

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

MĚŘENÍ PARAMETRŮ PNEUMATIK

TYRE PARAMETER MEASUREMENTS

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. et Bc. PAVEL POKORNÝ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. ONDŘEJ BLAŽÁK, Ph.D.

BRNO 2012

ZADÁNÍ PRÁCE

Cíle, kterých má být dosaženo:

1. Provedte konstrukci a dimenzování zařízení vhodného pro měření velikosti stopy pneumatiky (pláště) a rozložení zatížení ve stopě pneumatiky. Prověřte vliv velikosti pneumatiky, jejího huštění a provedení dezénu na velikost stopy pneumatiky.
2. Navrhněte vhodné zařízení pro měření pružících a tlumících vlastností pneumatiky.
3. Sestavte vhodný měřicí systém pro sledování tlaku a teploty uvnitř pneumatiky. Provedte ověřovací měření vlivu tlaku a teploty uvnitř pneumatiky na velikost stopy.
4. Ověřte vliv teploty v oblasti dezénu na tlak uvnitř pneumatiky.
5. Jednotlivé body zadání upřesní vedoucí diplomové práce.

Charakteristika problematiky úkolu:

Navrhněte vhodná zařízení a měřicí systém pro měření základních parametrů pneumatiky (velikost stopy, pružící a tlumící vlastnosti, vliv teploty na tlak uvnitř pneu atd.).

Abstrakt

Pneumatika zajišťuje přenos sil mezi koly automobilu a vozovkou a působí také jako primární odpružení vozidla. Její konstrukce, vlastnosti a stav výrazně ovlivňují jízdní vlastnosti vozidla a tudíž i bezpečnost posádky. Ve sportovním odvětví je pneumatika klíčovou součástí automobilu a pro dosažení nejlepších výsledků je potřeba bezesbytkového využití jejího potenciálu.

Cílem této práce je návrh a konstrukce zařízení pro měření parametrů pneumatik a jejich vzájemných závislostí. Dalším úkolem je navrhnout měřicí systém pro sledování tlaku a teploty uvnitř analyzované pneumatiky. Za použití těchto zařízení je provedeno několik měření skutečných pneumatik a následné vyhodnocení získaných výsledků.

Výstupem práce je přehled konstrukčních detailů, přehled vybraných parametrů pneumatik, návrh a výkresová dokumentace víceúčelového měřicího zařízení a výsledky mnou provedených měření.

Klíčová slova

Diagonální pneumatika, radiální pneumatika, konstrukce pneumatiky, kostra, běhoun, dezén, emise hluku, pryžová směs, výroba pneumatiky, proces vulkanizace, tvrdost pneumatiky, rozměry pneumatiky, zatížení, modul pružnosti, huštění, odklon kola, stopa pneumatiky, měřicí zařízení.

Abstract

It is the tyre that ensures the interaction between a wheel and road surface and it is the tyre which also acts as a primary cushioning. Its construction, features and condition highly influence driving properties of a car and thus passenger safety as well. In motorsports the tyre is a key part of the vehicle and therefore it is necessary to make use of its complete potential for reaching the best results.

The aim of this thesis is a device construction suitable for tyre parameter and their characteristics measurement. The next task is to design a measuring system for tyre pressure and temperature monitoring. With using of these devices a few real-tyre measurements and subsequent result evaluation will be done.

The output of the thesis is an overview of construction details, overview of selected tyre parameters, design and drawing documentation of multipurpose measuring device and the results of my measurements.

Key words

Diagonal tyre, cross-ply tyre, bias-ply tyre, radial tyre, tyre construction, substructure, tread, noise emission, rubber compound, tyre manufacture, vulcanization, tyre hardness, tyre dimensions, vertical load, modulus of stiffness, inflation, wheel camber, tyre print, measuring device.

Bibliografická citace

POKORNÝ, P. *Měření parametrů pneumatik*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 56 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Ondřej Blaťák, Ph.D..

Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma „Měření parametrů pneumatik“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

V Brně dne 25. května 2012

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Ondřeji Blaťákovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne 25. května 2012

.....
podpis autora



Obsah

OBSAH	7
ÚVOD	8
1 KONSTRUKCE PNEUMATIK	9
1.1 DIAGONÁLNÍ PNEUMATIKY.....	9
1.2 RADIÁLNÍ PNEUMATIKY.....	10
1.3 KONSTRUKČNÍ DETAILY.....	12
1.3.1 Impregnace vláken.....	12
1.3.2 Vzorek běhounu (dezén).....	12
1.3.3 Hluk.....	13
1.3.4 Pneumatiky pro SUV.....	14
1.4 PRYŽOVÉ SMĚSI.....	14
1.5 VÝROBA PNEUMATIKY.....	16
1.6 VYBRANÉ PARAMETRY PNEUMATIK.....	19
1.6.1 Modul pružnosti.....	19
1.6.2 Rozměry pneumatiky.....	20
1.6.3 Zatížení pneumatiky.....	21
1.6.4 Tlak v pneumatice - huštění.....	23
2 MĚŘICÍ ZAŘÍZENÍ	24
2.1 POPIS MĚŘICÍHO ZAŘÍZENÍ.....	24
2.1.1 Vliv odklonu kola.....	26
2.2 KONSTRUKČNÍ VÝPOČTY.....	27
2.2.1 Kontrolní výpočet pevnosti táhla v tahu.....	27
2.2.2 Kontrolní výpočet na měrný tlak v závitech táhla.....	28
2.2.3 Kontrola šroubů táhla na střih.....	28
2.2.4 Kontrola šroubového spojení náboje a nosníku II.....	29
2.2.5 Kontrola šroubů v patce na střih.....	30
2.2.6 Simulace zatížení nosníků pomocí MKP.....	30
2.3 MĚŘENÍ TEPLoty A TLAKU V PNEUMATICE.....	36
3 PROVEDENÍ MĚŘENÍ A VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ	37
3.1 MĚŘENÍ VLIVU VELIKOSTI PNEUMATIKY, JEJÍHO HUŠTĚNÍ A PROVEDENÍ DEZÉNU NA VELIKOST STOPY PNEUMATIKY.....	37
3.2 MĚŘENÍ VLIVU TEPLoty V OBLASTI DEZÉNU NA TLAK UVNITŘ PNEUMATIKY.....	43
3.3 MĚŘENÍ VLIVU TLAKU A TEPLoty UVNITŘ PNEUMATIKY NA VELIKOST STOPY.....	45
3.4 MĚŘENÍ VLIVU HUŠTĚNÍ NA SOUČINITEL AERODYNAMICKÉHO ODPORU.....	47
ZÁVĚR	53
POUŽITÁ LITERATURA	54
SEZNAM ZKRATEK	55
SEZNAM SYMBOLŮ	55
PŘÍLOHY	56



Úvod

Pneumatiky jsou klíčovým funkčním elementem přenášející podélné, příčné a vertikální síly mezi vozidlem a vozovkou. Vlastnosti pneumatiky by měly být co nejvíce konstantní, aby byly řídicím předvídatelné. Jelikož pneumatiky výrazně ovlivňují chování vozidla, je třeba se jimi při konstrukci vozidla podrobně zabývat a proto je také třeba jednotlivé parametry pneumatik nějakým způsobem kvantifikovat.

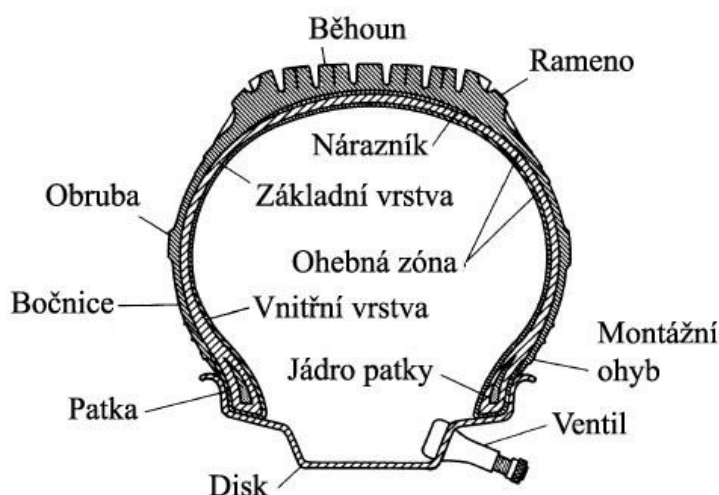
Tato diplomová práce je rozdělena do několika kapitol. Nejprve nastíním problematiku konstrukce pneumatik, a to jak z technologického hlediska, tak i z hlediska volby materiálů. Dále uvedu popis a konstrukční výpočet zařízení pro měření parametrů pneumatik. S pomocí tohoto zařízení a jeho modifikace provedu měření dle zadání práce a z výsledků měření vyvodím závěry.



