ze skleněných vláken je závislá na jejich průměru, kompozity s vlákny s menším průměrem mají vyšší hodnoty pevnosti v tahu, naopak kompozity s vlákny s větším průměrem mají vyšší pevnost v tlaku. Skleněná vlákna viz. obr. 4b se často používají jako výztužný materiál do kompozitů, protože mají vysokou pevnost a jsou ekonomicky výhodná.

d) Vlákna z keramických materiálů

Keramická vlákna mají oproti uhlíkovým nebo polymerním vláknům větší hustotu, ale jejich hlavní předností je výborná tepelná a chemická odolnost.

Keramická vlákna se dělí na oxidová a neoxidová. Pro výrobu vláken se používají SiC, Al_2O_3 , ZrO_2 , aj. Příklad mikroskopicky zvětšených keramických vláken je uveden na obr. 4d.

e) Whiskery

Whiskery jsou monokrystaly ve tvaru vláken s velmi malým průměrem okolo 1 μm . Mají vysokou pevnost způsobenou minimem mřížkových poruch. Whiskery mohou být kovové, keramické nebo uhlíkové. Z SiC se vyrábějí whiskery vhodné pro vyztužování kovových matic na bázi Al a Ti. Například z Al slitin vyztužených SiC whiskery se vyrábějí písty spalovacích motorů pro závodní stroje.

f) Polymerní vlákna

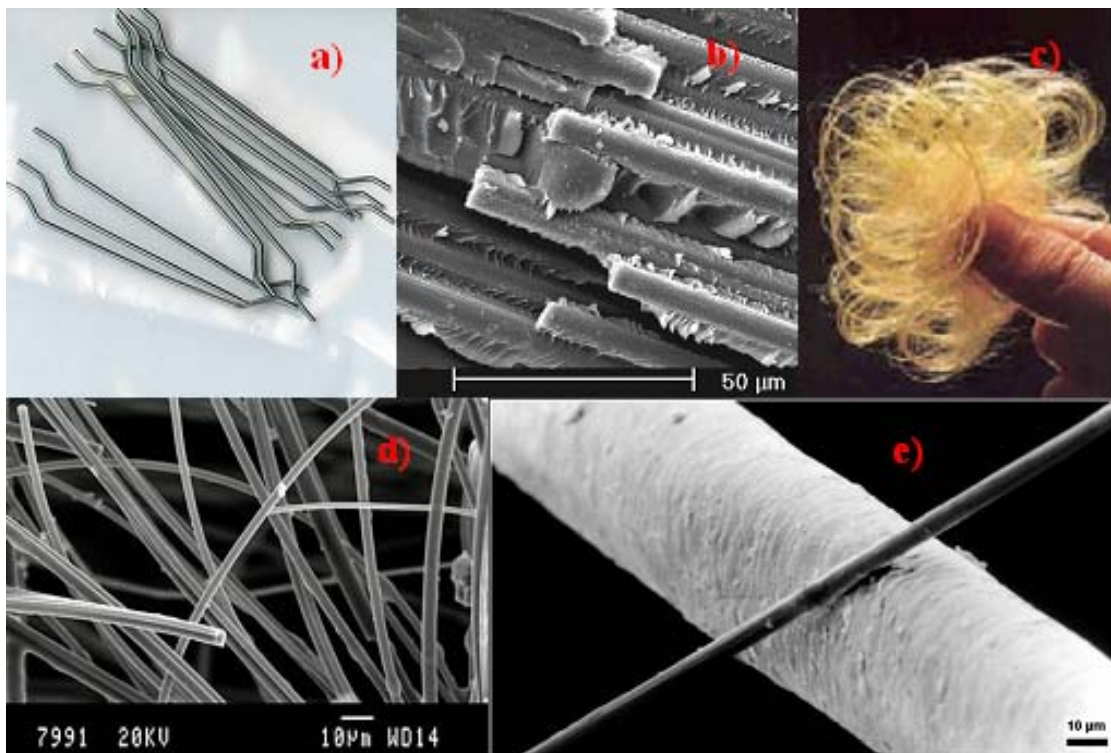
Polymerní vlákna vynikají velice příznivou objemovou hmotností a měrnou pevností. Jejich nevýhodou je citlivost vůči působení vody a velká citlivost na ultrafialové záření. Nejvýznamnějším polymerním vláknem je aramid, známý pod obchodními názvy různých variant jako Kevlar (obr. 4c), Nomex, aj. Aramidová vlákna se používají jako vyztužný materiál pro pneumatiky, brzdové obložení, ochranné oděvy (proti horku nebo jako balistická ochrana), aj.

g) Uhlíková vlákna

Uhlíková vlákna se pro svoje specifické vlastnosti, kterými jsou vysoká pevnost, nízká hmotnost, chemická a teplotní odolnost, používají na výrobu kompozitů v odvětvích jako strojírenství, letectví, kosmonautika a automobilový průmysl. Existuje mnoho variant uhlíkových vláken jako vysokopevná, vysokomodulová, aj. Na obr. 4e je zobrazeno porovnání velikostí uhlíkového vlákna a lidského vlasu.

h) Kovová vlákna

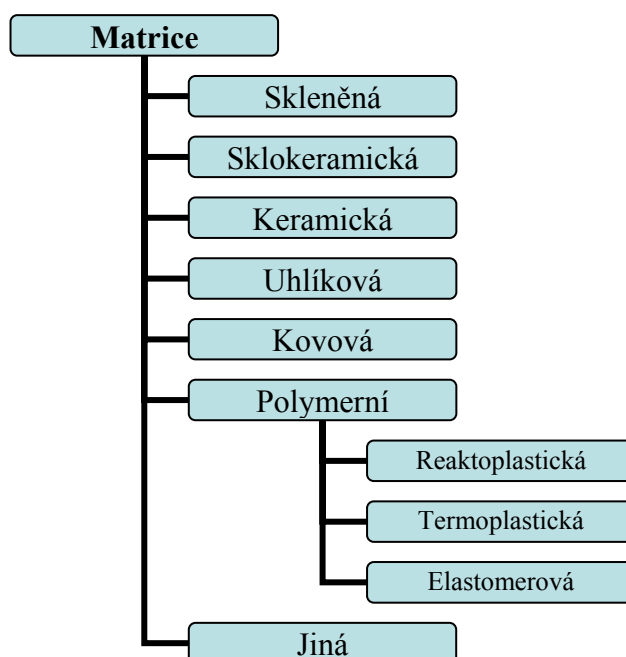
Kovová vlákna se vyrábějí tažením za studena – kujné kovy (ocel, měď) nebo za tepla – křehké kovy (wolfram, molybden). Kovovými vlákny lze vyztužovat polymerní, keramické nebo kovové matrice. Jedná se o nejrozšířenější materiál pro výrobu vláken. Příklad kovových vláken používaných jako vyztuž v kompozitních materiálech je na obr. 4a.



Obr. 4 Vlákna a) kovová [7], b) skleněná [16], c) kevlarová , d) keramická [5], e) uhlíková v porovnání s lidským vlasem [21]

3.6 Materiály matric

Jako matrice pro vláknové kompozity lze použít velké množství různých materiálů, jejich přehled je uveden na obr. 5.



Obr. 5 Rozdělení matric podle materiálu

a) Keramické a skleněné matrice

Keramické matrice si ponechávají dobrou pevnost v tahu a chemickou odolnost i při vysokých teplotách, kterým nejsou kovové matrice schopné odolávat. Kompozity s keramickou maticí i keramickými výztužnými vlákny dosahují vyšších hodnot lomové houževnatosti než monolitická keramika. Při výrobě kompozitů s keramickou maticí se uplatňuje především prášková metalurgie.

b) Uhlíkové matrice

Pro výrobu náběžných hran křidel raketoplánů se používá uhlík – uhlíkový laminát. Tento materiál vyniká vysokou tepelnou odolností a nízkým součinitelem teplotní roztažnosti, není tak křehký jako keramika, ale postrádá odolnost proti nárazu.

c) Kovové matrice

Oproti nejčastěji používané polymerní maticí mají kovové matrice některé specifické vlastnosti – tepelnou odolnost, tepelnou a elektrickou vodivost a tvárnost. Nejrozšířenějšími materiály kovových matrice jsou hliník a titan, používají se však i jejich slitiny nebo jiné kovy.

d) Polymerní matrice

Pro výrobu kompozitů se spojitými vlákny se nejčastěji používají polymerní matrice reaktoplastické nebo termoplastické. Při snaze o recyklovatelnost kompozitních dílů vyráběných ve velkých sériích dochází k nahrazování reaktoplastů termoplasty. Většinou se uplatňují levné typy termoplastů (polypropyleny nebo polyamidy) vyztužené skleněnými vlákny. U reaktoplastických matic se recyklují pouze drahá uhlíková nebo polymerní vlákna. Polymerní matrice nabízejí širokou škálu možností jejich využití pro technické aplikace, protože existuje nepřeberné množství typů polymerů, které se liší svými vlastnostmi. Téměř vždy lze najít takový polymer, který přesně splní dané požadavky, ale některé druhy polymerů mají vysokou cenu.

4. VYUŽITÍ KOMPOZITŮ PRO AUTOMOBILY

Kompozitní materiály se uplatňují v široké řadě odvětví a tedy i v automobilovém průmyslu. Jejich použití je zatím v omezené míře a je dané cenou a dostupností materiálů. Protože jako u všech výrobků, i u automobilů, je jejich uplatnění na trhu dané poměrem ceny a užitných vlastností a někdy pouze samotnou cenou. To je jeden z důvodů, proč se kompozitní materiály nejdříve používaly hlavně v letectví, kosmonautice a ve vojenském průmyslu, tj. v oblastech, kde je dostatek finančních prostředků a kde jsou na zařízení kladeny ty nejvyšší nároky.

Vyšší cena kompozitních materiálů je způsobena především jejich nákladnější výrobou oproti tradičním materiálům. S rozvojem technologií výroby cena klesá a kompozity se mohou uplatňovat ve více odvětvích. Pro příklad v civilním dopravním letounu Boeing 747 bylo použito jen asi 1% kompozitních materiálů, v dalším typu Boeing 777 je to již 12% a v nejnovějším Boeingu 787 "Dreamliner" je drak letounu vyroben až z 50% kompozitů [20]. Tato čísla nejlépe vypovídá o rozvoji použitelnosti kompozitů pro dopravní prostředky.

U silničních dopravních prostředků je situace obdobná. Stále se zvyšuje podíl kompozitních struktur v jejich konstrukci, ale procento zatím není vysoké. V letectví se tyto materiály začaly uplatňovat dříve a bylo jich tam z různých důvodů více potřeba.

Kompozitní materiály mají vyšší měrný modul pevnosti a vyšší měrnou pevnost z čehož plyne, že jejich použitím lze dosáhnout snížení hmotnosti konstrukce. U dopravních prostředků to vede ke snižování spotřeby paliva, což se příznivě odrazí na zmenšeném zatěžování životního prostředí.

V automobilovém průmyslu se velkou měrou uplatňují dlouhvláknové kompozity, protože poskytují velký rozsah vlastností při mezních orientacích vláken, umožňují volit tuhost a pevnost právě takovou, jaká je pro danou konstrukci požadována (lze volit směr orientace vláken mezi 0 – 90°).

Na obr. 6 jsou uvedeny příklady skutečných aplikací kompozitních materiálů na vybrané části silničních vozidel, konkrétně se jedná o části brzd, karoserie a nádrží na CNG.



Obr. 6 Příklady kompozitních částí automobilu a) brzdový kotouč [19], b) brzdové segmenty [3], c) nádrž na CNG [18], d) zpětné zrcátko [15]

Tab. 1 zobrazuje vybrané možnosti použití kompozitních materiálů v automobilech. Tento výčet není úplný, protože není možné zjistit údaje od všech výrobců vozidel, kde všude a jaké kompozity používají. Jedná se o přehled, v jakých částech automobilu se kompozity uplatňují.

Možnosti využití kompozitů rostou úměrně s novými technologiemi jejich výroby a zpracování. Některé kompozitní materiály jsou navrženy jednotlivými výrobci vozidel přímo pro daný účel a způsob použití a jsou chráněny výrobním tajemstvím.

Historie použití kompozitních materiálů v automobilech, vyjma pneumatik, sahá do padesátých let dvacátého století. Typickým představitelem byl automobil Citroen, u kterého se na výrobu střechy začal používat sklolaminát. Rozvoj kompozitních materiálů v automobilech je úzce provázán s jejich nasazením v závodech.

Tab. 1 Použití kompozitů v automobilech

| Část automobilu | Typ kompozitu |
|---|--|
| boční obložení dveří | PUR pěna + krátkovláknové materiály, skleněné rovingy nebo rohože ze skleněné vlny |
| odkládací police a přihrádky | |
| nosník přístrojové desky | |
| kryty motoru | |
| podběhy kol | |
| nárazníky, zrcátka, kapoty | Carbon - vlákno |
| dveře | laminát |
| přední deformační díl | plast + ocelový nebo hliníkový plech |
| výztužné vložky zpevňující karoserii automobilu | Polyamid + plech |
| části nástaveb užitkových vozidel | Sklolaminát, sendviče a další |
| blatníky, obal řídicí jednotky | dlouhými vlákny zpevněný termoplast |
| listová pera | dlohovláknové kompozity |
| brzdové kotouče | keramický kompozit vyztužený uhlíkovými vlákny |
| nádrž na CNG | skelná vlákna + epoxidová pryskyřice |
| pneumatiky | dlohovláknové kompozity s kovovou příp. textilní výztuží a elastomerovou maticí |

5. PNEUMATIKA JAKO KOMPOZIT

Kolo vynalezli před více než 5000 lety pravděpodobně Sumerové. V průběhu dalších tisíciletí bylo postupně vylepšováno. K zatím nejvýznamnějším změnám kola došlo ve druhé polovině 19. století: roku 1845 byl Robertu Williamu Thomsonovi udělen v Anglii patent na „vzduchovou hadici“, předchůdce moderní pneumatiky. Pneumatiku podruhé vynalezl v roce 1888 J.B. Dunlop a ta začala rychle dobývat svět [12].

Na automobilu byla pneumatika poprvé použita v roce 1896 (první samohybný vůz byl sestaven v roce 1769 francouzským inženýrem E. Cugnotem) [17]. Použitím pneumatik na automobilech samozřejmě rostly i nároky na ně kladené. Pro první vyrobenou pneumatiku byl jako výztužný materiál použit irský len, který byl později nahrazen bavlnou a v roce 1923 byl vyvinut kord na bázi regenerované celulosy, obecně nazývaný rayon. Ocelový kord se poprvé objevil v roce 1937 a během druhé světové války byl zaveden polyamidový kord u pneumatik určených pro vojenské účely, po skončení války i pro civilní sektor. Dalším významným materiálem pro kordy pneumatik je aramid, který se začal používat v roce 1976.

S rozvojem výztužných materiálů se paralelně rozvíjely i ostatní části pneumatiky. Důležitým mezníkem byl objev vulkanizace přírodního kaučuku sírou v roce 1839. První plnohodnotné pneumatiky obsahující pouze syntetický kaučuk byly vyrobeny až v roce 1943.

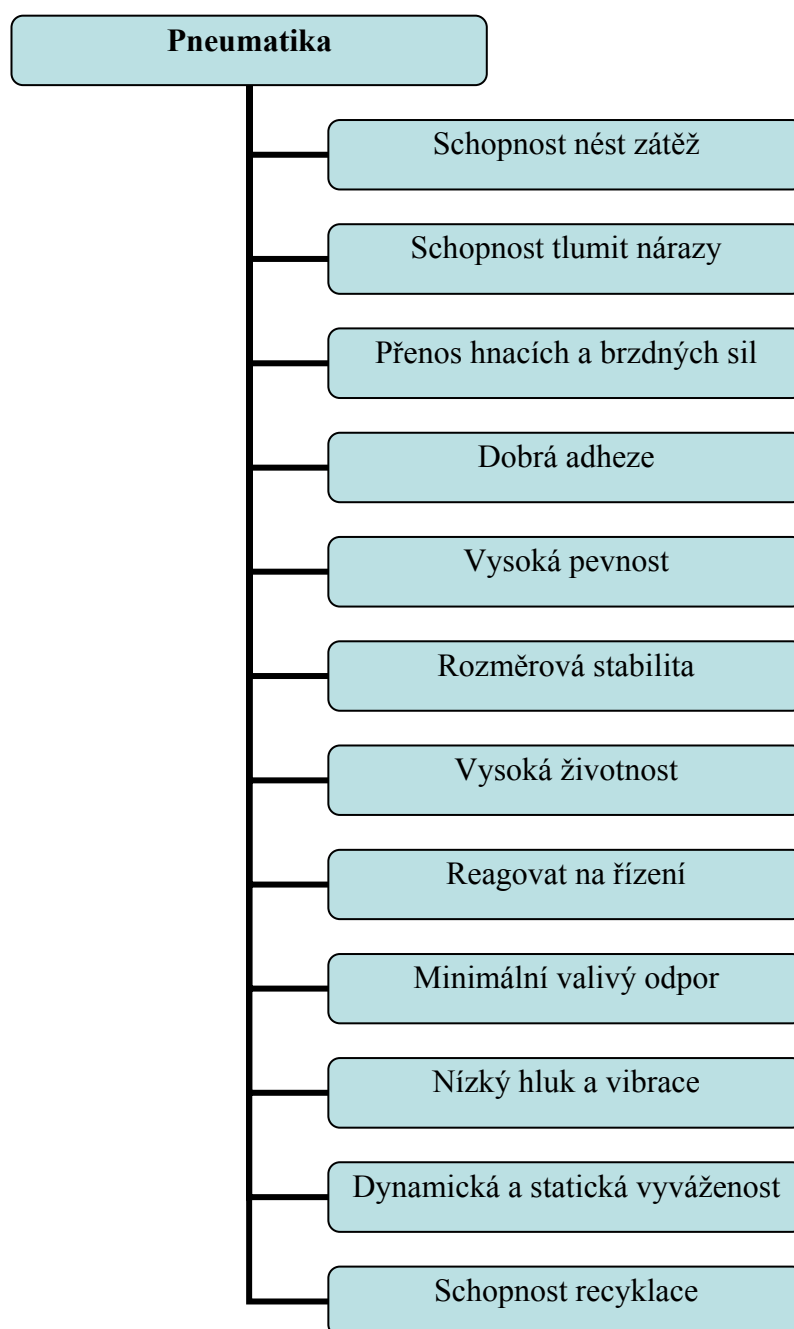
Konstrukce pneumatiky prošla velice dramatickým vývojem od „nahuštěné hadice“ až po dnešní moderní pneumatiky závodních vozidel, které se skládají z velkého počtu částí a na jejichž výrobu je použito velké množství různých gumárenských směsí. V roce 1904 byl jako funkční část pneumatiky zaveden běhoun a o rok později i vzorek pro zlepšení přenosu sil mezi kolem a vozovkou. První radiální pneumatiku vyrobila firma Michelin v roce 1948. Po ní následovala první bezdušová pneumatika. Vývojem samozřejmě prošly a nadále procházejí i ostatní části pneumatiky jako je patka pláště, duše, ventil a ráfek [12].

5.1 Definice pneumatiky

Z geometrického hlediska tvoří pneumatika uzavřený prstenec tzv. toroid. Z hlediska mechaniky se jedná o tlakovou nádobu, jejíž stěny tvoří pružná membrána. Z pohledu chemika je pneumatika vyrobena především ze zesíťovaných a nezesíťovaných

makromolekulárních materiálů a oceli. Strukturálně se jedná o složitý systém s vysokým počtem parametrů. Každý obor má pro pneumatiku svoji definici a nahlíží na ní ze zcela odlišného pohledu. Z tohoto je zřejmé, že se jedná o velice komplikovanou kompozitní část automobilu. Na pneumatiku je kladeno velké množství provozních, funkčních, ekonomických a jiných požadavků (obr. 7).

Podle normy ČSN 64 0001 značí souborový pojem pneumatika plášť. Popř. s duší a vložkou, namontovaný na ráfek a naplněný tlakovým médiem [12].