1 Konstrukce pneumatik

1.1 Diagonální pneumatiky

Struktura diagonální pneumatiky (bias-ply, cross-ply tyre) je znázorněna na Obr. 1. Základní podpůrná vrstva (nazývaná též kostra) obsahuje minimálně dvě gumou impregnovaná plátna, která s centrální rovinou pneumatiky svírají úhel 20° až 40° , jak je vidět z Obr.2. Materiálem pro výrobu těchto pláten je rayon, nylon nebo ocel a jeho volba je podmíněna požadavky na tuhost a pevnost pneumatiky. Konce pláten jsou na obou koncích přehnuty přes jádro patky, které je tvořeno prstenci z ocelových drátů. Patka představuje třecí spojení pneumatiky s diskem, na kterém je obuta. Patka tedy musí zajišťovat permanentní oporu a tím přenos akceleračního a brzdícího momentu mezi diskem a pneumatikou. U bezdušových pneumatik musí rovněž zajišťovat vzduchotěsnost.

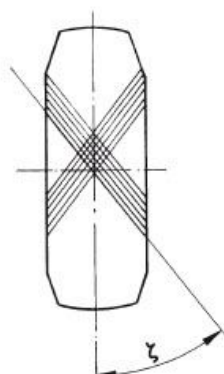


Obr. 1: Konstrukce diagonální pneumatiky v bezdušovém provedení [1]

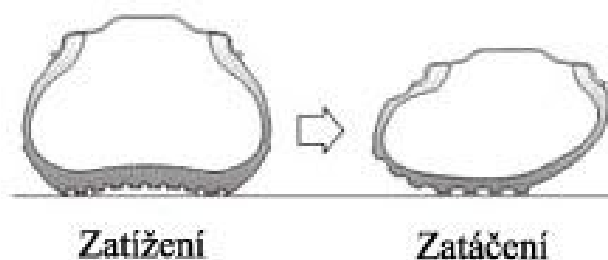
Běhoun, který je nanesen na venkovním obvodu kostry zajišťuje kontakt s vozovkou a jeho povrch může být profilován. Některé pneumatiky mají mezi kostrou a běhounem výztužnou vrstvu nazývanou se „nárazník“. Běhoun po stranách přechází postupně v bočnici a tento přechod se nazývá „rameno“. Montážní ohyby umístěné vespod bočnice slouží ke snadné kontrole při montáži, zda je pneumatika na disku správně usazena.

Použití diagonálních pneumatik je dnes velmi omezené z důvodu nahrazení pneumatikami radiálními, které mají mnoho výhod. V současnosti se diagonální pneumatiky používají pouze pro:

- zemědělské stroje (nedosahujících velkých rychlostí)
- motocykly (z důvodu náklonu kola proti bočním silám v zatáčce)
- závodní vozy (z důvodu nižšího momentu setrvačnosti)
- nouzové použití (nižší nároky na trvanlivost).



Obr. 2: Uspořádání pláten diagonální pneumatiky [1]

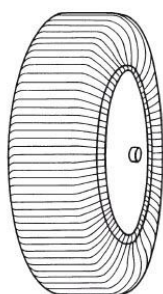


Obr. 3: Deformace kontaktní plochy diagonální pneumatiky

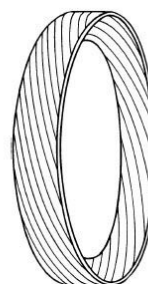
Výraznou nevýhodou diagonální konstrukce je přílišná poddajnost pneumatiky, což má za následek deformaci kontaktní plochy při zatížení a při zatáčení (Obr. 3). Tím dochází ke zmenšování této plochy a ke snížení velikostí sil, které je pneumatika schopna přenést. Příčinou je právě úhel svíraný jednotlivými plátny s centrální rovinou pneumatiky (Obr. 2), jehož volba ovlivňuje vlastnosti jako: valivý odpor, boční a pružící tuhost pneumatiky. U závodních aut se proto volí úhel ζ co nejmenší.

1.2 Radiální pneumatiky

U radiálních pneumatik (radial tyres) jsou jádra patek spojena kostrou nejkratší cestou (Obr. 4), přičemž úhel ζ je u těchto pneumatik mezi 88° a 90° . Na základní vrstvě jsou usazeny ocelové pásy zajišťující nezbytnou tuhost a sklon jejich vláken k centrální rovině pneumatiky je 15° až 20° , jak ukazuje Obr. 5. Venkovní část pneumatiky sestává opět z běhounu a bočnice a vnitřní část je opatřena vrstvou zajišťující vzduchotěsnost. Materiál pro výrobu kostry je rayon nebo nylon, výztužný pás je vyroben buď pouze z oceli anebo je tvořen kombinací rayonu, nylonu a oceli, kdežto jádra patek jsou vždy výhradně ocelová. Použité materiály bývají uvedeny na bočnici pneumatiky.



Obr. 4: Kostra radiální pneumatiky [1]

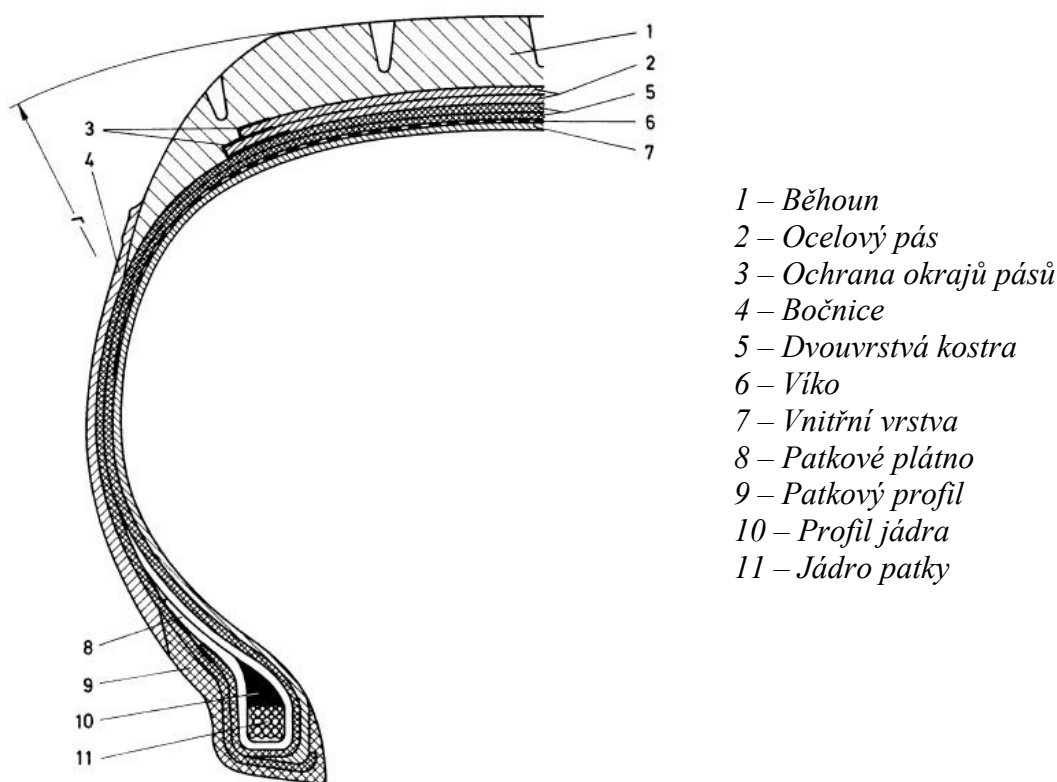


Obr. 5: Výztužný pás radiální pneumatiky [1]

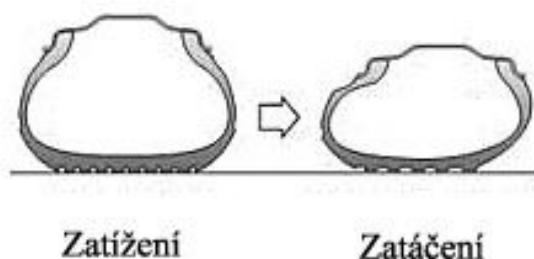


Tuhý výztužný pás způsobuje podélné oscilace pneumatiky, které je třeba náležitě odtlumit vozidlovými tlumiči, jinak by docházelo k nežádoucímu hluku a vibracím karoserie při jízdě po dlažebních kostkách anebo horším povrchu. Jedinou další nevýhodou radiálních pneumatik ve srovnání s diagonálními je větší choulostivost tenkých bočnic. Dále již převažují pouze výhody, které jsou:

- výrazně vyšší životnost
- vyšší zatížitelnost při nižší váze pneumatiky
- menší valivý odpor
- lepší chování na mokru a odolnost vůči aquaplaningu
- schopnost přenést větší příčné síly za stejných hodnot tlaku v pneumatice



Obr. 6: Konstrukce radiální pneumatiky [1]



Obr. 7: Radiální pneumatika pod zatížením a při zatáčení

Poslední jmenovanou výhodou radiálních pneumatik oproti diagonálním znázorňuje Obr. 7, ze kterého je vidět, že díky tužší konstrukci pneumatiky nedochází k tak výrazné deformaci běhounu při zatáčení.

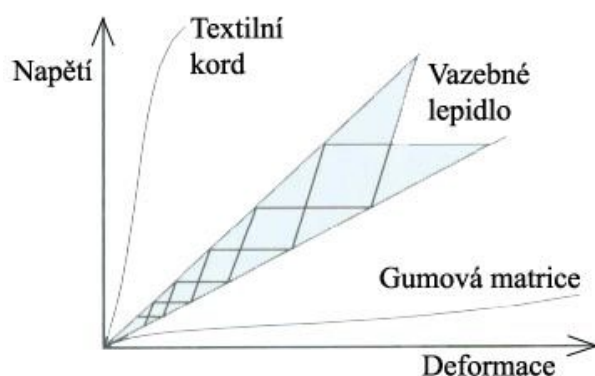


1.3 Konstrukční detaily

Rád bych tu ještě uvedl některé konstrukční detaily a odlišnosti jednotlivých druhů pneumatik, které významně ovlivňují jejich chování a které mohou mít vliv na měření prováděná v kapitole 3.

1.3.1 Impregnace vláken

Vlákna kostry (kordy) nejsou schopny dostatečně vyztužit pneumatiku, pokud nejsou pevně spojena s gumovou matricí. To je však velmi obtížné, protože matrice je mnohem pružnější než kordy, jak ukazuje Obr. 8. Vlákna jsou proto impregnována speciálním lepidlem, které napomáhá navázání vláken na gumovou směs během procesu výroby pneumatiky.



Obr. 8: Diagram σ - ε pro výrobní komponenty pneumatiky [3]

Za provozu pneumatiky dochází k přenosu sil z měkké gumové matrice do relativně tuhých kordů právě skrz vrstvu vazebného lepidla, která slouží jako tlumič rázů. Tím dochází k zabránění poškození samotných vláken a jejich vytrhávání z gumové matrice. Volba vhodného lepidla je klíčová zejména při výrobě závodních pneumatik.

1.3.2 Vzorek běhounu (dezén)

Přilnavost pneumatiky na suchém povrchu se snižuje pokud je běhoun jakkoliv profilován. Závodní pneumatiky bez vzorku (slicky) generují nejlepší přilnavost z důvodu nepřerušované kontaktní plochy, zajišťující nejlepší oporu pro přenos sil mezi pneumatikou a povrchem vozovky. Jakýkoliv vzorek běhounu vytváří prázdná místa, která neposkytují oporu pro působící síly a skutečná kontaktní plocha pneumatiky je tedy menší. U profilovaného běhounu navíc vznikají lokální místa na okrajích jednotlivých figur, které jsou velmi zatěžované ohybem jednotlivých bloků gumy. Rovněž z důvodů malé plochy těchto bloků může docházet k jejich přehřívání, což má za následek drobení gumy a snížení funkčnosti pneumatiky.

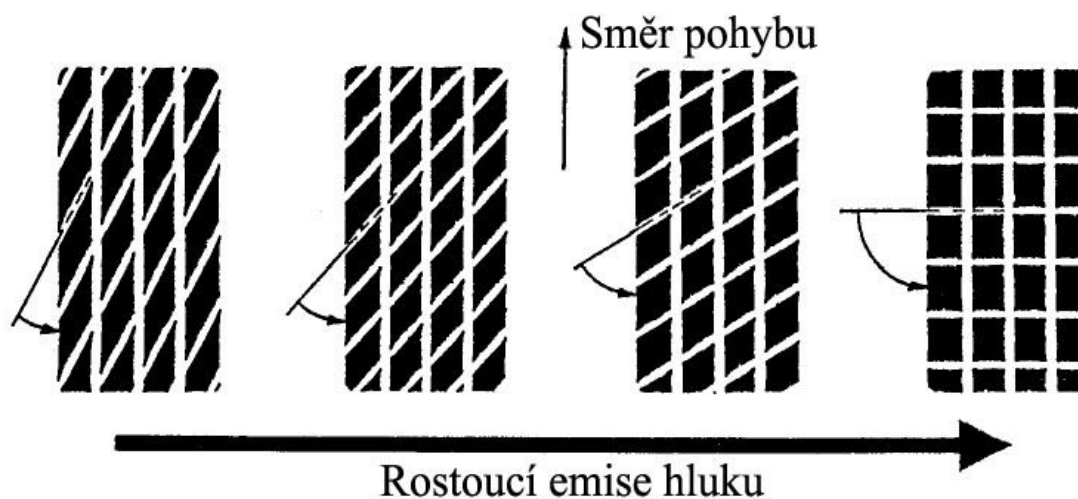
Přilnavost na mokru je naopak dezénem zvětšována. Jednotlivé žlábkové slouží k odvodu vody z meziprostoru mezi vozovkou a pneumatikou. Snížení skutečné kontaktní plochy má v tomto případě pozitivní dopad, kdy dochází ke zvětšení tlaku, kterým působí pneumatika na vozovku a voda je tak doslova vymačkávána z pod pneumatiky. Nebezpečí přehřívání gumových bloků v mokrých podmínkách nehrozí.



Šířku žlábků a rovněž jejich sklon nelze volit libovolně. Jde o výsledek testů účinnosti pneumatiky a rovněž i kompromisů vedoucích ke snížení hluků pneumatiky. Sklon žlábků k centrální rovině pneumatiky je však vždy větší než 50° a platí, že čím více, tím lepší odvádění vody je pneumatika schopna zajistit.

Při postupném opotřebení pneumatiky dochází ke snižování výšky žlábků a aby nedocházelo ke snížení objemu vody, který je pneumatika schopna odvést, konstruuji se žlábků s lichoběžníkovým profilem. Tím dochází k postupnému rozšiřování žlábků během života pneumatiky.

U zimních pneumatik jsou figury navíc opatřeny malými lamelami (jemnými drážkami), které se při záběru bortí a tím zajišťují kromě adheze i přídavné mechanické spojení pneumatiky s povrchem.



Obr. 9: Závislost sklonu drážek na tvorbě hluku [4]

1.3.3 Hluk

Pro pneumatiky osobních vozidel je důležitým aspektem také produkovaný hluk. Ve snaze zajistit emise hluku odvalujících se pneumatik co nejnižší, jsou výrobci nuceni dělat mnohé kompromisy. Jedním z nich je kompromis mezi nejkratší délkou drážek pro optimální odvod vody a úhlem drážek (Obr. 9). Drážky kolmé na centrální rovinu kola jsou totiž po stránce emitovaného hluku nejméně příznivé.