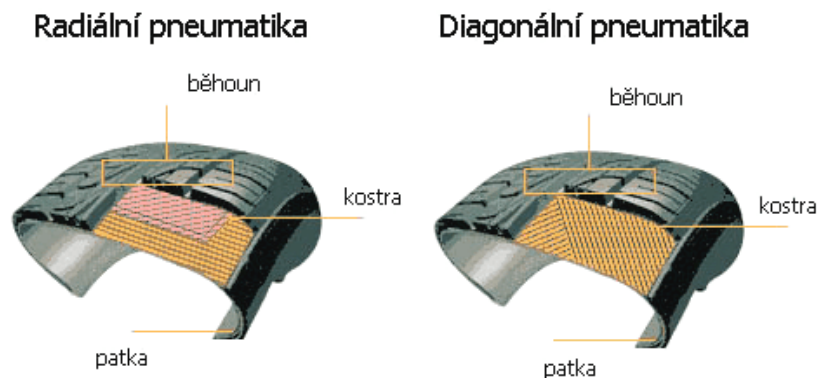


Obr. 7 Požadavky kladené na pneumatiku

5.2 Struktura pneumatiky

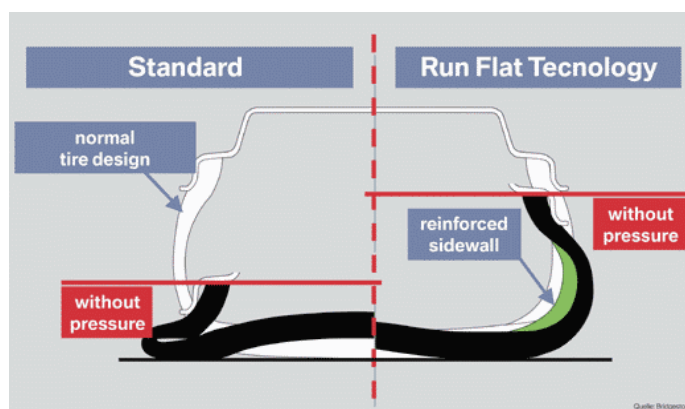
Podle struktury lze pneumatiky rozdělit na radiální a diagonální (obr. 8). Radiální konstrukce se dnes využívá téměř u všech pneumatik osobních, nákladních a zemědělských strojů a vozidel. Diagonální struktura je na ústupu, nicméně stále nalézá uplatnění v těžkých nákladních, zemědělských a průmyslových strojích a vozidlech. Porovnání vlastností jednotlivých konstrukcí pneumatik je podrobně rozebráno v tab. 2.

V průběhu vývoje pneumatik byla vynalezena konstrukce typu bias-belted. To jsou v podstatě pneumatiky diagonálního typu, jejichž kostra je obepnuta pásem obsahujícím dvě nebo více vrstev z neroztažitelného kordu, uspořádaných střídavě v úhlech blízkým úhlům kostry.



Obr. 8 Struktura pneumatiky [2]

Nejnovější konstrukcí jsou „run-flat pneumatiky“ (též samonosné pneumatiky). Run-Flat označuje konstrukci pneumatiky vybavenou jakýmkoliv technickým řešením (například zesílenými bočnicemi, obr. 9), které při montáži pneumatiky na vhodný ráfek umožňuje bez jakéhokoliv dalšího opatření zajistit při defektu základní funkce pneumatiky při rychlosti nejméně 80 km/h a na vzdálenost minimálně 80 km.



Obr. 9 Standardní a Run-Flat pneumatika [13]

Tab. 2 Porovnání radiální a diagonální struktury pneumatiky

| Diagonální versus radiální pneumatika | | |
|---------------------------------------|---|---|
| | Diagonální | Radiální |
| Uložení kordových vložek | U diagonální pneumatiky je několik kordových vložek položeno šikmo od jednoho patkového lana k druhému ve střídavém směru. Počet vrstev záleží na rozměru pneumatiky a na její nosnosti. Vložky jsou vrstveny stejným způsobem na bočnicích i na koruně pneumatiky. Při bližším pohledu na vyztužení je vidět typická plástovitá struktura kordových lanek, která tvoří síť přibližně čtvercových ok. | Kordová vrstva je umístěna v úhlu 90° ke směru pohybu pneumatiky. Na koruně je tato vrstva zakončená pásem koruny, vytvořeným z několika vrstev vyztužených ocelovými nárazníky. Tyto korunní vrstvy jsou položeny na sebe tak, že se překrývají v různých úhlech. V bočnicích jsou jejich vlákna od sebe oddělena a zapuštěna do pryže. Na koruně je síť složena z vláken kostry pokračujících z bočnice a kovových nárazníku. Tato síť je trojúhelníková. |
| Tření mezi kordovými vrstvami | Při podélném trakčním pohybu se každý diamantový tvar volně roztahuje a stlačuje. Tato deformace vyvolává velké tření v místech, kde pryž obklopuje síť. Díky tření dochází ke ztrátám ve formě tepla, což v dlouhodobém měřítku způsobuje zhoršení kvality pneumatiky a zkracuje její životnost. | V bočnicích je smykové napětí mezi paralelními vlákny slabé a pryž je tenká. Díky tomu nevzniká příliš velké tření. Na koruně si trojúhelníková síť zachovává téměř svůj tvar. Struktura je stabilní a při jízdě zůstává v kontaktu s vozovkou. S ohledem na tyto minimální deformace se prodlužuje životnost pneumatiky. |
| Tvar zatížené pneumatiky | Když není diagonální pneumatika zatížena, má při kontaktu s vozovkou kulatý, mírně elipsovitý tvar. Při zatížení se postupně zplošťuje. Čím více je zatížena, tím více jsou krajní části běhounu tlačeny k zemi, zatímco střed běhounu je naopak od povrchu oddalován. Snižuje se tím celková přilnavost. | Nezatížená radiální pneumatika se dotýká povrchu vozovky téměř celou plochou. Styčná plocha pneumatiky je i při nulovém zatížení velká. Při zatížení pneumatiky vzroste styčná plocha pouze podélně, šířku si zachová původní. Běhoun je přitisknut k vozovce celou plochou a poskytuje maximální přilnavost. |
| Jízda přes nerovnosti | Když při jízdě po rovné silnici dojde přejezdem přes nerovnost ke skokovitému přetížení, je styčná plocha pneumatiky velká, po odlehčení se zase zmenší. Pneumatika prochází sérií větších a menších kontaktů. | Když je pneumatika v pohybu, šířka styčné plochy se nemění. Zatížení pneumatiky ovlivňuje pouze délku styčné plochy. Z toho vyplývá, že na šířku této plochy nemají nepravidelnosti na povrchu vozovky žádný vliv. |
| Vliv bočních sil | Vlivem bočních sil nesedí pneumatika kvůli velké tuhosti bočnic na vozovce celou plochou. Jeden okraj běhounu je zmáčknutý a druhý má tendenci se oddělit od vozovky. Výsledkem je značná ztráta původního směru. | Protože jsou bočnice radiální pneumatiky mnohem pružnější, dochází u nich se vzrůstající silou ke stále většímu ohybu. Bočnice funguje jako kloubový závěs mezi kolem a běhounem, takže pneumatika může zůstat celou plochou běhounu na vozovce. Proto drží žádoucí směr i v případě příčných sil. |

5.3 Strukturní části pneumatiky

Plášť radiální pneumatiky se skládá z částí (obr. 10), které jsou následně blíže popsány z konstrukčního hlediska [10, 12].

- Běhoun

Běhoun je vrstva pryže na vnějším obvodu pneumatiky obvykle opatřená vzorkem, která přichází do styku s vozovkou. Jeho hlavním účelem je přenos sil mezi vozidlem a vozovkou.

- Bočnice

Je část pláště, kterou tvoří vrstva pryže na jeho boku a jejímž účelem je chránit kostru pláště před nepříznivými povětrnostními vlivy a mechanickým poškozením.

- Kostrová vložka

Kostra je část pláště tvořená kordovými vložkami většinou zakotvenými kolem patních lan.

- Nárazník

Nárazník se nachází mezi běhounem a kostrou a tvoří ho kordové vrstvy uspořádané tak, že se kordy jednotlivých vrstev kříží. Slouží k vyztužení koruny pláště.

- Patka

Patka je zesílená část pláště dosedající na ráfek a je vytvořena ohnutím kostrových kordových vložek kolem patního lana.

- Patkové lanko

Patkové lanko se vyrábí z vysokopevnostního ocelového drátu. Slouží k ukotvení kordových vložek v patce pláště a vyztužuje ji v obvodovém směru, čímž zaručuje bezpečné usazení pláště na ráfku.

- Boční klínek

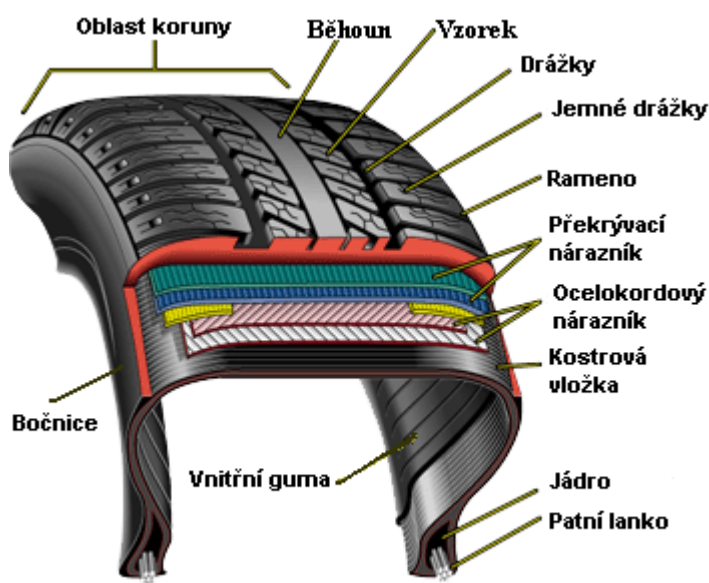
Boční klínek tvoří přechodovou část mezi běhounem a bočnicí.

- Jádro

Je to část pneumatiky, která vyplňuje prostor nad patkovým lanem a slouží ke zvýšení tuhosti této části.

- Vnitřní guma

Vnitřní guma se nachází na vnitřním povrchu pláště a zabraňuje úniku tlakového média.



Obr. 10 Struktura radiální pneumatiky

5.4 Materiálové složení pneumatiky

Aby bylo možné vyrobit kvalitní pneumatiku, musí být zajištěny kvalitní suroviny a polotovary, z kterých bude vyrobena. Základní suroviny a polotovary pro výrobu pneumatik jsou přírodní nebo syntetický kaučuk, různé přísady do kaučukové směsi pro zlepšení adheze mezi výztuží a pryžovou matricí, inhibitory koroze aj, kordy a tkaniny z přírodních nebo chemických vláken, ze skla a oceli.

- Přírodní kaučuk

Tento materiál produkují kaučukodárné stromy a keře rostoucí v tropickém pásmu. Těží se na plantážích ve formě latexu, což je bílá mlékovitá kapalina obsahující asi 30-40% koloidních částic kaučuku. Kaučuk se vysráží kyselinou mravenčí, vypere se ve vodě a suší se teplým vzduchem (bílá krepa) nebo dýmem (hnědá krepa, jinak též uzený kaučuk). Latex se získává

tzv. čepováním, to spočívá v šikmém naříznutí kůry stromu, z tohoto místa pak latex vytéká a sbírá se do sáčků nebo nádob.

- Syntetický kaučuk

Tento materiál je pro pneumatikářský průmysl nepostradatelný nejen pro omezenost zdrojů přírodního kaučuku, ale i pro svoje fyzikálně mechanické vlastnosti, které jsou srovnatelné s přírodním kaučukem. Nejvíce používané druhy syntetického kaučuku jsou butadienstyrenový kaučuk, isoprenový kaučuk, butadienový kaučuk, ethylenpropylenový terpolymer a butylkaučuk. Volba konkrétního druhu syntetického kaučuku závisí na požadovaných vlastnostech a určení pneumatik.

- Saze

Saze se používají jako plnivo, které dává pryži pevnost a tvrdost, zvyšuje odolnost proti opotřebení a zahřívání. U pneumatik pro osobní vozy se zkouší jako náhrada sazí modifikovaný oxid křemičitý a organické silany.

- Antioxidanty

Tyto látky zpomalují stárnutí pryže vlivem atmosférického kyslíku a ozonu. Nejvíce jsou obsaženy v bočnicích pláště.

- Změkčovadla

Změkčovadlo slouží ke zvýšení plasticity za účelem lepší zpracovatelnosti směsi. Používají se různé minerální oleje.

- Vulkanizační činidla

Pro tento účel se používá prášková síra, její obsah bývá 1- 3%. Čím více síry směs obsahuje, tím je tvrdší. Zkoušejí se i jiná vulkanizační činidla jako organické peroxidy nebo vulkanizační pryskyřice.

- Urychlovače vulkanizace

Tyto látky podstatně zkracují dobu vulkanizace, snižují její teplotu a zpomalují stárnutí. Používají se látky obsahující v molekulách dusík a síru. Jejich účinek lze ještě zesílit pomocí tzv. aktivátorů, například oxidu zinečnatého. Vstupní suroviny se kontrolují na obsah těžkých kovů tzv. kaučukových jedů, které

v pryžové směsi vytvářejí různé sloučeniny a tyto narušují řetězce makromolekul.

- Výztužné materiály

Původně se jako výztužná vlákna do pneumatik používal irský len a bavlna, v dnešní době se již tyto materiály nepoužívají a jsou nahrazovány vlákny chemickými, skleněnými (pro konstrukci bias-belted) nebo hutnickými. Kvalita ocelových kordů přímo závisí na vlastnostech oceli, z které jsou vyráběny. Základním polotovarem pro výrobu ocelových kordů je ocelový drát o průměru okolo 6 mm, který je postupně ztenčován protahováním tryskami z tvrdého kovu s přesně definovanými rozměry. Součástí technologického procesu je nanesení slabé vrstvy mosazi nebo zinku na povrch drátu při posledním tahu. Tato úprava zvyšuje adhezi mezi kordem a pryží a zvyšuje odolnost proti korozi.

Vulkanizace je fyzikálně chemický proces, kdy působením vulkanizačního činidla nebo tepelné energie dojde k strukturním změnám elastomeru. Kaučuk s lineární strukturou makromolekul se změní na pryž s prostorovým uspořádáním makromolekul. Vulkanizace se provádí za účelem zvýšení fyzikálně mechanických vlastností. Zvyšuje se pevnost a odolnost proti otěru, ale za cenu snížení tažnosti. Vulkanizovaný kaučuk je také méně citlivý na změny teploty. Vulkanizace se provádí jako poslední operace v technologickém postupu výroby pryže a bývá spojena s tvářením polotovaru do jedné operace.

5.5 Kompozitní materiály v pneumatice

Klasickou pneumatiku není možné vyrobit pouze z jednoho materiálu, například oceli nebo samotné pryže. Pneumatika vyrobená pouze z oceli by byla sice velice pevná, ale byla by těžší, nadměrně by opotřebovávala vozovku, měla by menší adhezi s vozovkou a nesrovnatelně méně by tlumila rázy od nerovností na vozovce. Pneumatika vyrobená pouze z elastomeru by neměla dostatečně velkou pevnost a tuhost. Podobně je možné porovnat i další materiály, ale nakonec bude zjištěna nutnost použití polykomponentních materiálů v konstrukci pneumatik. Proto se v pneumatikách s výhodou využívají dlouhovláknové kompozity.

Kombinací pevných výztužných vláken a pružné matrice lze získat materiál, který má dobré pevnostní vlastnosti s možností řízení jejich směru volbou směru uložení vláken. Zmíněný materiál je schopný dobrého tlumení, odolný proti porušování pro svoji

schopnost zpomalovat nebo dokonce zastavovat růst trhliny na rozhraní výztuže a základního materiálu.

V pneumatikách se kompozitní materiály používají na nosné kordové vložky, které jsou tvořeny jednotlivými vrstvami vedle sebe uspořádaných textilních nebo ocelových vláken zavulkanizovaných do gumárenské směsi. Počet vrstev se volí podle účelu a požadavků, které budou na pneumatiku v provozu kladeny. Také překrývací nárazník a ocelokordový nárazník tvoří kompozitní materiály, které jsou obdobné konstrukce jako nosné kordové vložky. I materiál v oblasti patních lan lze považovat za kompozit.

Výsledné vlastnosti kompozitu závisí na soudržnosti systému kord – elastomer, tzn. adheze matrice k vláknům. Pro získání co možná nejlepší adheze pryže k vláknům se používají speciální činidla, které tyto vlastnosti zlepšují. V této oblasti se rozeznávají dva základní směry. Jeden z nich je impregnace kordových materiálů látkami, které zvýší jejich soudržnost se základním materiálem. Druhý směr spočívá v přidání činidel zvyšujících adhezi do gumárenské směsi. V praxi se používají oba uvedené způsoby. Na tyto systémy jsou kladeny následující požadavky: rychlý účinek, odolnost proti únavě vlivem statických nebo dynamických účinků, odolnost proti tepelné únavě, z důvodu zahřívání pneumatiky při výrobě i provozu a v neposlední řadě snadná aplikace. Výše uvedené skutečnosti mají zásadní vliv na bezpečnost provozu pneumatik, protože porušením adhezního spojení mezi kordovými vlákny a pryží dochází ke tření, které produkuje teplo a to vede k nadměrnému zahřívání a následné destrukci pneumatiky. Tento problém se více týká ocelových kordů, protože u kordů textilních nebo syntetických bývá zaručeno dobré spojení mezi vlákny a pryží.

6. EXPERIMENTÁLNÍ STANOVENÍ MATERIÁLOVÝCH CHARAKTERISTIK

Experimentální modelování představuje soubor činností konaných za účelem zjištění vlastností daného materiálu provedením zkoušek na vhodně zvolených vzorcích. Experimentální modelování má své pevné místo při hledání vhodného materiálu pro konstrukci součástí dopravních prostředků a dalších zařízení. Experimenty lze také využít při ověřování vhodnosti zvoleného materiálu a při hledání výhodnější alternativy k dosud používanému materiálu.

Zjištěné materiálové charakteristiky se používají pro analytické výpočty a návrhy skutečných konstrukcí nebo jako jedny ze vstupů do výpočtového modelování pro návrhy konstrukcí pomocí MKP počítačových programů. Pro tyto účely je třeba znát materiálové charakteristiky v celém rozsahu zatížení.

Náplní diplomové práce je provedení experimentálního modelování vybraných vzorků dlouhovláknových kompozitů a následná aplikace zjištěných závislostí jako vstupů do výpočtového modelování vybraných kompozitních prvků pláště.

Zkoušky pneumatik lze rozdělit do několika skupin. Rozdělení vychází z toho, zda se pneumatika zkouší jako celek nebo jsou z ní odebrány vzorky, které slouží ke stanovení parametrů vybraných částí pneumatiky, v tomto případě se jedná vždy o zkoušky laboratorní. Zkoušení pneumatik jako celku se dělí na zkoušky silniční, kdy se měření provádí přímo na vozidle nebo za použití dynamometrického přívěsu a zkoušky laboratorní, příklad zařízení tzv. statický adhezor.

Pro stanovení vstupů do výpočtového modelování se používají zkoušky účelově oddělených částí pneumatiky. Provádějí se také zkoušky samostatných elastomerů nebo výztužných vláken a zkoušky pro stanovení adheze výztužných vláken v elastomerové matici.

Pro potřeby diplomové práce budou provedeny zkoušky v tahu vybraných kompozitních vzorků a samostatných elastomerů. Kompozitní vzorky svými geometrickými a materiálovými parametry reprezentují skutečné kompozitní materiály vyskytující se v automobilových pneumatikách.

6.1 Zkouška kompozitů jednoosým tahem

Statická zkouška jednoosým tahem (obr. 11) je jednou z nejjednodušších a nejčastěji prováděnou materiálovou mechanickou zkouškou. Provádí se za účelem zjištění modulu pružnosti, pevnosti v tahu, meze kluzu, tahového diagramu, aj.



Obr. 11 Vzorek upnutý v trhacím stroji

Obr. 12 Vzorky EE3 a EE1 před experimentem

Pro experimentální měření provedené v materiálové laboratoři DFJP v Pardubicích bylo k dispozici celkem deset typů vzorků kompozitního materiálu (obr. 12). Od každého druhu kompozitu bylo k dispozici několik kusů vzorků. Jednalo se o vzorky jednovrstvé a dvouvrstvé s různým úhlem sklonu kordů a výztuží tvořenou ocelovým drátem (obr. 14) nebo ocelovým lankem spleteným ze čtyř filamentů (obr. 13). Informace o geometrických parametrech vzorků se nacházejí v tab.3. Zkouška v tahu byla provedena běžným způsobem jako u tradičních materiálů (ocel), pro které je stanovena normou. Některé části zkoušky byly upraveny pro potřeby tohoto specifického typu dlouhovláknových kompozitů, pro které nejsou tyto zkoušky stanoveny normou a ani nejsou k dispozici speciální stroje. Normativně nejsou stanoveny ani rozměry a tvar zkušebních vzorků pro tahovou zkoušku. U vzorků dlouhovláknových kompozitních materiálů, které jsou na rozdíl od tradičních isotropních materiálů ortotropní, záleží i na směru uspořádání výztužných vláken ke směru působícího zatížení, což se projeví změnou v naměřených charakteristikách. Rozměry a tvar vzorků byly převzaty z [10]. Diplomová práce se v některých dalších částech zabývá návrhem a zobecněním experimentálního měření dlouhovláknových kompozitů s kovovou výztuží a nelineární maticí.



Obr. 13 Vzorek vyztužený lankem



Obr. 14 Vzorek vyztužený drátem

Tab. 3 Parametry kompozitních vzorků

| Vzorek | Počet vrstev | Typ kordu | Průměr kordu [mm] | Rozložení kordu | Úhel kordu | Dostava [ks/m] | Šířka vzorku [mm] |
|--------|--------------|-----------|-------------------|-----------------|---|----------------|-------------------|
| AA1 | 2 | Lanko | 2+2x0,32 | Symetrické | ± 45° od podélné osy symetrie | 860 | 24 |
| BB1 | | Drát | 0,94 | | | 710 | |
| AA2 | | Lanko | 2+2x0,32 | | | 860 | 14 |
| BB2 | | Drát | 0,94 | | | 710 | |
| EE1 | | Lanko | 2+2x0,32 | Nesymetrické | + 22,5°/+ 67,5° od podélné osy symetrie | 860 | 24 |
| FF1 | | Drát | 0,94 | | | 710 | |
| EE3 | | Lanko | 2+2x0,32 | | | 860 | 8,5 |
| FF3 | | Drát | 0,94 | | | 710 | |
| F | 1 | Lanko | 2+2x0,32 | | 45° od podélné osy symetrie | 860 | 14 |
| G | | Drát | 0,94 | | | 710 | |

Dostava je parametr podávající informaci o počtu kordů na jeden metr délky kordové vložky. Lze z něho určit rozteč jednotlivých kordů. U výztuže tvořené lankem je rozteč 1,16 mm a u výztuže tvořené drátem je rozteč 1,41 mm. Výraz 2+2x0,32 mm u průměru kordu pro lankovou výztuž znamená, že jsou vždy dva filamenty spleteny do sebe a pak následně dvě tyto dvojice spleteny do sebe, z čehož vznikne lanko spletené ze čtyř filamentů.

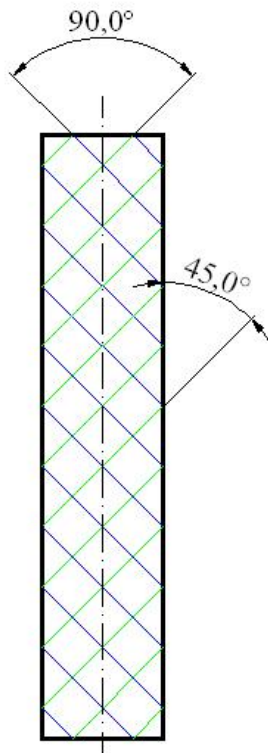
Vzorky byly ve tvaru obdélníku o délce 118 mm, upínací délka mezi čelistmi stroje byla 92 mm. Šířka vzorků byla různá viz. tab. 3. Vzorky byly vyřezány z plotniček vyrobených speciálně pro tento účel. Vlastní řezání bylo realizováno pomocí vodního paprsku, tato metoda byla zvolena proto, aby se zabránilo tepelnému ovlivnění okrajů vzorků, ke kterému by mohlo dojít při jiných způsobech řezání. Tepelné ovlivnění vzorků je nežádoucí, protože by došlo ke změnám mechanických vlastností především u elastomerů. Ovšem ani vodní paprsek není zcela bezproblémový, protože elastomer má podstatně menší pevnost než ocelová výztuž a je tedy více odebíráán při řezání než ocel. To způsobuje na stranách vzorků vruby (obr. 15), které působí jako koncentrátoři napětí a mohou ovlivňovat naměřené charakteristiky. Vznik vrubů na okrajích vzorků omezuje přesnost dosahovaných rozměrů vzorků.

Pro snížení vlivu nevhodného tvaru okraje vzorku a zvýšení přesnosti rozměrů navrhuji vyzkoušet obroušení okrajů vzorků vysokootáčkovou bruskou. Broušení se musí provést opatrně s malou hloubkou úběru materiálu, aby nedošlo k tepelnému ovlivnění vzorku. Je třeba provést další experimenty a porovnání charakteristik a lomů u obroušených a neobroušených vzorků.

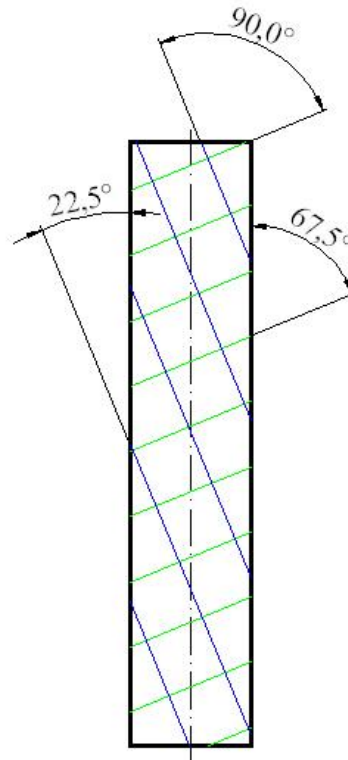


Obr. 15 Detail okraje vzorku

Na obr. 16a je zobrazeno symetrické uspořádání kordů v matrici a na obr. 16b je zobrazeno nesymetrické uspořádání kordů v matrici. Oba obrázky představují dvouvrstvé vzorky, kde každá barva představuje jednu vrstvu kordů. Jsou zde také zakótovány úhly, které svírají kordy s podélnou osou symetrie vzorku.



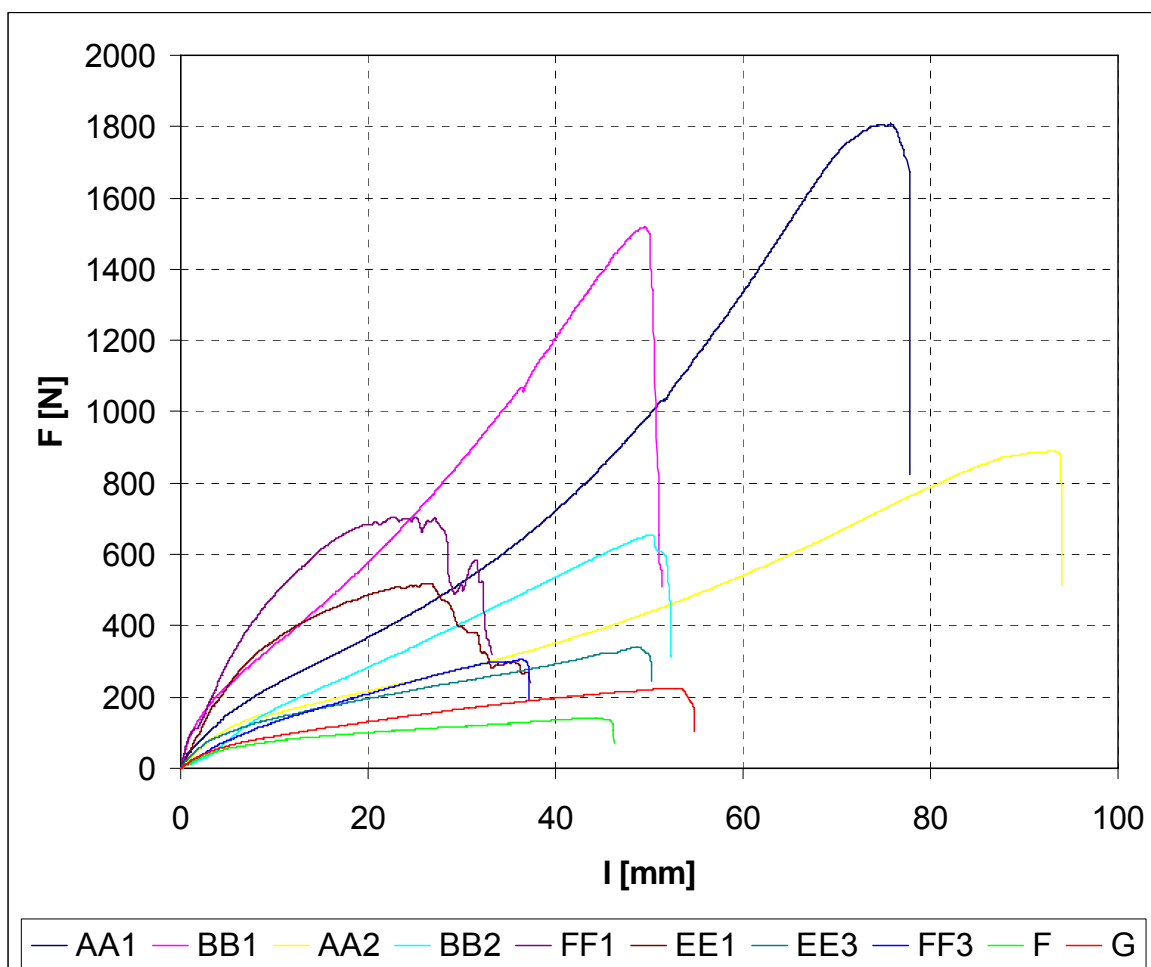
Obr. 16a Symetrická výztuž



Obr. 15b Nesymetrická výztuž

Vlastní experimentální měření bylo provedeno na zkušebním stroji ZDB – 5, který byl vybavený tenzometrickým měřením síly. Přesnost měřícího zařízení je dle platné normy pro tyto zařízení. Rychlost zatěžování byla 20 mm/min, převzato z [10].

Z experimentu byly zjištěny tahové diagramy pro jednotlivé typy vzorků. Tyto diagramy zobrazují závislost změny délky vzorku (prodloužení) na tahové síle F vyvozované zkušebním zařízením. Měření byla prováděna až do porušení vzorků, aby byly zjištěny zátěžové křivky v celém rozsahu zatížení. V měřícím softwaru bylo nastaveno ukončení zkoušky při poklesu síly o 80%. Pro názornost a možnost porovnání jsou tahové diagramy jednotlivých typů kompozitních vzorků uvedeny společně v jednom grafu na obr.17. Ze skupiny vzorků stejného typu byl vybrán vždy jen jeden, který nejlépe reprezentuje svoji skupinu.



Obr. 17 Vybrané tahové diagramy vzorků

V tab. 4 jsou uvedeny hodnoty maximálních sil F_{\max} potřebných k přetržení jednotlivých vzorků, hodnota prodloužení při přetržení vzorku l_{\max} a popis charakteru lomu vzorku. Ze skupiny vzorků stejného typu je do tab. 4 vybrán vzorek, který danou skupinu nejlépe reprezentuje s ohledem na charakter lomu.

Tab. 4 Výsledky tahové zkoušky

| Vzorek | F_{\max} [N] | l_{\max} [mm] | Charakter lomu |
|--------|-------------------|--------------------|--|
| AA1 | 1808 | 77,8 | Lom nastal ve čtvrtině délky vzorku symetricky ve směru kordových vrstev. Po experimentu vzorek zůstal zkroucený o 30° okolo podélné osy symetrie. |
| BB1 | 1518 | 51,3 | Lom nastal v polovině vzorku nesymetricky ve směru kordových vrstev. Vrstva pryže mezi kordovými vrstvami se přetrhla kolmo na směr zatížení. |
| AA2 | 890 | 94,0 | Lom nastal v upnutí vzorku v čelistech symetricky k podélné ose ve směru kordových vrstev. Po experimentu zůstal vzorek mírně zkroucený okolo podélné osy symetrie a mírně podélně prohnutý. |
| BB2 | 665 | 52,4 | Lom nastal v upnutí vzorku v čelistech symetricky ve směru kordových vrstev. Vrstva pryže mezi kordovými vrstvami se přetrhla kolmo na směr zatížení. |
| EE1 | 519 | 39,4 | Po dosažení určitého zatížení došlo k usmýkávání vzorku z čelistí. Po experimentu vzorek zůstal mírně zkroucený a podélně prohnutý. |
| FF1 | 704 | 32,7 | Održen konec vzorku v čelistech, byl pozorován postupný lom po vrstvách. |
| EE3 | 341 | 50,3 | Po dosažení určitého zatížení došlo k usmýkávání vzorku z čelistí. Po experimentu zůstal vzorek nepatrně zkroucený a podélně prohnutý. |
| FF3 | 299 | 34,2 | Lom nastal ve třetině délky vzorku ve směru kordových vrstev. Vrstva pryže mezi kordovými vrstvami se přetrhla kolmo na směr zatížení. |
| F | 141 | 46,2 | Po dosažení určitého zatížení došlo k usmýkávání vzorku z čelistí. Po experimentu zůstal vzorek nepatrně zkroucený. |
| G | 225 | 54,8 | Održen pouze konec vzorku v čelistech ve směru kordové vrstvy. |

Obr. 18 zobrazuje lom vzorku AA1, který nastal symetricky podle podélné osy symetrie vzorku. U vzorku BB1 nastal nesymetrický lom vzhledem k podélné ose symetrie vzorku, zobrazený na obr. 19.



Obr. 18 Symetrický lom

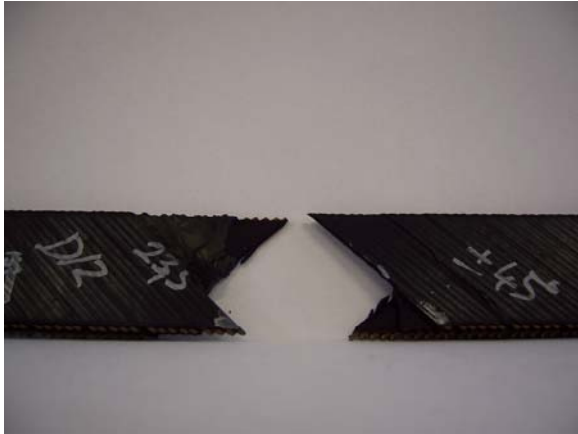
Obr. 19 Nesymetrický lom

6.2 Vyhodnocení tahové zkoušky kompozitů

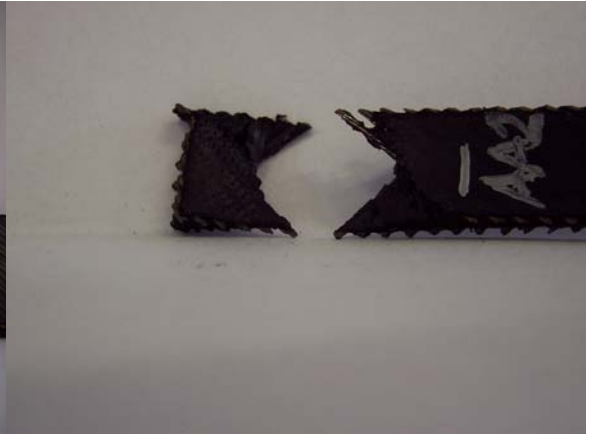
Výstupy z tahové zkoušky lze porovnávat z několika hledisek, podle toho jaký typ vzorků se měří a pro jaký účel mají sloužit naměřené charakteristiky. Po provedení tahové zkoušky bylo nejprve provedeno hodnocení charakteru lomové plochy. Ve všech případech došlo podle očekávání k porušení vzorků ve směru sklonu kordů. U dvouvrstvých vzorků se vrstva elastomeru mezi jednotlivými vrstvami kordů přetrhla kolmo na podélnou osu vzorku.

Podle oblastí, kde nastaly lomy jsou vzorky rozříděny do následujících skupin:

- a) lom v oblasti mezi upínacími čelistmi (dále jen lom mezi čelistmi) obr.20
- b) lom v upnutí v čelistech (dále jen lom v čelistech) obr.21
- c) odtržení konce vzorku upnutého v čelistech (dále jen odtržen konec vzorku) obr.22
- d) nenastal lom, z důvodu usmýknutí vzorku z upínacích čelistí (dále jen usmýknutí vzorku) obr.23



Obr. 20 Lom mezi čelistmi



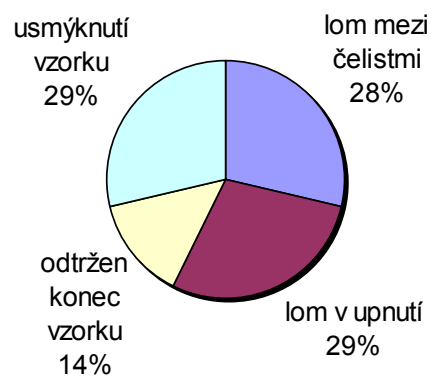
Obr. 21 Lom v čelistech



Obr. 22 Održžen konec vzorku



Obr. 23 Usmýknutí vzorku



Obr. 24 Podíl jednotlivých typů lomů

Podíl jednotlivých typů lomů na celkovém počtu vzorků graficky zobrazuje obr. 24. K upnutí vzorků byly použity samosvorné čelisti s drsnými upínacími plochami určené pro kovové materiály. Při jejich použití pro kompozitní vzorky došlo k lomu mezi čelistmi pouze u 28% vzorků. U ostatních vzorků došlo k lomu v oblasti upínacích čelistí nebo k němu nedošlo vůbec. V případě, že se vzorek usmýkne z upínacích čelistí lze předpokládat, že tahový diagram bude ovlivněn v oblasti zatížení, kde docházelo k jeho usmýkávání z čelistí. Protože vzorek začne usmýkávat z čelistí až po dosažení určitého mezního zatížení, zůstane počáteční část zátěžové křivky nedotčena, ale zbytek diagramu bude ovlivněn posuvem vzorku v upínacích čelistech. Při skutečném provozu pneumatik nedochází k velkým deformacím jako při zkoušce v tahu, je pro stanovení vstupů do výpočtového modelu a verifikaci nejdůležitější počáteční oblast tahového diagramu.

Z důvodu častého výskytu lomu v čelistech, odtržení konce nebo smýkávání vzorků z čelistí, je třeba pro provádění dalších experimentů navrhnout opatření, která zabrání nebo alespoň ve značné míře eliminují nevhodné lomy. Tyto opatření lze rozdělit do dvou oblastí a to úpravy čelistí zatěžujícího stroje nebo úprava geometrie vzorku.

Navrhují úpravu čelistí zatěžujícího stroje spočívající v dalším zvýšení drsnosti upínacích ploch nebo ve výrobě hrotů na upínacích plochách, které se zaryjí do horních vrstev elastomerové matrice a zabrání usmýknutí vzorku z čelistí.