Jedním z prostředků pro „obejití“ tohoto problému je volba různé velikosti dílčích gumových bloků pneumatiky, jak ukazuje Obr. 10. Pokud by bloky byly stejně velké, docházelo by při odvalování pneumatiky k produkci monotónního zvuku. Změnou velikostí bloků se dosáhne produkce zvuku, zvaného bílý šum, který lidskému uchu nezní tak hlasitě. Úroveň zvuku je sice stejná, ale šum nepůsobí tak rušivě.



Obr. 10: Znárodnění pěti rozdílne velikých bloků gummy [3]

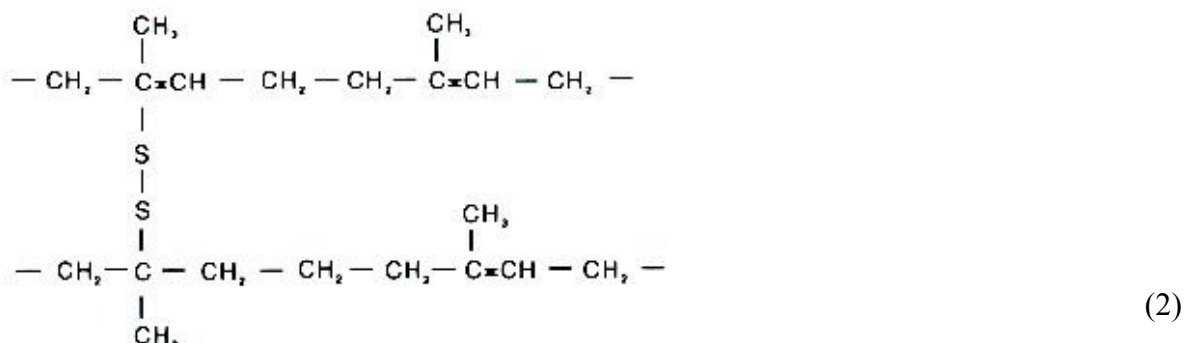
1.3.4 Pneumatiky pro SUV

Poněkud odlišná situace platí u vozidel SUV. Jejich uživatelům nevdá vyšší hluk, jelikož tato vozidla bývají lépe odhlučněna. Důvod pro použití velmi profilovaných pneumatik je čistě bezpečnostní. Vozidla SUV mají těžiště hodně vysoko a ve spojení s užším rozchodem kol by hrozilo nebezpečí převrácení. Proto se využívají pneumatiky s menší přilnavostí, aby se v krizových situacích vozidlo začalo spíše smýkat než nebezpečně naklápět.

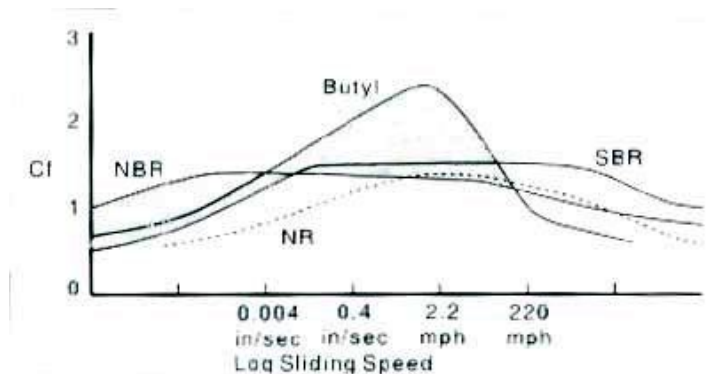
1.4 Pryžové směsi

Vývoj a výroba pryžové směsi pro pneumatiku je výsledkem snahy najít nejlepší kompromis mezi kladenými požadavky jako je nízký valivý odpor, dlouhá životnost, dobrá přilnavost, provozuschopnost za nízkých teplot, nízké hlukové emise atp. Jelikož pneumatika je mechanická soustava skládající se z mnoha komponent navzájem svázaných, je třeba i gumovou směs posuzovat podle toho, jak funguje v daném systému – pneumatice.

Pryž je tvořena dlouhými řetězci makromolekul (polymery), které sestávají z dílčích stavebních bloků – monomerů. Vzorec (1) představuje monomer přírodního kaučuku. Polymerací a vulkanizací (při níž dochází k vytváření příčných vazeb síry, neboli cross-linků) dostaneme polymer poly-iso-propylenu (2). Pro vytvoření příčných vazeb je třeba dodat do procesu vnější energii. Touto energií může třeba UV záření či ozón, což je důvodem stárnutí byť nejetých, avšak na vzduchu či slunečním záření skladovaných pneumatik.



První věcí při konstrukci pneumatiky je tedy volba vhodné pryže, hmoty použité jako základní polymer běhounu. Obr. 11 znázorňuje třecí koeficient (C_f) na brusném papíře pro různé pryžové polymery: NBR (nitril-butadien), NR (přírodní kaučuk), Butyl (poly-iso-butylen) a SBR (styren-butadien) v závislosti na logaritmu kluzné rychlosti.



Obr. 11: Třecí charakteristiky pryžových materiálů [3]

Komponenty pro výrobu gumové směsi pneumatik můžeme klasifikovat následujícím způsobem:

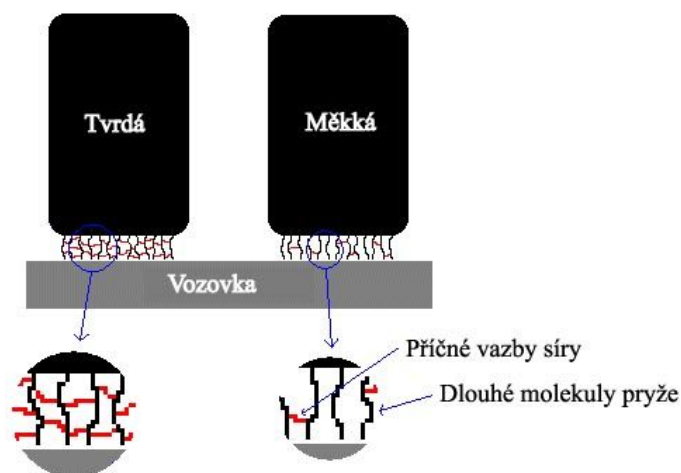
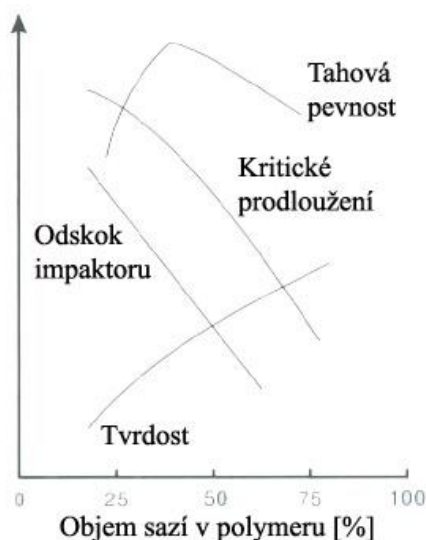
1. Pryž – jeden polymer nebo směs polymerů s vysokou molekulovou hmotností
2. Rozpínavé silice
3. Plnivo – směs uhlíkových sazí, křemene a jiných vyplňovacích materiálů
4. Procesní přísady jako změkčovadla, plasticizéry či recyklovaná guma
5. Akcelerátory reakce – síra a oxid zinku
6. Aditiva jako např. antioxidanty, antiozonanty apod.

Vesměs veškerá plniva zvyšují tvrdost pneumatiky, avšak uhlíkové saze rovněž výrazně zlepšují tahovou pevnost, čímž snižují riziko vzniku trhlin ve směsi pneumatiky a pozitivně tak ovlivňují životnost pneumatiky. Je to dáno specifickým způsobem navázání molekul sazí do polymerů pryže, což má za následek vzrůst třecích sil v segmentech řetězce molekul pryže. Na Obr. 12 je vyznačen vliv množství sazí ve směsi na několik důležitých vlastností pryže použité v pneumatice.