Rozsáhlejší možnosti poskytuje úprava geometrie vzorku. Nejjednodušší úprava spočívá ve zvětšení upínací délky. K téměř jistému zabránění usmýkávání vzorku dojde v případě použití vzorku ve tvaru „psí kosti“, který se používá pro experimentální stanovení materiálových charakteristik samotných elastomerů. Při použití tohoto typu vzorku se dále zabrání ovlivnění výsledků experimentu koncentrátoři napětí na okraji čelistí, kdy se setkávají nezatížená oblast vzorku a oblast, která je namáhána tlakovými silami z upínacích čelistí. Tyto koncentrátoři napětí mohou zapříčinit lom v této oblasti a ovlivnit výslednou materiálovou charakteristiku. Nevýhodou je, že při potřebě měření vzorku s vyšší šířkou činné části, rozměry celého vzorku podstatně vzrostou. Pro výrobu vzorků s touto geometrií lze použít pouze řezání vodním paprskem.

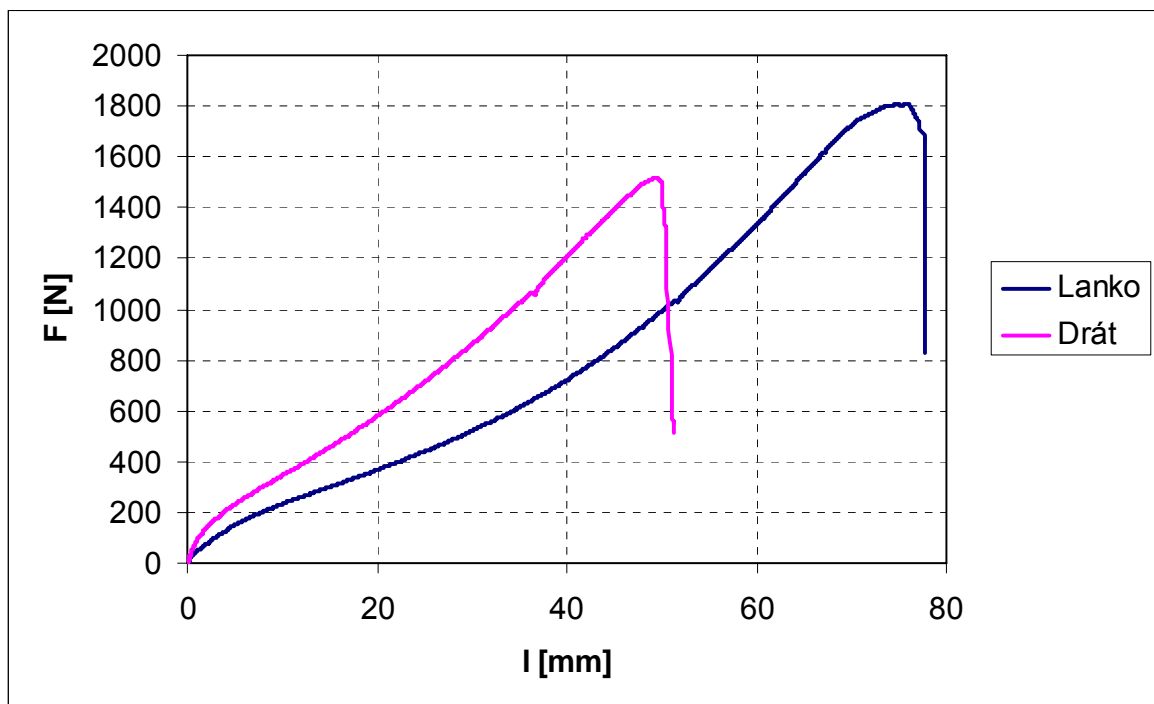
Pozorováním vzorků po tahové zkoušce bylo zjištěno, že vzorky AA1, AA2, EE1, EE3 a F zůstaly zkroucené o různý úhel okolo své podélné osy symetrie. Všechny vzorky, u kterých nastalo zkroucení mají výztuž ve formě lanka, u vzorků vyztužených drátem nebylo zkroucení po tahové zkoušce pozorováno v žádném případě. Z tohoto pozorování

lze konstatovat, že pouze lanková výztuž způsobuje zkroucení vzorku při tahové zkoušce. Vzorek má snahu se kroutit už v průběhu zatěžování a ne jen při přetržení. To lze dokázat tím, že se zkroutily i vzorky, u kterých došlo k usmýkávání z čelistí, ale nedošlo k přetržení. Příčin kroucení vzorků s lankovou výztuží může být několik, například různé zbytkové napětí v jednotlivých filamentech, z kterých je lanková výztuž spletena a v elastomerové matrici v jejich okolí nebo deformace lanek (snaha o rozpletení) v průběhu zatěžování. Pro přesné určení příčiny kroucení vzorků a jeho vlivu na vlastnosti kordové vrstvy v pneumatice je třeba provést další výzkum zaměřený na tento problém.

6.3 Porovnání jednotlivých typů kompozitních vzorků

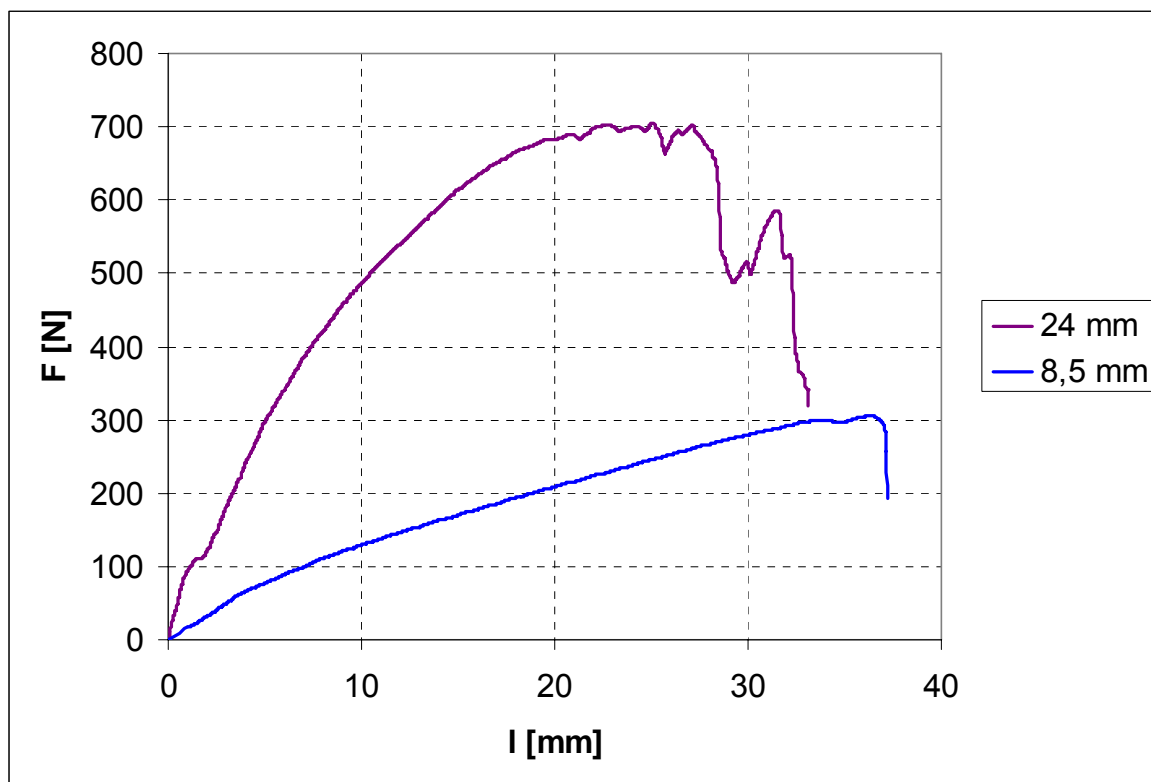
Pro správné určení vstupů do výpočtového modelování je nezbytné studovat odlišnosti v chování jednotlivých typů kompozitů při zatížení. Za účelem pozorování chování a zjištění odlišností v charakteristikách jednotlivých typů vzorků musí být provedeno porovnání experimentálně zjištěných tahových diagramů.

Dvojice typů vzorků pro porovnání jsou vybrány s ohledem na to, aby se lišily vždy jen v jednom parametru a to v počtu vrstev, typu kordu, šířce vzorku nebo rozložení kordů vůči podélné ose souměrnosti vzorku. Porovnávání více rozdílných parametrů než jednoho se jeví jako nevýhodné, protože nelze přesně stanovit jakou měrou, se ten který parametr podílí na rozdílu charakteristik porovnávaných vzorků.



Obr. 25 Tahový diagram pro dvouvrstvé, symetrické vzorky široké 24 mm (AA1 a BB1)

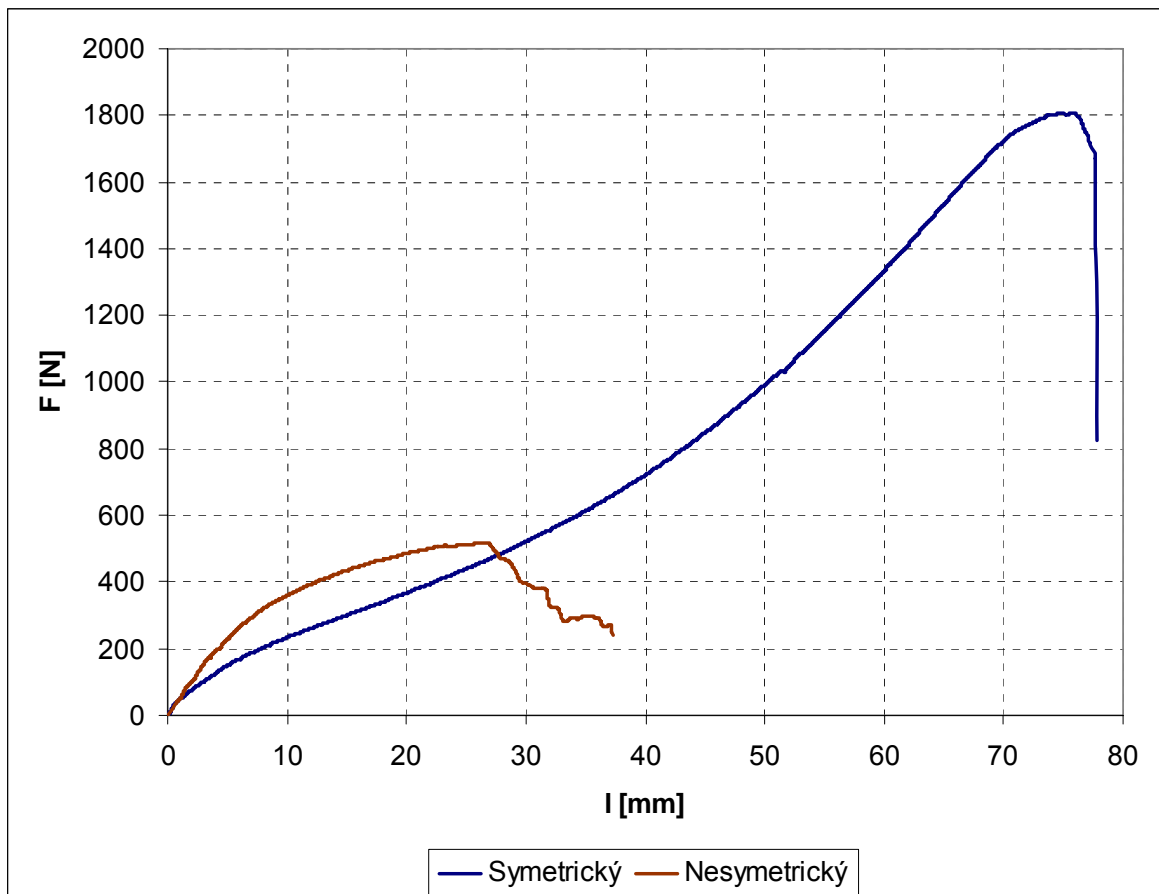
Na grafickém průběhu na obr. 25 je patrné, že vzorek vyztužený lankem odolá vyšší hodnotě zatěžující síly a dosáhne většího prodloužení než vzorek vyztužený drátem. Vzorek vyztužený lankem je poddajnější v celém rozsahu zatížení, což je dáno charakterem výztužného materiálu. I u dalších porovnávaných dvojic vzorků, které se lišily typem kordu, byli pozorovány obdobné výsledky porovnání viz. tab. 5.



Obr. 26 Tahový diagram pro dvouvrstvé, nesymetrické vzorky vyztužené drátem (FF1 a FF3)

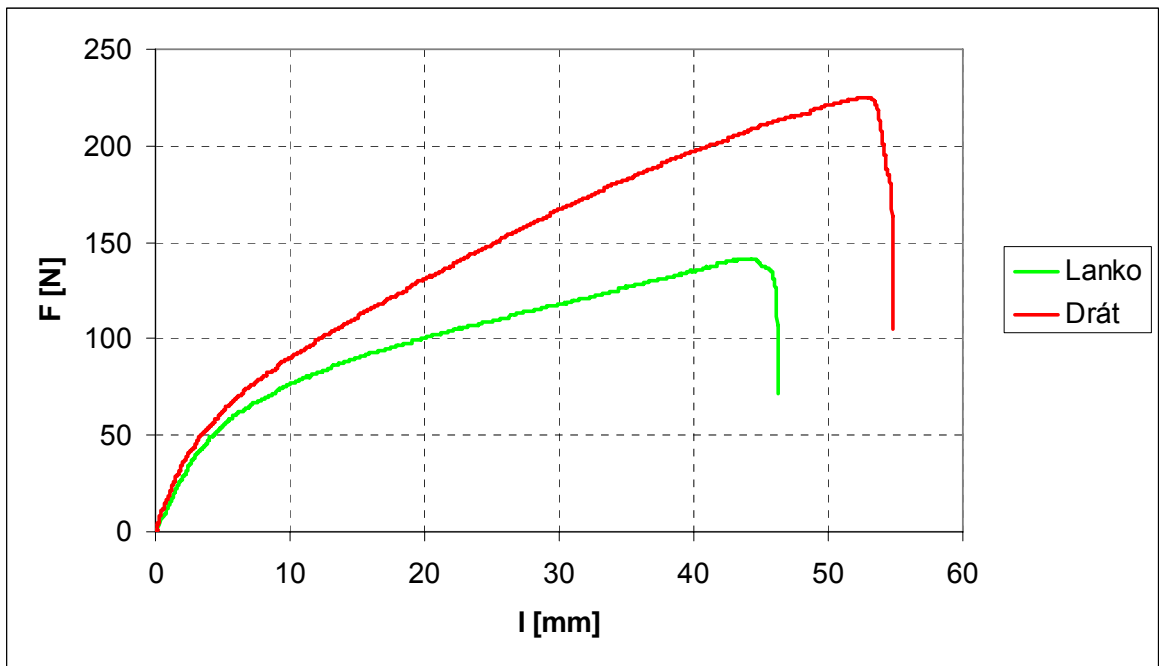
Na základě grafického zobrazení průběhu zatěžující síly a prodloužení na obr. 26 lze konstatovat, že dva vzorky se stejnými geometrickými parametry lišící se pouze šířkou mají výrazně odlišný tvar tahového diagramu. Proto není dostačující navrhnout jeden rozměr zkušební vzorku, ale je třeba měření provádět na více vzorcích s odstupňovanou šířkou. Tento návrh je podpořen i rozdílem v poměrech šířky vzorků a poměrech F_{\max} , které se značně liší oproti původním předpokladům. Před provedením experimentu byl předpoklad, že hodnoty F_{\max} se budou měnit lineárně se změnou šířky vzorku, což se nepotvrdilo, protože se jedná o složité kompozitní materiály, kde tento předpoklad neplatí. Pro stanovení závislosti F_{\max} na šířce vzorku je zapotřebí provést měření na větším počtu vzorků o různých odstupňovaných šířkách. Nelineární závislost F_{\max} na šířce vzorku je také u ostatních typů vzorků, které byly porovnávány viz. tab.5.

Tvar tahového diagramu kompozitních vzorků 8,5 mm širokých a vzorků samostatné pryže mají obdobný průběh zátěžové křivky. U vzorků širokých 8,5 mm má na výslednou charakteristiku větší vliv pryžová matrice než u vzorků širokých 24 mm. Protože jsou výztužná vlákna u 8,5 mm širokých vzorků krátká. Tímto předpokladem lze odůvodnit rozdílný tvar tahového diagramu u vzorků, které mají stejné parametry a liší se pouze šířkou.

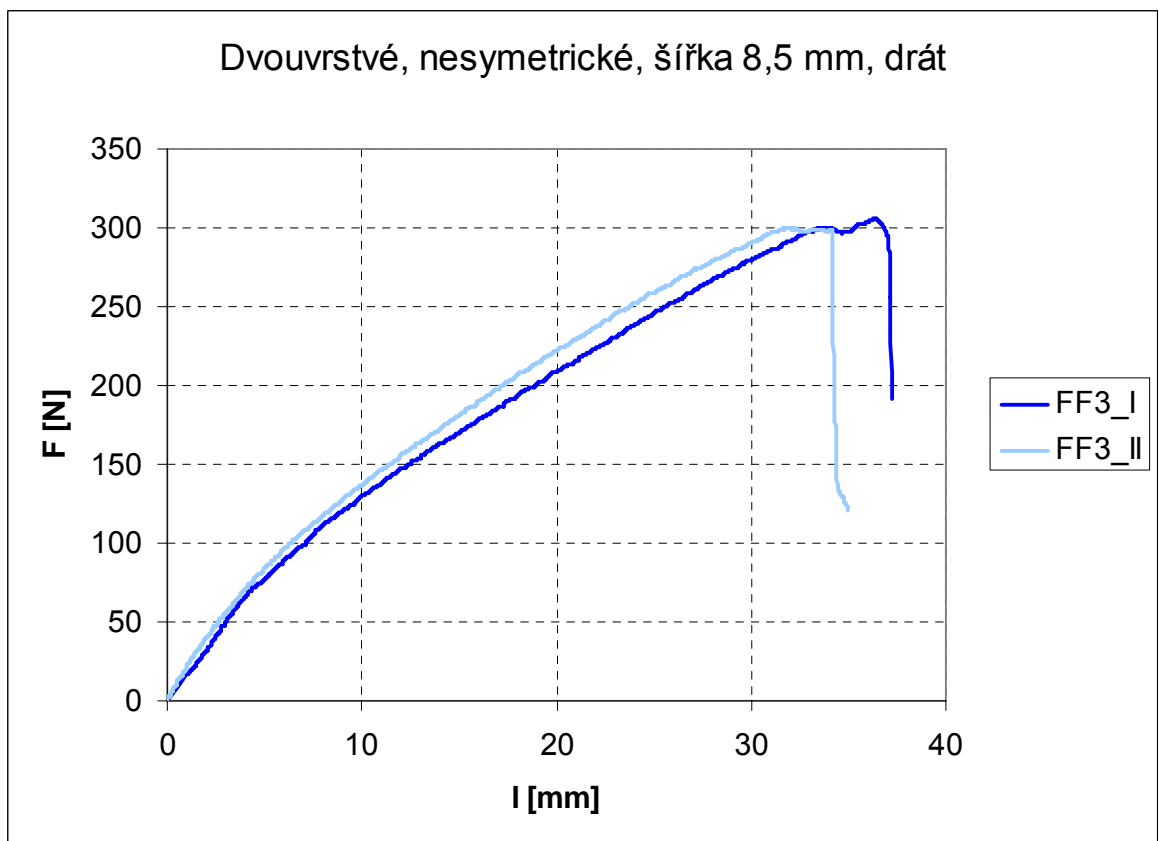


Obr. 27 Tahový diagram pro dvouvrstvé vzorky široké 24 mm vyztužené lankem (AA1 a EE1)

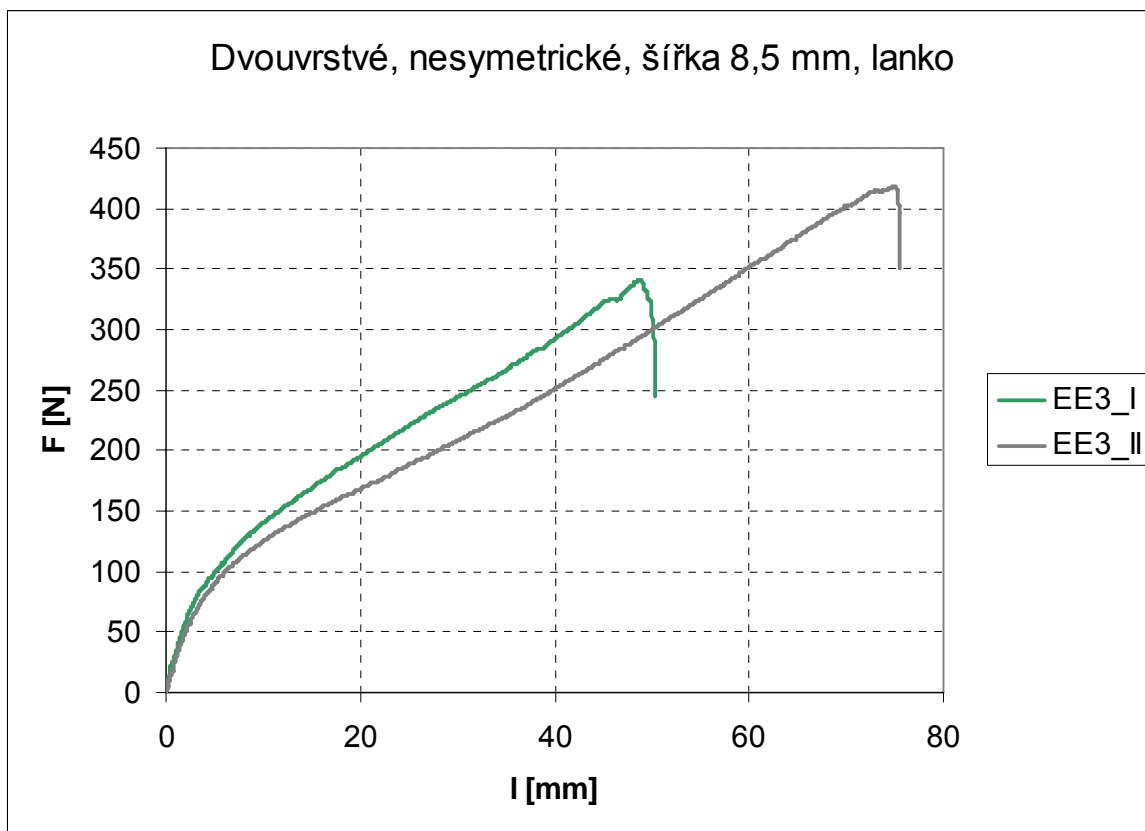
Při porovnání vzorků se symetrickým a nesymetrickým uspořádáním kordové výztuže bylo zjištěno, že symetrické vzorky dosahují podstatně vyšších hodnot maximální síly a prodloužení. Oproti tomu nesymetrické vzorky mají v počáteční oblasti vyšší tuhost, což je výhodné, protože při skutečném provozu pneumatik se zatížení pohybuje v oblasti malých deformací. Průběh zátěžových křivek vybrané dvojice vzorků se symetrickým a nesymetrickým uspořádáním kordové výztuže graficky znázorněn na obr. 27.



Obr. 28 Tahový diagram pro jednovrstvé vzorky šířky 14 mm (F a G)



Obr. 29 Vzorky FF3 při I. a II. měření



Obr. 30 Vzorky EE3 při I. a II. měření

V grafu na obr. 29 jsou zobrazeny tahové diagramy vzorků typu FF3 ze dvou vybraných měření. Vzorek FF3_I se přetrhl v upnutí v čelistech a vzorek FF3_II mezi čelistmi, protože oba vzorky vykazují obdobný charakteristický průběh zátěžové křivky a v podobných mezích se pohybují i maximální síla a prodloužení. Lze usuzovat, že lom v čelistech nemá podstatný vliv na zhoršení vypovídající hodnoty tahového diagramu vzorku. Pro úplné posouzení vlivu umístění lomu na tahové diagramy je potřeba ověření na statisticky významném počtu vzorků, které nebylo v diplomové práci provedeno z důvodu nedostatečného počtu vhodných vzorků.

Na obr. 30 jsou graficky zobrazeny tahové diagramy vzorků typu EE3 ze dvou vybraných měření. Vzorek EE3_I se usmýknul z čelistí a vzorek EE3_II se přetrhl mezi čelistmi. Tahové diagramy vykazují obdobný charakteristický průběh zátěžové křivky, přičemž počáteční část je v podstatě ve shodě. Zkoušení vzorku EE3_I je předčasně ukončeno usmýknutím z čelistí, a proto nedosáhne tak vysoké hodnoty prodloužení a maximální síly jako vzorek EE3_II. Z tohoto porovnání lze usuzovat, že usmýknutí z čelistí ovlivňuje pouze koncovou oblast tahového diagramu, ale počáteční část, která je důležitá pro výpočtové modelování není ovlivněna.

Tab. 5 Porovnání vybraných dvojic vzorků

| Dvojice vzorků | Shodné parametry | Rozdílné parametry | Výsledky porovnání |
|----------------|--|---------------------------------|--|
| AA1 BB1 | Symetrické, dvouvrstvé, úhel kordů $\pm 45^\circ$, $b_v = 24$ mm | Lanko Drát | AA1 dosáhne vyšší hodnoty maximální síly, oproti tomu BB1 má vyšší tuhost a lom nastane při nižším prodloužení. |
| AA1 AA2 | Symetrické, dvouvrstvé, úhel kordů $\pm 45^\circ$, lanko | $b_v = 24$ mm $b_v = 14$ mm | Šířka porovnávaných vzorků je v poměru 0,583, ale poměr hodnot maximální síly je v poměru 0,492. |
| AA2 BB2 | Symetrické, dvouvrstvé, úhel kordů $\pm 45^\circ$, $b_v = 14$ mm | Lanko Drát | AA2 dosáhne vyšší hodnoty maximální síly, oproti tomu BB2 má vyšší tuhost a lom nastane při nižším prodloužení. |
| BB1 BB2 | Symetrické, dvouvrstvé, úhel kordů $\pm 45^\circ$, drát | $b_v = 24$ mm $b_v = 14$ mm | Šířka porovnávaných vzorků je v poměru 0,583, ale poměr hodnot maximální síly je v poměru 0,438. |
| F G | Jednovrstvé, úhel kordů $\pm 45^\circ$, $b_v = 14$ mm | Lanko Drát | Vzorek G dosáhl vyšší hodnoty maximální síly, ale její hodnoty mohou být zkreslené, neboť vzorek F se vysmeknul z čelistí před lomem, tuhost vzorků je srovnatelná. |
| EE1 FF1 | Nesymetrické, dvouvrstvé, úhel kordů + $22,5^\circ/+67,5^\circ$, $b_v = 24$ mm | Lanko Drát | Vzorek FF1 dosáhl vyšší hodnoty maximální síly, tuhost vzorků je srovnatelná. |
| EE1 EE3 | Nesymetrické, dvouvrstvé, úhel kordů + $22,5^\circ/+67,5^\circ$, lanko | $b_v = 24$ mm $b_v = 8,5$ mm | Šířka porovnávaných vzorků je v poměru 0,354, ale poměr hodnot maximální síly je v poměru 0,657. V počáteční fázi je tuhost vzorků srovnatelná, ale dále mají vzorky odlišný průběh. Hodnoty mohou být zkreslené, protože se vzorek EE3 vysmeknul z čelistí. |
| EE3 FF3 | Nesymetrické, dvouvrstvé, úhel kordů + $22,5^\circ/+67,5^\circ$, $b_v = 8,5$ mm | Lanko Drát | Průběhy obou vzorků jsou podobné, ale vzorek EE3 dosáhne vyšší hodnoty maximální síly. Možnost ovlivnění výsledků vysmeknutím vzorku EE3 z čelistí. |
| FF1 FF3 | Nesymetrické, dvouvrstvé, úhel kordů + $22,5^\circ/+67,5^\circ$, drát | $b_v = 24$ mm $b_v = 8,5$ mm | Šířka porovnávaných vzorků je v poměru 0,354, ale poměr hodnot maximální síly je v poměru 0,434. Vzorek FF1 má podstatně vyšší tuhost. |

Tab. 6 Porovnání vybraných dvojic vzorků (pokračování)

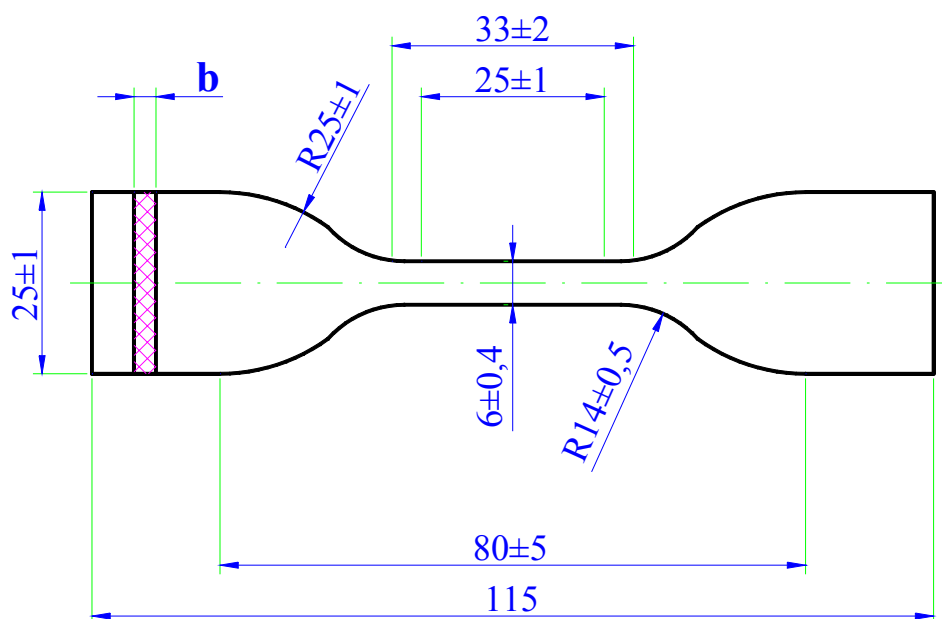
| Dvojice vzorků | Shodné parametry | Rozdílné parametry | Výsledky porovnání |
|----------------|--|---|---|
| AA1 EE1 | Dvouvrstvé, lanko, $b_v = 24$ mm | Symetrický, úhel kordů $\pm 45^\circ$ | Vzorek AA1 dosahuje podstatně vyšší hodnoty maximální síly a prodloužení, oproti tomu vzorek EE1 má v počáteční oblasti vyšší tuhost. |
| | | Nesymetrický, úhel kordů + $22,5^\circ/+67,5^\circ$ | |
| BB1 FF1 | Dvouvrstvé, drát, $b_v = 24$ mm | Symetrický, úhel kordů $\pm 45^\circ$ | Vzorek BB1 dosahuje podstatně vyšší hodnoty maximální síly a prodloužení, tuhost vzorků je v počáteční oblasti srovnatelná. |
| | | Nesymetrický, úhel kordů + $22,5^\circ/+67,5^\circ$ | |
| AA2 F | Lanko, $b_v = 14$ mm | Dvouvrstvý, symetrický, úhel kordů $\pm 45^\circ$ | Vzorek AA2 dosáhne podstatně vyšší maximální síly i prodloužení. |
| | | Jednovrstvý, úhel kordů 45° | |
| BB2 G | Drát, $b_v = 14$ mm | Dvouvrstvý, symetrický, úhel kordů $\pm 45^\circ$ | Vzorek BB2 dosáhne podstatně vyšší hodnoty maximální síly, ale vzorek G dosáhne mírně vyšší prodloužení. |
| | | Jednovrstvý, úhel kordů 45° | |

6.4 Tahová zkouška elastomerových matic

Tahové zkoušky samostatných elastomerů byly provedeny v materiálové laboratoři DFJP na stejném zkušebním zařízení (obr. 33) jako u kompozitních vzorků, ale za podmínek daných normou ČSN ISO 37 [6]. K dispozici byly dva typy vzorků vyrobených z odlišných gumárenských směsí (dále označeny směs A a směs B). Vzorky byly ve tvaru tzv. psí kosti (některá literatura uvádí název oboustranná lopatka [6]). Před provedením zkoušky v tahu byly všechny vzorky označeny pro snadnější vyhodnocení experimentu. Vzorek připravený k upnutí do zkušebního stroje je na obr.31. Rozměry zkušebního tělíska jsou zobrazeny na obr. 32. Tloušťka vzorku je $b = 2,5$ mm. K výrobě vzorků byla použita metoda řezání vodním paprskem ze stejných důvodů jako u kompozitních vzorků.



Obr. 31 Vzorek elastomeru před zkouškou v tahu



Obr. 32 Zkušební tělísko normalizovaného tvaru pro zkoušku v tahu ($b = 2,5$ mm)

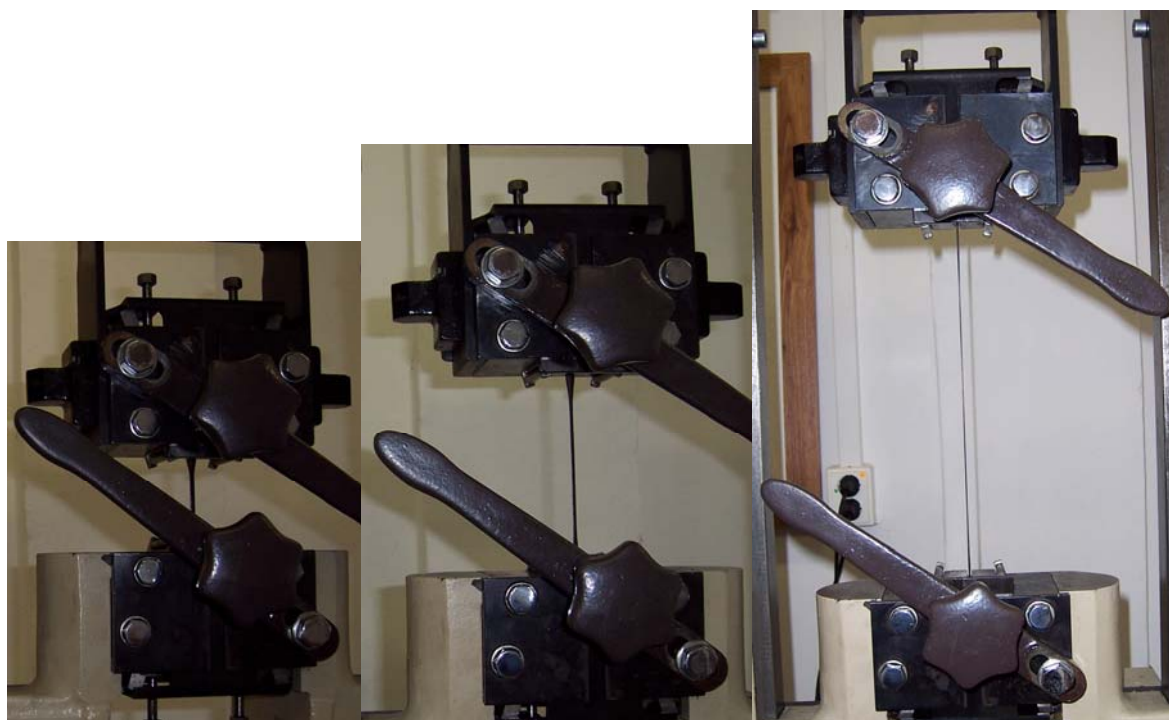
Elastomery mají podstatně větší prodloužení než kovové nebo kompozitní vzorky, proto muselo být upraveno načítání dat ze zkušebního stroje do měřícího počítače tak, aby byl počítač schopný zpracovat objem naměřených dat.

Z důvodu velkého prodloužení elastomerových vzorků (obr. 34) hrozilo předčasné ukončení zkoušky v tahu u vzorků ze směsi B, protože se zkušební stroj při jejich měření dostal na hranici svého rozsahu. Proto tento stroj není vhodný pro tahové zkoušky samostatných elastomerů a pokud by se měl provádět další výzkum tohoto typu materiálu je nutné zajistit zkušební zařízení s větším rozsahem měření nebo speciální stroj určený pro zkoušení elastomerů.

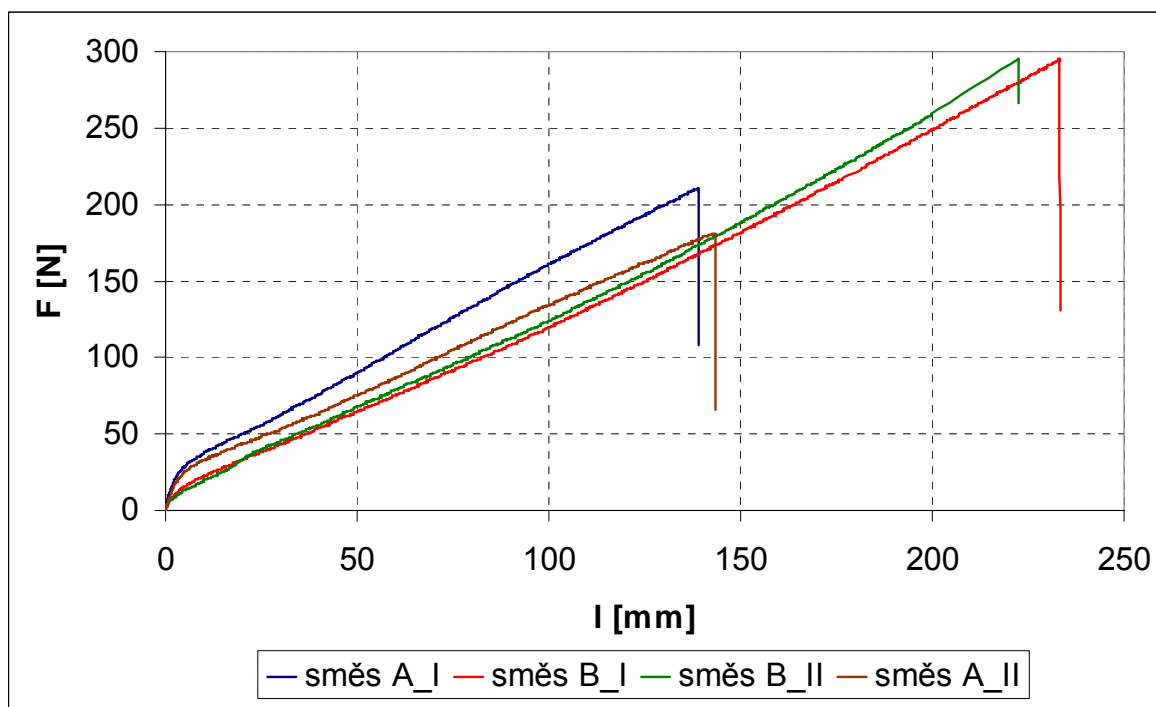
Experimentálně zjištěné zátěžové křivky elastomerových matric jsou graficky zobrazeny na obr. 35, pro každou směs jsou vybrány dvě měření.



Obr. 33 Zkušební stroj ZDB - 5 a měřící počítač



Obr. 34 Tahová zkouška elastomerů



Obr. 35 Tahové diagramy elastomerů

Tab. 7 Vyhodnocení tahové zkoušky elastomerů

| Vzorek pryže | F_{\max} [N] | l_{\max} [mm] | Charakter lomu |
|--------------|----------------|-----------------|---|
| Směs A_I | 208 | 139,1 | Lom nastal v blízkosti přechodové oblasti vzorku kolmo na osu zatížení. |
| Směs A_II | 181 | 143,6 | Lom nastal v polovině činné délky vzorku kolmo na osu zatížení. |
| Směs B_I | 294 | 233,3 | Lom nastal v polovině vzorku v úhlu 60° k ose zatížení. |
| Směs B_II | 295 | 222,6 | Lom nastal v přechodové oblasti v úhlu 60° k ose zatížení. |

U jedné poloviny vzorků došlo k lomu uprostřed délky činné oblasti vzorků, u ostatních vzorků nastal lom v blízkosti přechodové oblasti, ale stále se lom nacházel v činné oblasti vzorků. Zkušební těleso ve tvaru tzv. psí kosti je vhodné pro zkoušky v tahu samostatných elastomerů, protože lomy nastávají v činné oblasti vzorků, během experimentálního měření nebyl zaznamenán jediný případ, kdy by vzorek usmýkával z čelistí nebo by se odtrhla pouze jeho část upnutá v čelistech.