Tahová pevnost je udávána jako poměr síly na jednotku plochy-průřezu testovaného vzorku. **Kritické prodloužení** je hodnota udávaná v % a udává délku vzorku v okamžiku přetržení. **Odskok impaktoru** je vzdálenost, do které odskočí závaží spuštěné z předepsané výšky na vzorek pryže. Hodnota je udávána jako % z celkové vzdálenosti pádu impaktoru. Výsledkem je posouzení míry hystereze (nebo míry absorpce energie) dané směsi. Čím větší odskok, tím menší hystereze.

Tvrdość je testována vtlačováním sondy dané velikosti do pneumatiky.



Obr. 12: Vliv množství sazí na vlastnosti pryžové směsi [3]

Obr. 13: Rozdíl mezi tvrdou a měkkou směsí[5]

Použití křemene jako plniva zmenšuje valivý odpor pneumatiky a rozšiřuje rozsah provozních teplot nad teplotu skelného přechodu dané směsi. Vhodnými poměry množství sazí ku množství křemene se dosáhne zlepšení přilnavosti za mokra a zlepšení trvanlivosti pneumatiky.

Na závěr této kapitoly uvedu ještě rozdíl mezi měkkou a tvrdou směsí pneumatiky na molekulární úrovni. Tvrdá směs má větší počet příčných vazeb mezi řetězci pryže, což výrazně snižuje počet molekul pryže, které by mohly reagovat s vozovkou a podílet se tak na přenosu sil. U měkké směsi je tomu přesně naopak. Méně příčných vazeb znamená delší volné řetězce pryže a tudíž i více molekul interagujících s povrchem vozovky (Obr. 13).

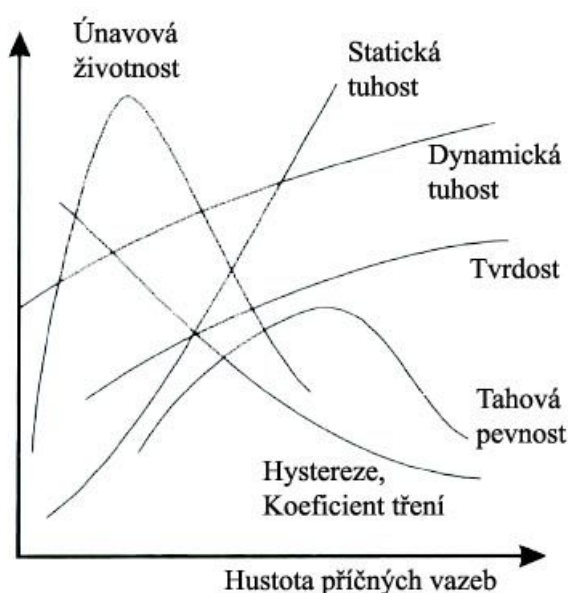
1.5 Výroba pneumatiky

Na počátku vlastního výrobního cyklu je míchání gumárenských směsí, což je vysoce energeticky náročný, vícestupňový proces, při němž jsou do základní kaučukové matrice zapracována jednotlivá aditiva. Každý stupeň míchání je charakterizován konkrétními surovinami a také teplotní charakteristikou. Při plastifikaci přírodního kaučuku se teplota pohybuje zhruba kolem 150 °C, při vmíchávání aditiv pak kolem 125 °C. Ve finální etapě – vmíchávání vulkanizačního systému – již teplota musí klesnout až na zhruba 100 °C (dle [7]). Teplotní režim a jeho zvládnutí v celém procesu je klíčovým technologickým faktorem výroby pneumatik.



Po míchání směsi následuje příprava polotovarů. Polotovary lze podle způsobu jejich výroby rozdělit do tří základních skupin: na vytlačované polotovary (běhoun, bočnice, vnitřní vrstva), pogumovaný textil (kordové vložky) a na patní lana. Vytlačování polotovarů probíhá ve dvou etapách. Při první se směs ohřívá a homogenizuje ve šnekovém tubusu. Poté následuje vlastní vytlačení: tvar a rozměry jsou dány tzv. vytlačovací hlavou a šablonou. Nakonec je polotovar rozsekán na úseky podle požadované délky dané rozměrem pláště.

V této fázi je již připraveno vše pro kompletaci pneumatiky, pro niž se všeobecně vžil pojem **konfekce**. Při klasické konfekci se pneumatika na konfekčním bubnu skládá směrem zevnitř k vrchní části, tedy od vnitřní vrstvy bránící úniku vzduchu z vnitřku pneumatiky, přes kordové vložky, nárazník, bočnici, patní lano až po běhoun. Speciálním druhem konfekce je tzv. namotávaná konfekce. Této technologii se používá zejména při výrobě velkorozměrových plášťů, protože při ní odpadá problematická manipulace s běhounem. Celá konfekce běhounu spočívá v postupném navíjení pásu běhounové směsi na již připravenou kostru pneumatiky. Výsledkem je surová pneumatika (green tyre) neboli karkasa, která již vzdáleně připomíná výsledný produkt.



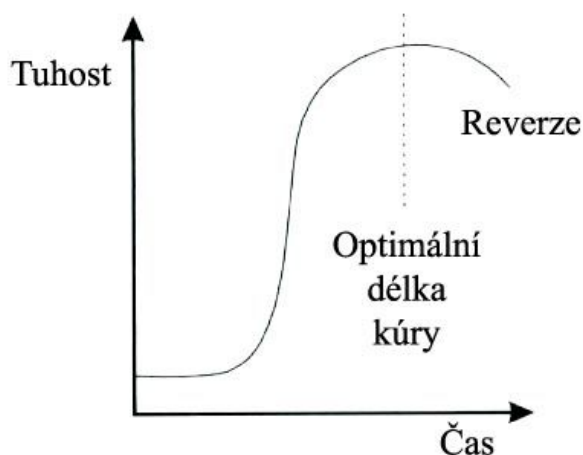
Obr. 14: Vliv vulkanizace [3]

Po kompletaci následuje proces vulkanizace. Je to proces, při kterém se vytvářejí dříve zmiňované příčné vazby mezi molekulami polymeru pryže s příměšovými částicemi. Obr. 14 ukazuje změnu charakteristik pryže v závislosti na pokračující vulkanizaci. Obvyklá doba vulkanizace bývá dle [3] 50 až 60 minut při 145 °C. Často se pryžová směs označuje jako „podvulkanizovaná“ či „převulkanizovaná“, což je relativní termín vyjadřující dobu vulkanizace po požadovanou směs.

Obr. 15 znázorňuje průběh tuhosti v čase vulkanizačního procesu. Surový materiál je při tomto procesu zahříván a vlivem vytváření příčných vazeb tuhne. Po skončení této kúry a vyjmutí materiálu z formy, proces vulkanizace pokračuje samovolně dál a vlastnosti materiálu



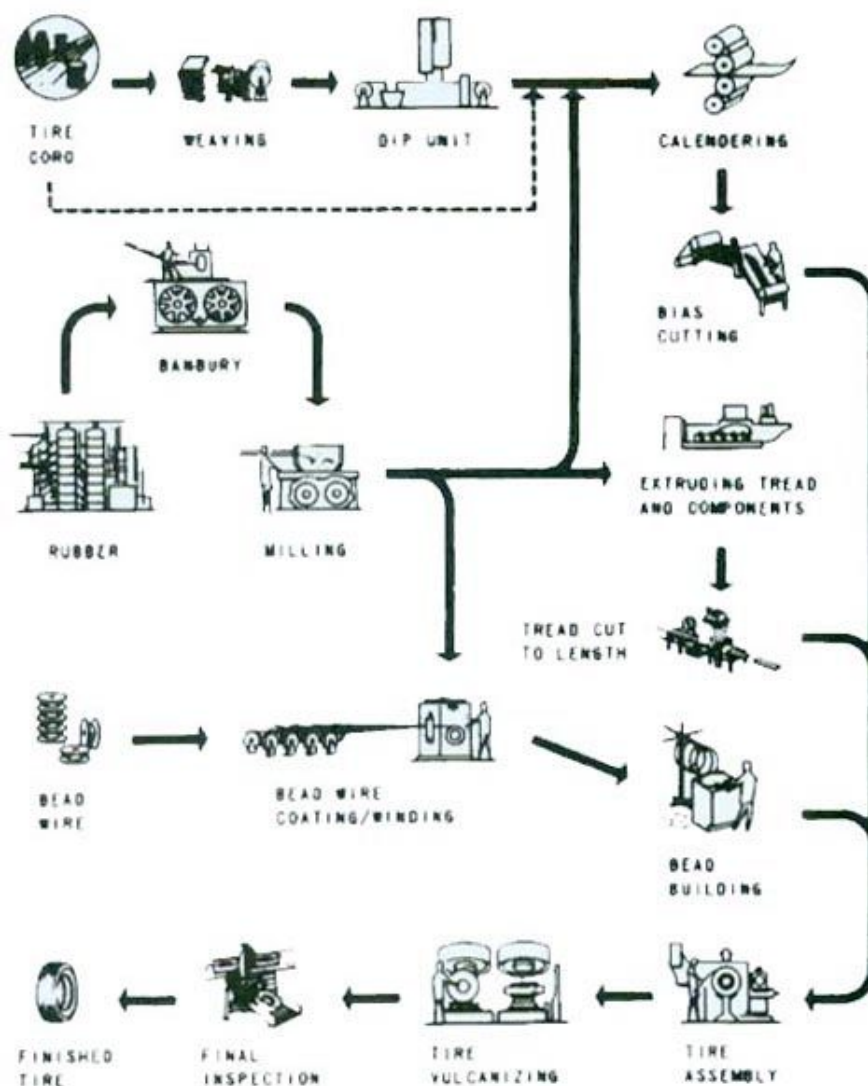
se mění. Pokud vulkanizace zajde příliš daleko (materiál se převulkanizuje), ztrácí materiál pevnost, stává se měkčím a mění se zpět do nevulkanizovaného stavu. Tento jev se při provozu může vyskytnout např. při přehřátí pneumatik, kdy dojde k tvorbě puchýřů na běhounu (blistering).



Obr. 15: Proces vulkanizace [3]

Konstrukce forem, zejména konstrukce jejich povrchu, je určující pro povrch pneumatiky, a především pak pro dezén. Vedle dezénových drážek jsou na formě ještě odvodušňovací trysky. Těmito tenkými kapilárami jsou odváděny plynné vulkanizační zplodiny z vnitřních částí pláště tak, aby nedocházelo k uzavření vzduchu a následně k separacím materiálu. Konstrukce vulkanizační formy je vedle složení a vlastností směsi, přesných polotovarů a správně provedené konfekce jedním z nejdůležitějších faktorů při výrobě kvalitních pneumatik. Při vulkanizaci neprobíhají pouze chemické procesy, ale také značný přesun hmoty uvnitř vulkanizační formy.

Po vyjmutí z formy, vychladnutí a stabilizaci přichází pneumatika na výstupní kontrolu. Při ní se nejprve provádí důkladná vizuální kontrola, u rychlostních pneumatik (pro osobní, a nákladní automobily a pro autobusy) následuje ještě rentgenová kontrola. Při ní je možné objevit i některé drobnější defekty uvnitř pláště, například takzvanou mikroseparaci.



Obr. 16: Proces výroby pneumatiky [3]

1.6 Vybrané parametry pneumatik

V této kapitole jsou uvedeny a objasněny některé fyzikální veličiny a parametry pneumatik, které jsou důležité pro měření prováděná v kapitole 3.

1.6.1 Modul pružnosti

Modul pružnosti je míra odporu materiálu vůči deformaci, tj. míra tuhosti materiálu. Je definován poměrem síly působící kolmo na jednotku plochy k deformaci, kterou tato síla působí, v oblasti malých deformací. Jednotkou modulu pružnosti jsou obvykle megapascaly (MPa). Obecně je vyjádřen vztahem:



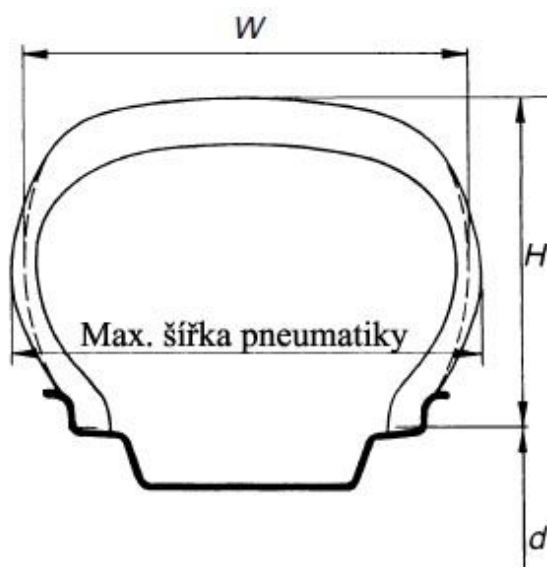
$$K = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (3)$$

Rozeznáváme různé moduly pružnosti: modul pružnosti v tahu (E – Youngův modul pružnosti), ve smyku (G), modul objemové pružnosti (γ) apod.

1.6.2 Rozměry pneumatiky

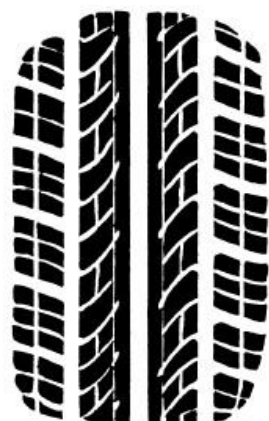
Na pružící a tlumící vlastnosti pneumatiky má velký vliv nejen typ její konstrukce, ale také její rozměry. Tím nejdůležitějším je v tomto ohledu tzv. **profil pneumatiky**, což je procentuální vyjádření poměru výšky pneumatiky k její šířce, jak je znázorněno na Obr. 17.

$$\text{profil pneumatiky} = \frac{H}{W} \quad (4)$$



Obr. 17: Definice profilu pneumatiky [1]

Šířka pneumatiky se měří na nenahuštěné (nové) pneumatice. Maximální šířka pneumatiky po nahuštění je větší a musí se brát v potaz při konstrukci podběhu automobilu. Profilové číslo je na pneumatice uvedeno vždy za lomítkem. Kromě vlastností pneumatiky ovlivňuje ještě velikost stopy (kontaktní plochy pneumatiky s vozovkou), a sice jak její šířku, tak i její délku. Na následujícím obrázku je uveden příklad rozdílných velikostí stopy pro pneumatiky osobních automobilů, které mají stejný vnější průměr a jsou stejně zatíženy.



175/80 R 14 88T
ContiEcoContact EP



195/65 R 15 91 V
ContiEcoContact CP



205/55 R 16 91W
ContiSportContact



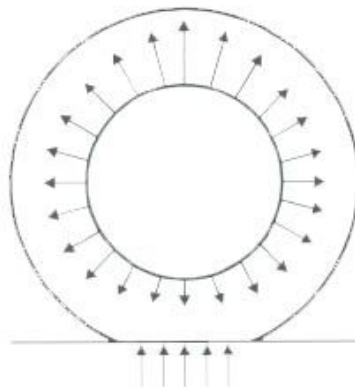
225/45 ZR 17
ContiSportContact

Obr. 18: Srovnání velikostí stop pneumatik [1]

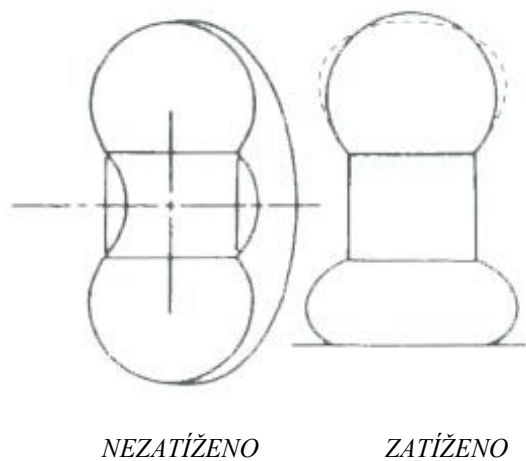
1.6.3 Zatížení pneumatiky

Zatížení pneumatiky je dalším aspektem, který ovlivňuje velikost stopy. Váha vozidla spočívá na disku kola a přechází přes bočnice pneumatiky do kontaktní plochy pneumatiky s vozovkou. Obr. 19 ukazuje rozložení napětí v bočnici zatížené pneumatiky. Kolo je doslova zavěšeno za bočnice, což způsobuje tahové zatížení kordů v horní části pneumatiky a tlakové v oblasti blízko kontaktní plochy.