7. APLIKACE VSTUPŮ PRO VÝPOČTOVÝ MODEL VYBRANÉHO KOMPOZITU

Pro tvorbu výpočtových modelů se v dnešní době nejvíce rozšířila metoda konečných prvků. Vznik této metody se datuje kolem roku 1956 v USA v návaznosti na projekt Apollo, kdy bylo potřeba vytvořit novou numerickou metodu, protože pomocí experimentů se tento náročný projekt nedal finančně zvládnout. V prvních deseti letech byla metoda využívána pouze pro návrh vojenských a kosmických zařízení. Až kolem roku 1965 se informace o MKP začaly dostávat k odborné veřejnosti a začaly být využívány pro civilní sektor. Zajímavé je, že podstata metody byla matematicky dokázána až po několika letech jejího úspěšného využívání.

Co se týče charakteristiky MKP, tak se jedná o numerickou metodu pro získání přibližného řešení široké škály problémů z rozsáhlé řady oborů. A to i takových úloh, které nejsou běžně analyticky řešitelné. Podstatou je, že se spojitě těleso rozdělí na konečný počet prvků a úloha se již neřeší jako celek, ale po těchto jednotlivých prvcích.

Jedna z definic MKP: metoda konečných prvků je zobecněná Ritz-Galerkinova variační metoda, užívající bázových funkcí s malým kompaktním nosičem, úzce spjatým se zvoleným rozdělením řešené oblasti na konečné prvky.

Pro potřeby uživatele počítačových programů, které počítají pomocí MKP, není nezbytně důležité znát přesné matematické a programátorské algoritmy, které program využívá při výpočtech, z tohoto důvodu nejsou v práci uvedeny, bohatým zdrojem informací o MKP je literatura [9].

Pro účely projekce, dimenzování, posuzování pevnosti a použitelnosti modelované konstrukce jsou výstupní data z vlastní MKP analýzy dále zpracovávány buď ručně nebo pomocí numerických či grafických postprocesorů

7.1 Výpočtové modelování kompozitních materiálů

K vytvoření výpočtového modelu kompozitního materiálu splňujícího všechny požadavky na něj kladené tj. především účelnost, reprodukovatelnost a věrohodnost výstupních údajů, je vyžadována přesná znalost všech vstupních parametrů, které jsou potřeba do výpočtového modelu vložit. Protože na kvalitě vstupních parametrů přímo závisí kvalita výstupů. Pokud do výpočtového modelu vložíme špatné vstupy, nemůžeme

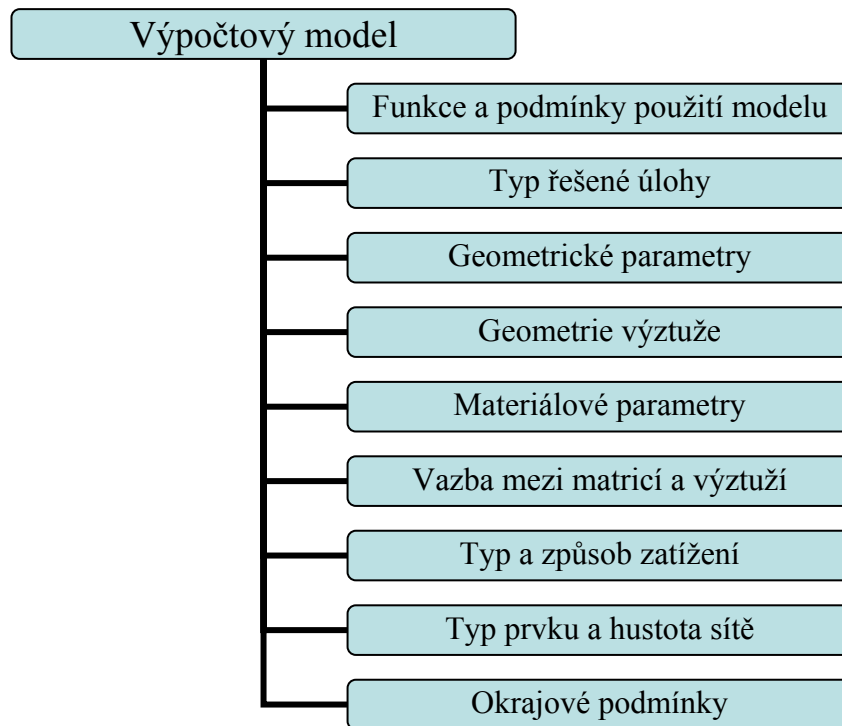
očekávat správné výsledky tzv. pravidlo „rubbish in – rubbish out“. Základem je volba správného typu modelu.

Vybraný kompozitní materiál, pro který budou navrhovány vstupy do výpočtového modelu, je dlouhvláknový kompozit s kovovou výztuží a nelineární maticí. Jedná se o vybrané typy tzv. ocelokordových nárazníků, pro které byly provedeny experimentální zkoušky za účelem stanovení materiálových charakteristik a následné ověření výstupů z výpočtového modelování. Vytvoření vhodného výpočtového modelu těchto kompozitních materiálů slouží pro vyšetřování vlivů geometrických parametrů na jejich mechanické a jiné vlastnosti. Lze ho použít jako jeden ze vstupů při komplexním přístupu k sestavení výpočtového modelu celého pláště pneumatiky. Dále se dá využít pro konstrukční prvky, které jsou vyrobeny z kompozitních materiálů obdobné struktury a složení například plášť válcové pneumatické pružiny. Navržené vstupy jsou využitelné i jako základ pro návrh výpočtového modelu odlišného typu kompozitního materiálu.

K tvorbě výpočtového modelu kompozitních struktur v pneumatice je nutné přistoupit zvlášť odpovědně, protože se jedná o velice složité kompozitní materiály se silně nelineárním chováním. Jde o části pneumatik, které mají rozhodující vliv na její tuhost a pevnost a tedy přímo ovlivňují aktivní bezpečnost vozidel, letadel aj.

Přehled potřebných vstupů do výpočtového modelu dlouhvláknového kompozitního materiálu uvádí obr. 36. Oproti výpočtovému modelování součástí z tradičních materiálů spočívá hlavní rozdíl v potřebě zohlednit ve výpočtovém modelu rozhraní matrice a výztuže, což vede k nutnosti modely zjednodušovat. Jednotlivé vstupy budou samostatně rozebrány v samostatných oddílech.

Experimentální zkoušky pneumatik poskytují řadu cenných údajů o jejich chování z různých hledisek (mechanické, chemické, aj.). Ale neposkytují informace o deformačním chování jednotlivých částí pneumatiky a o podílu vlivu dané části pneumatiky na výsledném chování pneumatiky jako celku. Proto je zapotřebí sestavit vhodné výpočtové modely částí pneumatik a i pneumatik jako celku.



Obr. 36 Vstupy do výpočtového modelu

Funkce a podmínky použití modelu

Před tím než začneme vytvářet výpočtový model a zajišťovat si potřebné vstupní údaje je nutné určit účel výpočtového modelu, pro který má sloužit. Jestli to bude model pro statické zatížení nebo pro dynamické zatížení např. výbuchem. Zda se bude jednat o model pro zjišťování deformačně napěťových stavů pro různé typy zatížení (vnitřní přetlak, deformační charakteristika, přejezd nerovnosti, odolnost proti průrazu, aj.) nebo pro teplotní analýzu, příp. pro zcela jiný účel.

Typ řešené úlohy

Při volbě typu řešené úlohy je třeba rozhodnout o dimenzi modelu. Zda je nezbytně nutné modelovat řešenou součást v 3D prostoru nebo jestli postačí 2D model. Snížením dimenze modelu se dosáhne úspory výpočtového času a někdy to vede k řešení problému, který v prostoru nelze při dnešních možnostech prakticky vyřešit. Vždy je to otázkou toho jaké výsledky se z konkrétního výpočtového modelu očekávají a k čemu bude sloužit. V některých složitých případech se postupuje tak, že se provede výpočet celé konstrukce, která je podstatně zjednodušená a následně podrobně vyřešíme pouze vybrané části.

Geometrické parametry

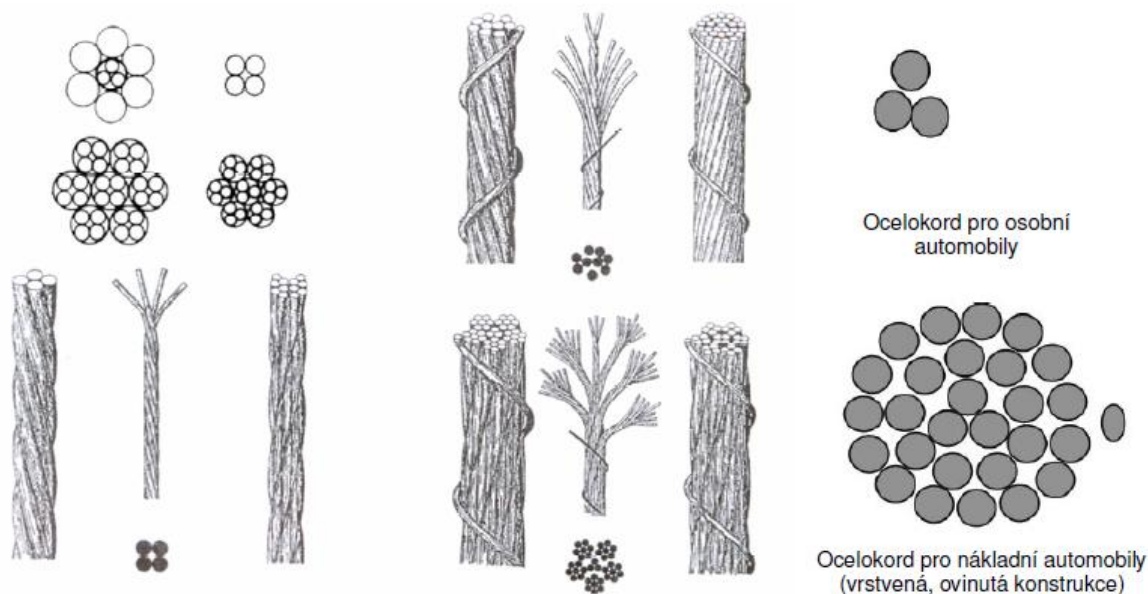
Výpočtový model musí svými geometrickými parametry odpovídat reálné součásti. V MKP počítačových programech se s výhodou využívá možnosti počítat pouze část konstrukce (polovina, čtvrtina, aj.) a její zbytek doplnit podmínkami symetrie. Modelování částí konstrukcí vede ke značné úspoře výpočtového času.

Geometrie výztuže

Geometrické parametry výztužných materiálů mají rozhodující vliv na mechanické vlastnosti kompozitních materiálů. V ocelokordových náraznících se používá výztuž ve formě kompaktního drátu nebo ve formě lanka spleteného z různého počtu filamentů. Pro splétání lanek se v praxi používá několik způsobů. Pro tvorbu výpočtového modelu je vhodnější výztuž ve tvaru kompaktního drátu, kterou lze přesně namodelovat pomocí prutových nebo objemových prvků.

Podstatně obtížnější je modelování výztuže ve formě lanka. Prakticky lze vytvořit v počítačovém programu prostorový model lanka, ale tento model je složitý a nelze ho prakticky použít ve výpočtovém modelu. Proto je potřeba vytvořit náhradní zjednodušený model lanka, který bude mít stejný zpevňující účinek pro kompozit jako původní lanko, ale bude vhodný pro použití ve výpočtovém modelu. Pro tento účel se používá nahrazení modelu lanka modelem drátu o stejné průřezové ploše, jakou mají všechny filamenty. Vliv splétání lanka (zákrut filamentů) se zohlední přiměřeným snížením modulu pružnosti E . Důležité je také správně zvolit umístění náhradního modelu lanka. Jedná se o stanovení odpovídající vzdálenosti od povrchu modelované součásti, aby nad výztuží byla stejně velká vrstva matrice. Používané typy splétání filamentů do lanek pro osobní a nákladní automobily jsou zobrazeny na obr. 37.

Obdobný problém s popsáním geometrie lankové výztuže jako u ocelokordových nárazníků se vyskytuje v oblasti patkových lanek. Tato část pneumatiky je tvořena lankem zavulkanizovaným do pryžové matrice, a proto lze tuto oblast považovat za kompozit. Tento poznatek je důležitý nejen při výpočtovém modelování zaměřeném na tuto část pneumatiky, ale i při tvorbě výpočtového modelu celého pláště pneumatiky.



Obr. 37 Charakter splétání ocelových kordů v pneumatikách [10]

Materiálové parametry

Vlastnosti materiálu se do výpočtového modelu vkládají pomocí materiálových modelů obsažených v MKP programech. Otázkou pak zůstává, který materiálový model zvolit, aby co nejlépe odpovídal materiálu skutečnému. U tradičních kovových materiálů, které jsou materiály lineární isotropní, to není obtížné a stačí k tomu znát pouze Youngův modul pružnosti a Poissonovo číslo. Problém nastává u dlouhovláknových kompozitních materiálů, které nevykazují isotropní vlastnosti, ale jsou ortotropní. Pro ortotropní materiály nejsou zatím vytvořeny dostatečně přesné materiálové modely, v současnosti se jedná o značně zjednodušené modely tzv. homogenizované.

V řešeném případě kompozitu je volba materiálového modelu pro ocelovou výztuž snazší než pro matrici, protože pro materiály typu oceli jsou zavedeny dobré materiálové modely a je běžně známý Youngův modul pružnosti $E = 210\,000\text{ MPa}$ příp. zpřesněný u lankové výztuže nebo zahrnut vliv zpracování materiálu a Poissonovo číslo $\nu = 0,3$.

Určení materiálového modelu pro elastomery je podstatně obtížnější, protože se chovají nelineárně. Elastomery se vyznačují velmi malou stlačitelností a schopností dosáhnout velkých deformací, materiály umožňující velké deformace se označují jako hyperelastické. Závislost napětí a přetvoření je vždy nelineární a nelze použít Hookova zákona. Materiálové modely pro popis elastomerů se dělí do dvou základních skupin:

stlačitelné a nestlačitelné. Do skupiny nestlačitelných jsou zařazeny Mooney-Rivlin (dále také M-R), Artura-Boyce, Ogden, aj. mezi stlačitelné patří Blatz-Ko, Hyperfoam, aj.

Při použití hyperelastických materiálových modelů je třeba zvolit správný model, který bude nejlépe odpovídat modelovanému typu elastomeru a identifikovat jejich parametry. Protože jsou tyto modely složitější než lineární Hookův zákon musí se provést více materiálových zkoušek než pouze zkouška jednoosým tahem. V úvahu ještě připadají:

- Zkouška jednoosým tahem.
- Zkouška jednoosým tlakem.
- Zkouška ekvibiaxiálním tahová.
- Zkouška ekvibiaxiální tlaková.
- Tlaková zkouška v rovinné deformaci.
- Tahová zkouška v rovinné deformaci.
- Zkouška krutem nebo smykem.
- Zkouška objemové stlačitelnosti.

V případě nestlačitelného materiálu však není potřeba provádět všechny typy zkoušek, protože si jsou některé zkoušky rovnocenné. Například zkouška jednoosým tahem a hydrostatický tlak je rovnocenná se zkouškou dvouosým tlakem. S ohledem na rovnocennost některých zkoušek se doporučuje provádět tyto typy zkoušek: zkouška jednoosým tahem, zkouška ekvibiaxiální (rovnoměrná dvouosá) tahová, zkouška tahem v rovinné deformaci a zkouška objemové stlačitelnosti. Pokud ovšem nejsou k dispozici výsledky všech výše uvedených zkoušek a ani není možné provést potřebné experimenty k jejich stanovení. Je nutné provést alespoň zkoušky, které vystihují stav napjatosti řešeného úlohy. Například pro řešení úlohy s jednoosou tahovou napjatostí postačí pro stanovení konstant materiálového modelu provést běžnou jednoosou zkoušku v tahu.

Hlavní kritérium pro volbu příslušného materiálového modelu je jeho schopnost proložit experimentálně zjištěné charakteristiky pro různé stavy napjatosti. Prakticky se zvolí ten model, který se nejvíce blíží k experimentálním charakteristikám. Pro sestavení materiálového modelu je potřeba zjistit jeho parametry. To se provede v MKP počítačovém programu, kam se jako vstup zadají zjištěné materiálové charakteristiky a počítačový program z nich vypočítá příslušné parametry materiálového modelu, vykreslí

zadané křivky a vypočítá tzv. energetickou chybu. Celý postup se zopakuje pro různé materiálové modely, z nichž se pak vybere ten, který má největší shodu s experimentem. Pro ověření správného chování materiálového modelu se provádějí simulace experimentálních zkoušek v MKP počítačovém programu.

Pro výpočtové modelování pryže používané v pneumatikách se nejčastěji používá Mooney-Rivlinův materiálový model, který je obsažený ve většině MKP počítačových programech.

Mooney navrhl fenomenologický model se dvěma parametry již ve čtyřicátých letech dvacátého století. Model je založen na předpokladu lineárního vztahu mezi zatížením a smykem během jednoduché smykové deformace. V dalším desetiletí tento model modifikoval Rivlin, aby obdržel obecné vyjádření funkce deformační energie vyjádřené pomocí deformačních invariantů [8].

K dispozici jsou dvou-parametrový, tří-parametrový, pěti-parametrový a devíti-parametrový Mooney-Rivlinovy materiálové modely, přičemž první jmenovaný je nejvíce používaný, ale při jeho použití nemusí být dobře charakterizováno stlačení[8].

Vazba mezi výztuží a maticí

Ve výpočtových modelech se adhezní vazba mezi výztuží a maticí značně zjednodušuje, protože při současných možnostech MKP počítačových programů není možné přesně namodelovat tuto vazbu se všemi jejími parametry.

Pro výpočtový model se uvažuje stejná vazba mezi výztuží a maticí po celém povrchu výztuže, není zohledněn vliv různého stupně provázání molekulární sítě kaučuku s povrchem ocelových drátů. Při výrobě nemusí u lankové výztuže dojít k úplnému zatečení gumárenské směsi mezi jednotlivé filameny. U některých typů výztuží se provádí potažení povrchu výztužných vláken speciální gumárenskou směsí, která má zajistit zlepšení vlastností rozhraní kord – matrice. Tato směs však může mít jiné mechanické vlastnosti než gumárenská směs, která tvoří matici.

I přesto, že existují zkoušky ke stanovení adheze mezi maticí a výztuží (tyto zkoušky spočívají v měření síly potřebné k vytahování kordů z maticí) nelze přesně určit fyzikální a chemické vlastnosti rozhraní. V některých případech se mohou dva odlišné vlivy působící na parametry rozhraní do jisté míry vyrušit a hlavní úlohu budou hrát materiálové parametry výztuže a matrice.

Na rozhraní mezi výztuží a maticí vznikají při mechanickém zatěžování kompozitu smyková napětí, která nelze opomenout. Proto je studium tohoto problému důležité při komplexním přístupu k výpočtovému modelování kompozitů.

Typ a způsob zatížení

Typ a způsob zatížení ve výpočtovém modelu kompozitního materiálu je obdobný jako u ostatních výpočtových modelů. Hlavní důraz je kladený na to, aby zatížení ve výpočtovém modelu co nejlépe vystihovalo situaci ve skutečnosti.

Typ prvku a hustota sítě

Typ prvků se volí podle typu řešené úlohy a její funkci. Pro modelování výztuže se používají objemové nebo prutové prvky. Hustotu sítě resp. velikost elementů se zvolí podle funkce výpočtového modelu. V částech modelu, které se mají studovat podrobněji, se síť může zjemnit. Počet elementů má výrazný vliv na výpočtový čas, proto je nutné volit počet elementů úměrný možnostem výpočetní techniky (hardware) a časovým možnostem výpočtáře.

Okrajové podmínky

Podobně jako u zatížení nekladou kompozitní materiály zvláštní nároky na zavedení okrajových podmínek. Ty je třeba zavést tak, aby co nejlépe vystihovaly daný problém a zajistily řešitelnost úlohy.

7.2 Stanovení parametrů materiálového modelu

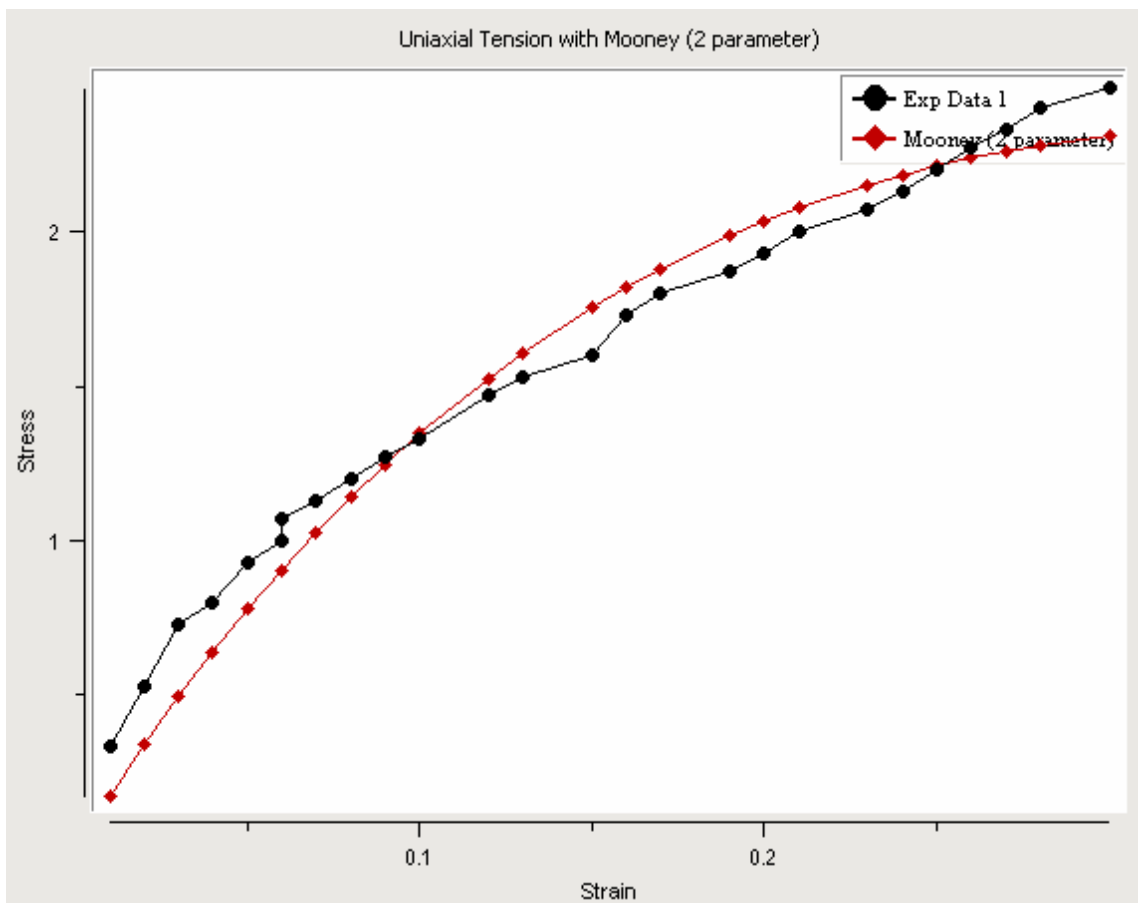
Podle [10] byl pro popis elastomerových matic zvolen dvou-parametrový Mooney-Rivlinův materiálový model. Pro identifikaci parametrů C_{10} a C_{01} M-R materiálového modelu byl zvolen MKP počítačový program ANSYS, který je dostupný na DFJP. Vstupem byly naměřené závislosti síly a prodloužení pro elastomerové matrice. Tyto hodnoty musely být před vložením do programu ANSYS upraveny v programu MS Excel na závislost smluvního napětí σ a smluvního přetvoření ε .

Funkce normalizace slouží při stanovování parametrů materiálového modelu k pokrytí oblasti nízkých hodnot přetvoření, a proto byly výpočty provedeny s i bez normalizace.

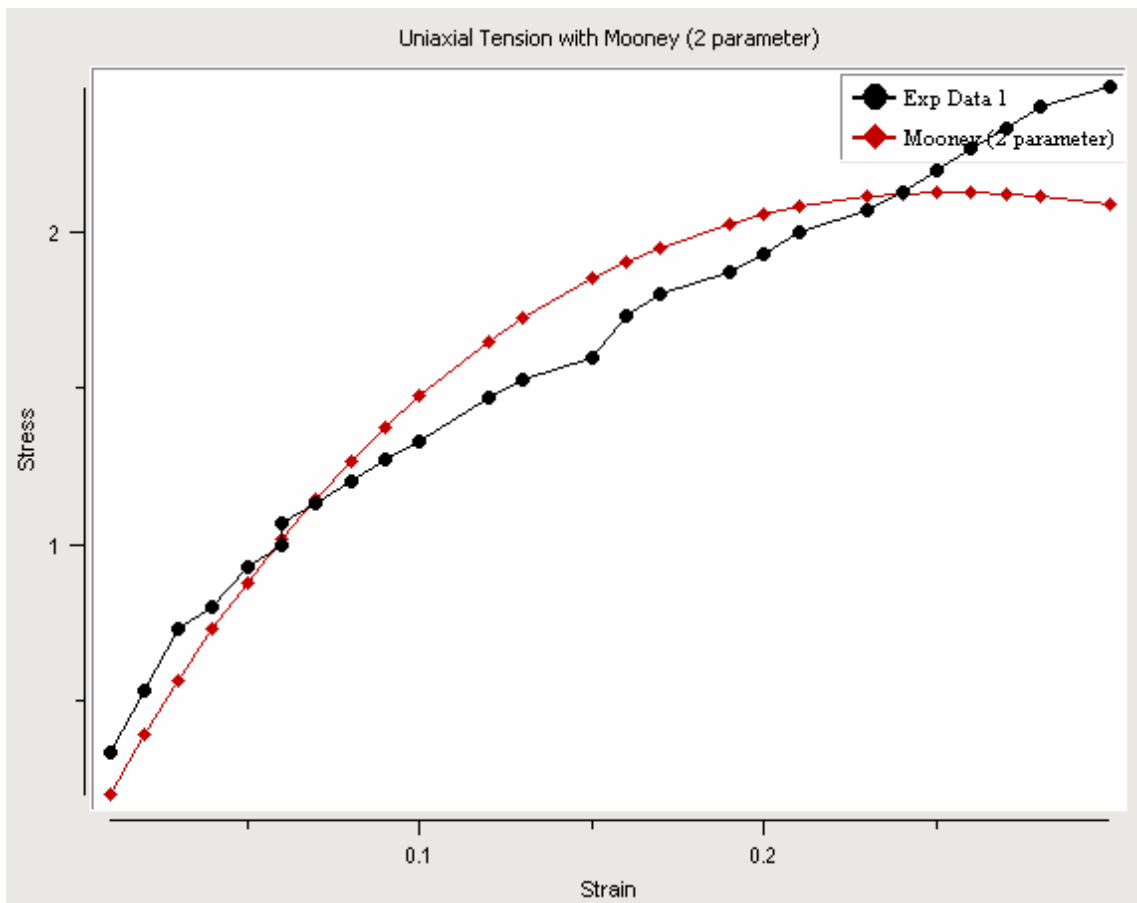
Parametry materiálového modelu byly stanoveny pro směs A i směs B při přetvoření do 15 %, do 30 % a v celém rozsahu přetvoření. Získané hodnoty jsou uvedeny v tab. 8.

Tab. 8 Parametry M-R materiálového modelu

| Typ elastomeru | Rozsah přetvoření [%] | Bez normalizace | | S normalizací | |
|----------------|-----------------------|-----------------|----------------|----------------|----------------|
| | | C_{10} [MPa] | C_{01} [MPa] | C_{10} [MPa] | C_{01} [MPa] |
| Směs A | 0 - 15 | -24,049 | 31,306 | -27,135 | 34,741 |
| | 0 - 30 | -7,884 | 13,279 | - | - |
| | 0 - 174 | 2,889 | -0,620 | - | - |
| Směs B | 0 - 15 | -11,251 | 15,180 | -15,219 | 19,571 |
| | 30 | -2,915 | 5,911 | -5,246 | 8,373 |
| | 291 | 3,075 | -2,362 | 2,426 | 0,789 |



Obr. 38 Směs B, přetvoření 30%, bez normalizace

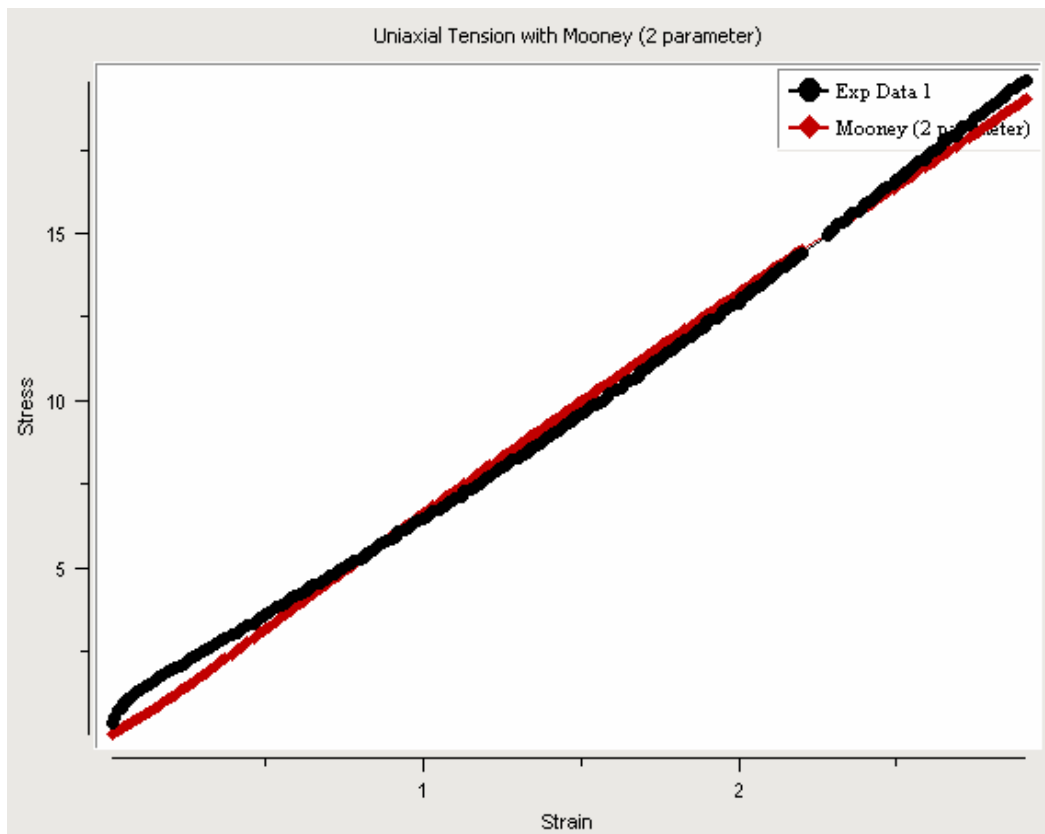


Obr. 39 Směs B, přetvoření 30 %, s normalizací

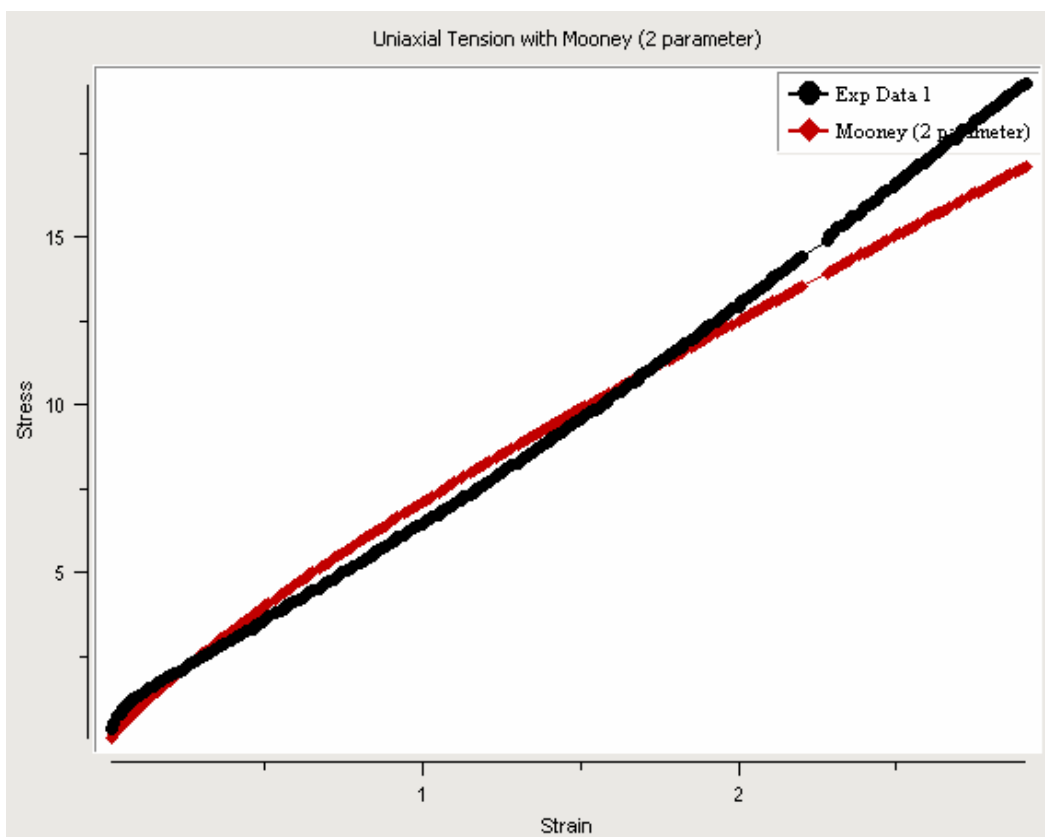
Na obr. 38 a obr. 39 jsou graficky zobrazeny závislosti smluvního napětí a smluvního přetvoření experimentálně zjištěných dat a hodnot vypočítaných programem ANSYS pro dvou-parametrový Mooney-Rivlinův materiálový model.

Obr. 38 znázorňuje výpočet bez použití normalizace, který lépe popisuje oblast vyšších hodnot smluvního přetvoření, v tomto případě od 7 do 26 % smluvního přetvoření. Ve výpočtu graficky znázorněném na obr. 39 je použita normalizace a je patrné, že je lépe popsána oblast nízkých hodnot, v tomto případě do 8 % smluvního přetvoření.

Obdobné závislosti jsou graficky znázorněny na obr. 30 a obr. 41, které jsou vypočítány pro celý rozsah smluvního přetvoření získaného při experimentálním měření vzorků ze směsi B. Materiálový model získaný bez normalizace je použitelný od 70 do 220 % smluvního přetvoření a s normalizací je vhodný pro smluvní přetvoření do 60 %.



Obr. 40 Směs B, přetvoření 291 %, bez normalizace



Obr. 41 Směs B, přetvoření 291 %, s normalizací

8. ZÁVĚR

Diplomová práce je orientována na vybrané typy kompozitů pro pneumatiky, konkrétně byly experimentálně analyzovány vzorky z tzv. ocelokordového nárazníku. Pro stanovení materiálových parametrů jako vstupů do výpočtového modelování těchto složitých kompozitů byly v práci navrženy podmínky experimentálních zkoušek v tahu k danému zkušebnímu zařízení, které nebylo vybaveno průtahoměrem.

Pro experimenty byly navrženy vzorky, které se lišily:

- počtem vrstev (jedna, dvě),
- konstrukcí-typem výztuže (lanko, drátek),
- šířkou (8,5 mm, 14 mm a 24 mm),
- úhlem (uspořádání) výztuže vůči směru zatěžování.

Na navržených vzorcích byly provedeny zkoušky v tahu do porušení, přičemž byl hodnocen charakter lomové plochy.

Na základě experimentálních výsledků bylo provedeno porovnání závislostí tahových sil na prodlouženích s ohledem na konfiguraci jednotlivých typů vzorků. Z vyhodnocení plyne, že geometrické parametry vzorků (konstrukce, úhle kordů a šířka) zásadně ovlivňují tvar a průběh zátěžových křivek včetně tuhostních charakteristik ocelokordových nárazníků.

Dále byly experimentálně stanoveny materiálové parametry elastomerů, ze kterých byly určeny parametry Mooney-Rivlinova modelu materiálu. Mooney-Rivlinův model se jeví být vhodným pro popis elastomerových matic ve výpočtových modelech kompozitních struktur pláště.

Doporučuji vybavit zkušební zařízení průtahoměrem a dalšími přídatnými zařízeními, které by umožňovaly zkoušky dvouosé napjatosti, zkoušky v krutu aj., aby bylo možné získat komplexní materiálové údaje o navržených vzorcích včetně samotných elastomerových matic.

V práci byly navrženy potřebné vstupní údaje pro vytvoření výpočtového modelu ocelokordového nárazníku. Pozornost byla věnována zejména materiálovým parametrům. Je důležité se zabývat i způsobem, jakým by bylo vhodné zohlednit adhezní vazbu kov-elastomer ve výpočtech.

Na základě dosažených experimentálních výsledků a z důvodu, že problematika kompozitních materiálů z pláště pneumatiky je věnováno málo pozornosti v publikovaných zdrojích, doporučuji se dále zabývat:

- vlivem teploty na fyzikálně-mechanické vlastnosti kompozitů (nejen normální teploty, ale i snížené a zvýšené teploty),
- technologicky efektivními metodami výroby vzorků, které by nezpůsobovaly vznik koncentrátorů napětí na hranách (hladké hrany vzorků),
- použitím takových upínacích čelistí, které zabrání usmýkávání vzorků způsobující znehodnocení naměřených údajů,
- vlivem šířky vzorku na tvar zátěžové křivky a stanovit závislost maximální tahové síly na šířce vzorku (měření na vzorcích s odstupňovanou šířkou).

Experimentálně získané údaje budou sloužit pro účely výpočtového modelování kompozitů, dále jsou také využitelné jako jeden ze vstupů do výpočtového modelu celých plášťů pneumatik.

Postup uvedený v práci je možné aplikovat i na jiné technické objekty, u kterých se vyskytují obdobné kompozitní materiály, například pláště pneumatických pružin, kde jsou (elastomery vyztužené textilními vlákny).