Schématické znázornění změny tvaru pneumatiky pod zatížením ukazuje ve dvou pohledech Obr. 20. Kordy bočnic pneumatiky jsou namáhány jak působením tlaku uvnitř pneumatiky, tak jejím vnějším zatížením. Kontaktní plocha vertikálně zatížené pneumatiky se deformuje a dochází ke zmenšení vnitřního objemu v této oblasti. Bočnice segmentu pneumatiky, které se nenacházejí ve stopě se vyboolí tak, aby vnitřní objem v tomto segmentu byl tožný s objemem v kontaktní oblasti.

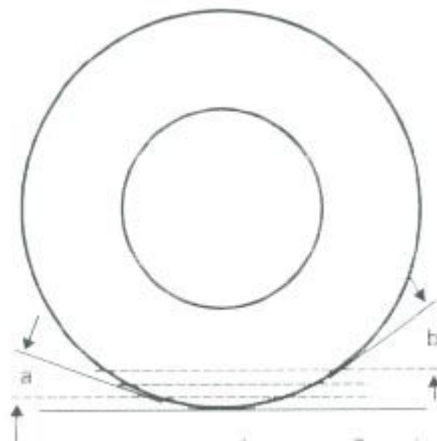


Obr. 20: Rozložení napětí v zatížené pneumatice [3]



Obr. 19: Změna tvaru pneumatiky (čárkovaně – nezatížený stav) [3]

Následující obrázek znázorňuje ještě jiný pohled na deformaci pneumatiky způsobený jejím vertikálním zatížením. Jelikož vnitřní tlak pneumatiky „podpírá“ toto zatížení, je s jeho vzrůstem zapotřebí větší kontaktní plochy, která se (jak jsem se již zmínil) nemůže rozšířit, avšak může se prodloužit.



Obr. 21: Prodlužování stopy různě zatěžované pneumatiky [3]



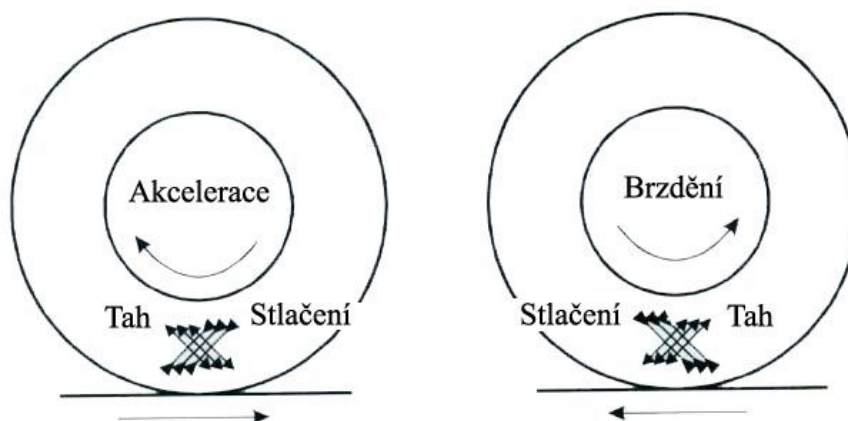
1.6.4 Tlak v pneumatice - huštění

Tlak v pneumatice je tedy podpora, která drží váhu vozidla. Pokud na pneumatiku působí vertikální síla, tlak uvnitř se snaží této síle odolat vytvořením kontaktní plochy určité velikosti. Vztah mezi tlakem vzduchu v pneumatice, velikostí kontaktní plochy a vertikálním zatížením je základní fyzikální vztah pro definici tlaku (Pa, MPa):

$$p = \frac{F}{S} \quad (5)$$

Větší zatížení při stejném vnitřním tlaku způsobuje zvětšení kontaktní plochy, která je přibližně čtvercová (viz Obr. 18). Jelikož však její šířka je dána konstrukčně šířkou pneumatiky, dochází pouze ke zvětšování délky. Z Obr. 21 je patrné, že delší kontaktní plocha znamená, že kordy běhounu se ohýbají pod větším úhlem při vstupu a výstupu z kontaktu s vozovkou. Tento ohyb přes větší úhel znamená vytváření tepla a větší únavové napětí v kordech. Za jízdy se kontaktní plocha v podstatě otáčí po obvodu kolem celé pneumatiky. Vysoce zatížená pneumatika provozovaná delší dobu v podhuštěném stavu může vyprodukovat velké množství tepla a vzrůst napětí, že dojde k jejímu zničení. Faktor huštění je tedy velmi důležitý pro zatížitelnost pneumatiky.

Při rozjezdu vozidla anebo při jeho brzdění dochází v bočnicích ke změně směru sil působících ve vláknech. Jelikož jsou vlákna mnohem pevnější na tah než na tlak, jsou nezbytné minimálně dvě vrstvy pro pojmnutí těchto sil. Následující obrázek ilustruje změny sil v bočnicích. Řádné nahuštění pneumatiky vytváří dostatečné statické napětí v bočnicích, které zajišťuje dostatečné napětí v kterýkoliv okamžik i při dynamických podmínkách.

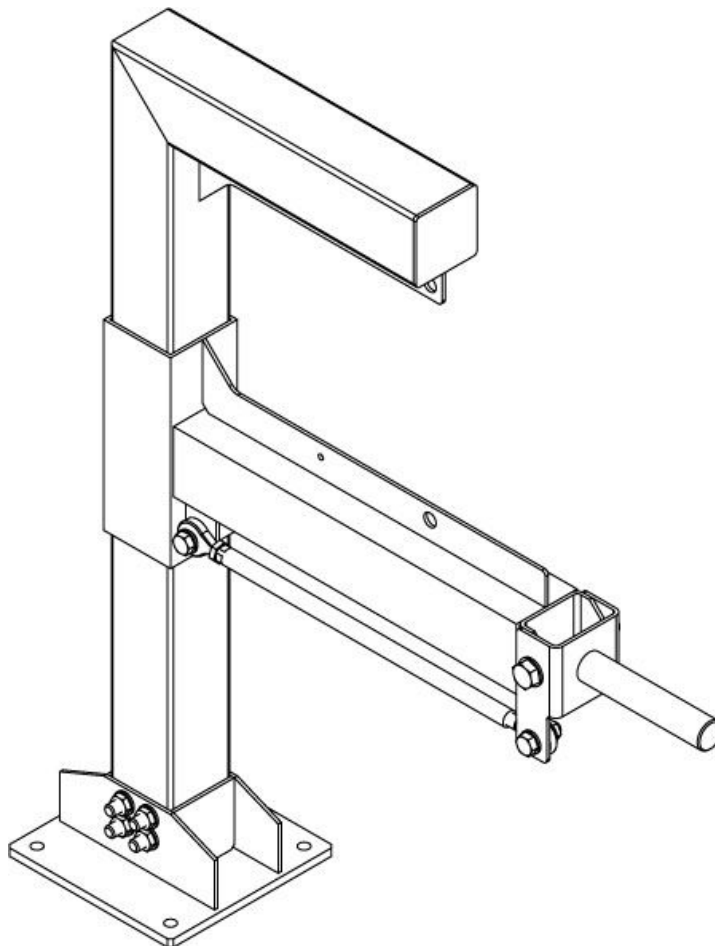


Obr. 22: Síly v kordech bočnic [3]

Velikost stopy, vertikální zatížení, rozměry pneumatiky a vnitřní tlak v pneumatice jsou parametry navzájem těsně svázané. Změna jednoho z nich vede ke změně ostatních. Vzájemnými závislostmi mezi nimi se podrobně zabývá kapitola 3, kde jsou provedena příslušná měření těchto závislostí.