Seznam použité literatury

- [1] AGARWAL, Bhagwan D., BROUTMAN, Lawrence J. *Vláknové kompozity*. 1. vyd. Praha : SNTL, 1987. 296 s. ISBN 04-216-87.
- [2] *Autolexicon.net : váš technický slovník* [online]. c2008 [cit. 2009-04-26]. Dostupný z WWW: <WWW.autolexicon.net>.
- [3] *Aylmer motors* [online]. [2009] [cit. 2009-04-22]. Dostupný z WWW: <www.aylmermotors.com/site1/kevlar_pads.jpg>.
- [4] BAREŠ, Richard. *Kompozitní materiály*. Praha : SNTL, 1988. 325 s.
- [5] *Ceram : surface and material analysis* [online]. c2007 [cit. 2009-04-26]. Dostupný z WWW: <http://www.csma.ltd.uk/techniques/sem-imaging.htm>.
- [6] ČSN ISO 37 (621436). *Pryž, vulkanizovaný nebo termoplastický elastomer - Stanovení tahových vlastností*. 2006.
- [7] *Fukesi.com : The first building materials* [online]. c2004-2006 [cit. 2009-04-28]. Dostupný z WWW: <http://en.fukesi.com/img/serve_pic/steelfiber_200939150042.jpg>.
- [8] GURYČA, Lukáš. *Vliv geometrie vzorku na mechanické chování elastomeru*. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2007. 67 s. Vedoucí diplomové práce Javořík Jakub
- [9] KOLÁŘ, Vladimír, NĚMEC, Ivan, KANICKÝ, Viktor. *FEM : principy a praxe metody konečných prvků*. 1. vyd. Praha : Computer Press, 1997. 402 s. ISBN 80-7226-021-9.
- [10] KRMELA, Jan. *Systémový přístup k výpočtovému modelování pneumatik I.* 1. vyd. Brno : Tribun, 2008. 102 s. ISBN 978-80-7399-365-8.
- [11] LIPERT, Jan. *Vliv osového namáhání na kompozitní materiály*. Univerzita J.E. Purkyně Ústí nad Labem, 2007. 47 s. Vedoucí bakalářské práce Krmela Jan.
- [12] MARCÍN, Jiří, ZÍTEK, Petr. *Pneumatiky*. Praha : SNTL, 1985. 492 s.
- [13] *Northants Mobile Tyres : Runflat Tyres* [online]. [2008] [cit. 2009-05-17]. Dostupný z WWW: <http://www.northantsmobiletyres.co.uk/page19.htm>.
- [14] POLÍVKA, Jiří. *Přřazení materiálových parametrů pro ortotropní vzorky kompozitních struktur v plášti pneumatiky*. Pardubice, 2004. 66 s. Vedoucí diplomové práce Pešlová Františka.
- [15] *Silent power UK : Subaru Impreza Classic Carbon Fibre Mirrors* [online]. c2006 [cit. 2009-04-23]. Dostupný z WWW: <http://www.silentpoweruk.com/shop/index.php?act=viewProd&productId=788>.

- [16] *The University of Newcastle : Australia* [online]. c2006 , 19.10.2005 [cit. 2009-04-26]. Dostupný z WWW: <<http://www.newcastle.edu.au/research/emu/sem-apps.html>>.
- [17] VALA, Miroslav, TESAŘ, Miroslav. *Teorie a konstrukce silničních vozidel I*. 1. vyd. Pardubice : ESUP, 2003. 229 s. ISBN 80-7194-503-X.
- [18] *Wiingv.com* [online]. [2008] , 23.8.2008 [cit. 2009-04-26]. Dostupný z WWW: <http://wiingv.com/?page_id=13>.
- [19] *Wikimedia commons : Porsche Ceramic Composite Break* [online]. [2001] , 31.6.2008 [cit. 2009-04-26]. Dostupný z WWW: <http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Porsche_mg_2168.jpg>.
- [20] *Wikipedia : The free encyclopedia* [online]. [2001] , 9.5.2009 [cit. 2009-05-10]. Dostupný z WWW: <http://en.wikipedia.org/wiki/Boeing_787>.
- [21] *Wikipedie : Otevřená encyklopedie* [online]. [2001] , 10.4.2009 [cit. 2009-04-26]. Dostupný z WWW: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Uhl%C3%ADkov%C3%A9_vl%C3%A1kno>.

Seznam obrázků

| | | |
|-----------------|--|----|
| Obr. 1 | Rozdělení kompozitů | 14 |
| Obr. 2 | Ortogonální osy..... | 16 |
| Obr. 3 | Rozdělení výtužných vláken podle materiálu..... | 19 |
| Obr. 4 | Vlákna a) kovová, b) skleněná, c) kevlarová, d) keramická, e) uhlíková v porovnání s lidským vlasem | 21 |
| Obr. 5 | Rozdělení matric podle materiálu | 21 |
| Obr. 6 | Příklady kompozitních částí automobilu a) brzdový kotouč, b) brzdové segmenty, c) nádrž na CNG, d) zpětné zrcátko | 24 |
| Obr. 7 | Požadavky kladené na pneumatiku..... | 27 |
| Obr. 8 | Struktura pneumatiky..... | 28 |
| Obr. 9 | Standartní a Run-Flat pneumatika | 28 |
| Obr. 10 | Struktura radiální pneumatiky | 31 |
| Obr. 11 | Vzorek upnutý v trhacím stroji | 36 |
| Obr. 12 | Vzorky EE3 a EE1 před experimentem | 36 |
| Obr. 13 | Vzorek vyztužený lankem | 37 |
| Obr. 14 | Vzorek vyztužený drátem | 37 |
| Obr. 15 | Detail okraje vzorku..... | 38 |
| Obr. 16a | Symetrická výztuž..... | 39 |
| Obr. 16b | Nesymetrická výztuž..... | 39 |
| Obr. 17 | Vybrané tahové diagramy vzorků..... | 40 |
| Obr. 18 | Symetrický lom..... | 42 |
| Obr. 19 | Nesymetrický lom..... | 42 |
| Obr. 20 | Lom mezi čelistmi | 43 |
| Obr. 21 | Lom v čelistech..... | 43 |
| Obr. 22 | Odtržen konec vzorku..... | 43 |
| Obr. 23 | Usmýknutí vzorku..... | 43 |
| Obr. 24 | Podíl jednotlivých typů lomů..... | 43 |
| Obr. 25 | Tahový diagram pro dvouvrstvé, symetrické vzorky široké 24 mm (AA1 a BB1)..... | 45 |
| Obr. 26 | Tahový diagram pro dvouvrstvé, nesymetrické vzorky vyztužené drátem | 46 |
| Obr. 27 | Tahový diagram pro dvouvrstvé vzorky široké 24 mm vyztužené lankem..... | 47 |
| Obr. 28 | Tahový diagram pro jednovrstvé vzorky šířky 14 mm (F a G) | 48 |
| Obr. 29 | Vzorky FF3 při I. a II. měření..... | 48 |
| Obr. 30 | Vzorky EE3 při I. a II. měření | 49 |

| | | |
|----------------|---|----|
| Obr. 31 | Vzorek elastomeru před zkouškou v tahu..... | 52 |
| Obr. 32 | Zkušební tělísko normalizovaného tvaru pro zkoušku v tahu | 52 |
| Obr. 33 | Zkušební stroj ZDB – 5 a měřící počítač..... | 53 |
| Obr. 34 | Tahová zkouška elastomeru..... | 53 |
| Obr. 35 | Tahové diagramy elastomerů..... | 54 |
| Obr. 36 | Vstupy do výpočtového modelu | 57 |
| Obr. 37 | Charakter splétání ocelových kordů v pneumatikách..... | 59 |
| Obr. 38 | Směs B, přetvoření 30%, bez normalizace | 63 |
| Obr. 39 | Směs B, přetvoření 30 %, s normalizací..... | 64 |
| Obr. 40 | Směs B, přetvoření 291 %, bez normalizace | 65 |
| Obr. 41 | Směs B, přetvoření 291 %, s normalizací..... | 65 |

Seznam tabulek

| | | |
|---------------|---|----|
| Tab. 1 | Použití kompozitů v automobilech..... | 25 |
| Tab. 2 | Porovnání radiální a diagonální struktury pneumatiky..... | 29 |
| Tab. 3 | Parametry kompozitních vzorků..... | 37 |
| Tab. 4 | Výsledky tahové zkoušky | 41 |
| Tab. 5 | Porovnání vybraných dvojic vzorků..... | 50 |
| Tab. 6 | Porovnání vybraných dvojic vzorků (pokračování)..... | 51 |
| Tab. 7 | Vyhodnocení tahové zkoušky elastomerů | 54 |
| Tab. 8 | Parametry M-R materiálového modelu..... | 63 |

Seznam příloh

Příloha 1 – Vzorky připravené pro experimentální měření

Příloha 2 – Vybrané lomy vzorků

Příloha 3 – Tahové diagramy vybraných dvojic vzorků

Příloha 4 – Výstupy z výpočtu parametrů M-R materiálového modelu

PŘÍLOHY

Příloha 1 – Vzorčky připravené pro experimentální měření



Vzorčky kompozitů

Vzorčky elastomerů

Příloha 2 – Vybrané lomy vzorků



Neúplný lom v čelistech ve směru kordových vrstev. Nedošlo k úplnému přetržení vzorku, ale pokles síly při natržení vzorku splnil kritérium pro ukončení zkoušky.

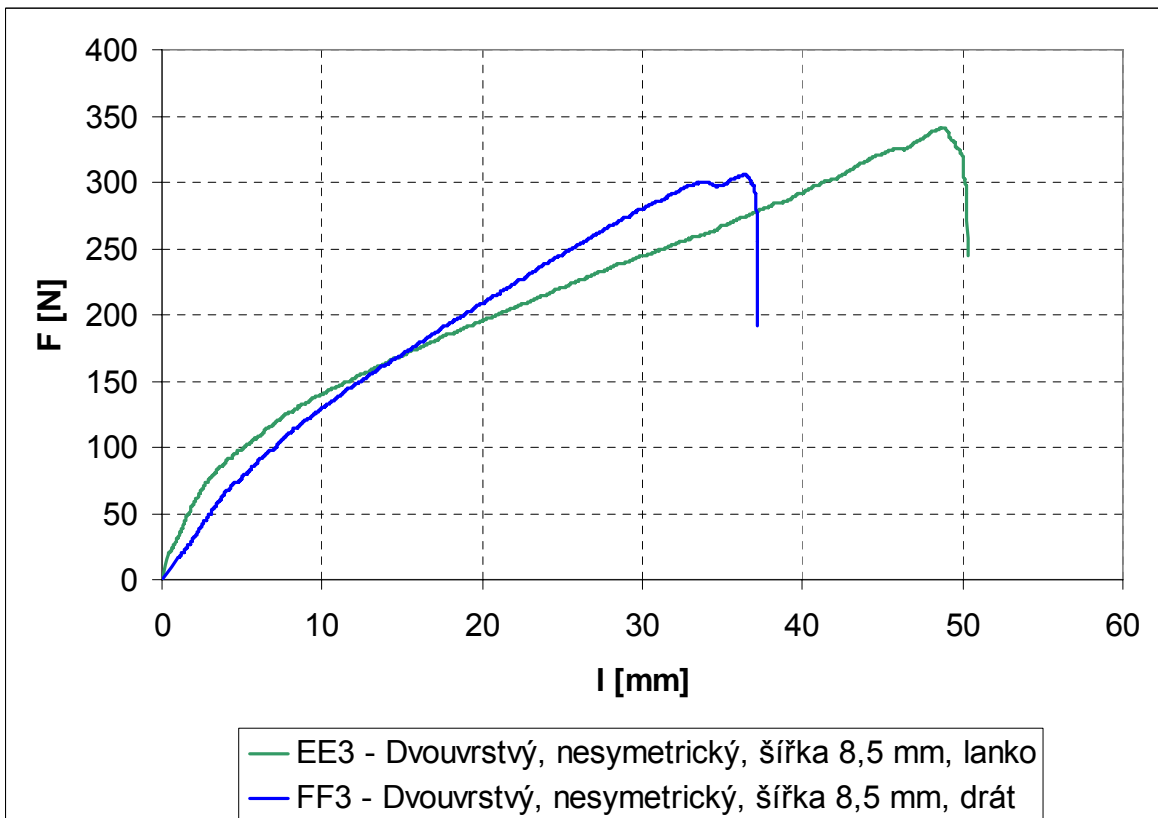
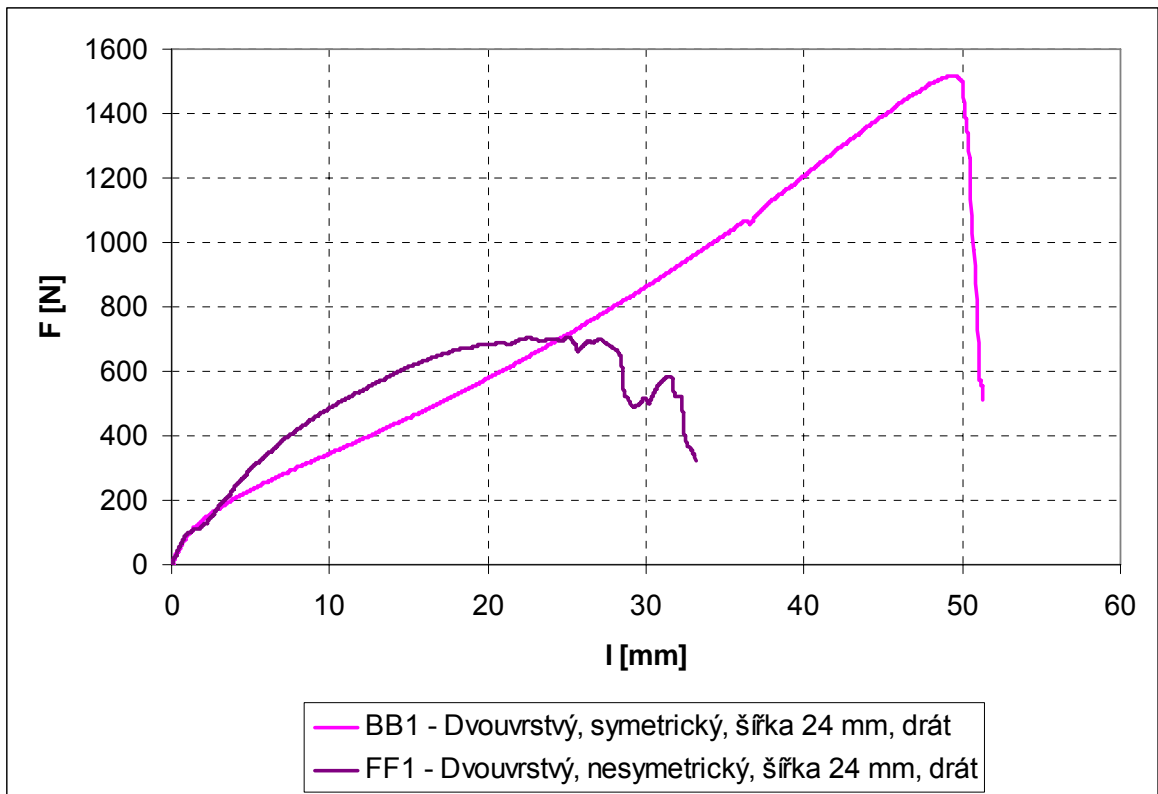


Lom vzorku FF3 v čelistech

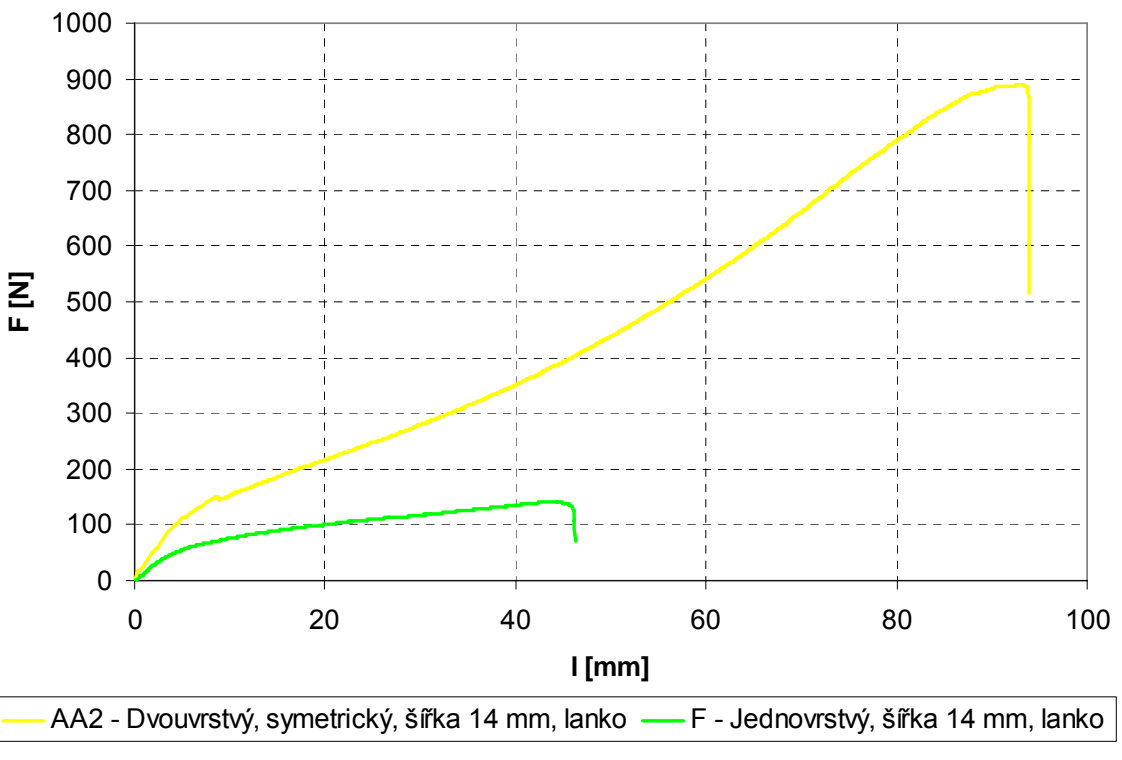
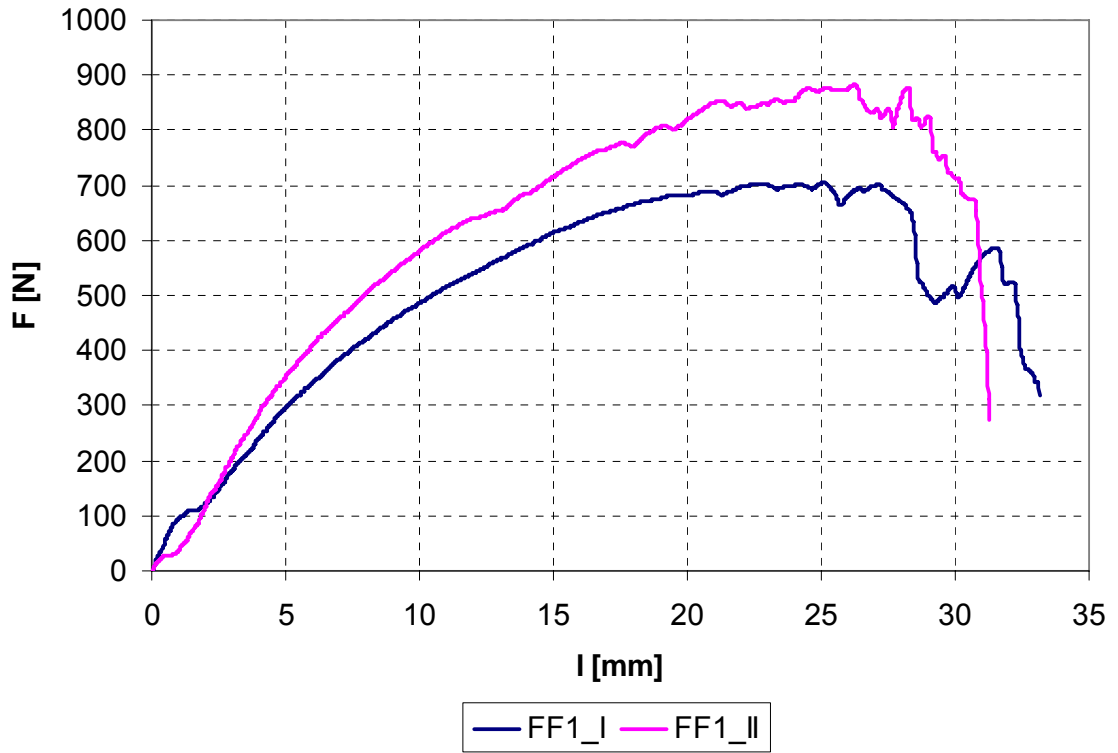
Lom vzorku FF3 ve třetině délky



Příloha 3 – Tahové diagramy vybraných dvojic vzorků



Dvouvrstvé, nesymetrické, šířka 24 mm, drát



Příloha 4 – Výstupy z výpočtu parametrů M-R materiálového modelu