2 Měřicí zařízení



Obr. 23: Měřicí zařízení – celkový pohled na sestavu

2.1 Popis měřicího zařízení

Konstrukce znázorněná na předchozím obrázku je víceúčelové zařízení pro měření těchto parametrů pneumatik: velikost stopy, rozložení měrných tlaků ve stopě a pružící a tlumící vlastnosti pneumatiky. Zařízení je konstruováno pro použití v dílnách strojí fakulty VUT, tudíž při jeho návrhu byly zohledněny i možnosti využití některých dílů, příslušenství a stávajícího vybavení dílen.

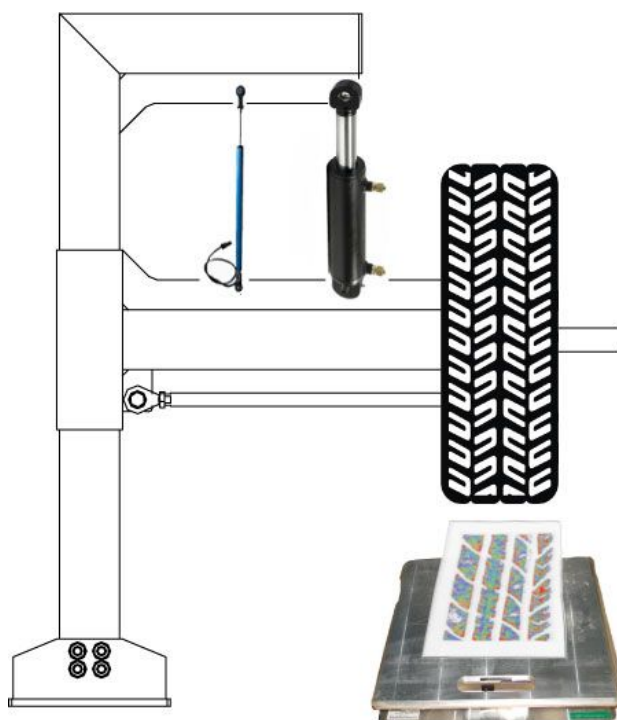
Pneumatika obutá na běžném automobilovém disku se nasadí na náboj s hřídelí (díl sestavy č. 4), vycentruje pomocí kužele (díl č. 7) a dotáhne pomocí upínací matice (díl č. 6). Jelikož je závit hřídele navržen totožný se závitem na dílenské vyvažovačce, není třeba součásti č. 6 a 7 vyrábět a mohou se tak použít ty díly, které jsou příslušenstvím vyvažovačky.



Zatížení na pneumatice je měřeno dílenskou váhou (např. Longacre Matrix pro závodní účely) vloženou pod pneumatiku. Toto vertikální zatížení je vyvozováno pomocí hydraulického válce namontovaného do děr o průměru 20 mm. Pro účely měření jsem zvolil válec s označením HM1.2 32x18/250 121A111 (dostupný na <http://safranek-hydraulika.wz.cz/>), jehož zdvih je 250 mm, pracovní tlak 16 MPa, a maximální výsuvná síla 12,2 kN). Je možné použít kterýkoliv jiný s alespoň přibližně stejnými parametry, avšak hodnota maximální výsuvné síly nesmí být překročena, jelikož zařízení je dimenzováno nejvýše na tuto hodnotu. Datový list vybraného válce tvoří Přílohu č. 2 této diplomové práce.

Při měření pružících a tlumících vlastností pneumatiky je pro zjištění deformace pneumatiky potřeba ještě do děr o průměru 8 mm namontovat lineární snímač dráhy. Vybral jsem GEFRAN PC 225 (dostupný na www.bamas-elektro.cz) se zdvihem 225 mm. Rovněž je možné použít i jiný s přibližně stejnými parametry, které jsou uvedeny v datovém listu (Příloha č. 3).

Obr. 24 uvádí schématický pohled na celkovou konfiguraci zařízení. Pro měření měrných tlaků se navíc mezi pneumatiku a váhu vkládá tlakocitlivý papír, který je rovněž uveden na obrázku. Princip tohoto měření bude popsán podrobněji v kapitole 3.1.



Obr. 24: Měřicí zařízení – provozní schéma

Zařízení je uzpůsobeno tak, aby bylo možné měnit odklon kola při měření, a to jak do kladných, tak i do záporných hodnot. K tomu slouží táhlo (díl sestavy č. 5) na svých koncích opatřené kulovými kloubovými hlavicemi a jednou aretační maticí. Dle použitých hlavic je možné měnit úhel odklonu v rozsahu až $\pm 5^\circ$. O významu vlivu odklonu na vlastnosti pneumatiky pojednává následující podkapitola.

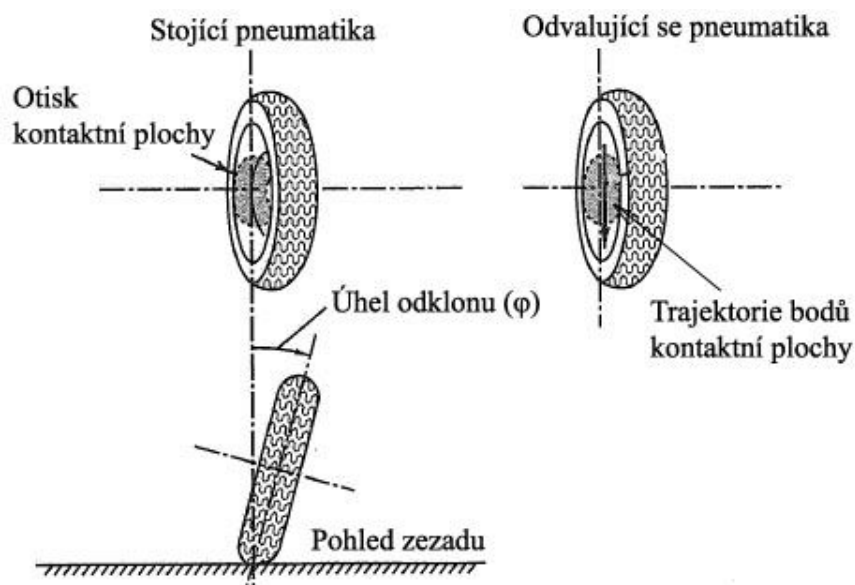


2.1.1 Vliv odklonu kola

Odklon kola je úhel, který svírá centrální rovina kola s kolmicí na vozovku, spuštěnou v bodě kontaktu kola a vozovky. Pozitivní odklon znamená náklon horní části kola směrem od vozidla a negativní odklon je náklon směrem k vozidlu.

Pneumatika s nenulovým odklonem vytváří boční sílu ve směru odklonu. Pokud se tato síla vyskytuje při nenulovém smykovém úhlu (tj. když se pneumatika nepohybuje přímo ve směru své centrální roviny), nazývá se jako „tah odklonu“ (camber thrust) [2]. Síla způsobená odklonem kola závisí např. na konstrukci, tvaru, typu pneumatiky, tlaku v pneumatice, úhlu odklonu či úhlu smyku. Experimentálně bylo zjištěno, že tah odklonu vzniká boční deformací stopy pneumatiky. Pokud je stojící pneumatika s nenulovým odklonem zatížena, centrální rovina stopy je zakřivena (viz Obr. 25). Pokud se však pneumatika odvaluje, jsou body vstupující do kontaktní plochy vozovkou nuceny pohybovat se stopou po přímé trajektorii, danou směrem pohybu pneumatiky. Vozovka působí na pneumatiku silami, které se snaží odstranit zakřivení trajektorie stojící pneumatiky. Suma těchto sil je právě tah odklonu.

U běžných pneumatik pro automobily dosahují hodnoty bočních sil vyvolaných odklonem svých maxim při úhlech odklonu cca 5° , pak hodnoty prudce klesají. Pneumatiky pro motocykly produkují užitečnou boční sílu až do odklonu přibližně 50° .



Obr. 25: Deformace stopy pneumatiky při odklonu kola [2]

Vlivem nenulového odklonu tvoří kolo ve styku s vozovkou kuželovou plochu a má snahu se odvalovat po kružnici, jejíž střed leží v průsečíku osy kola s rovinou vozovky. Kola se přitom odvalují směrem k sobě či od sebe (při negativním nebo pozitivním odklonu), což snižuje sklon ke kmitání a odklon kola tak má vliv na stabilitu vozidla v přímém směru.

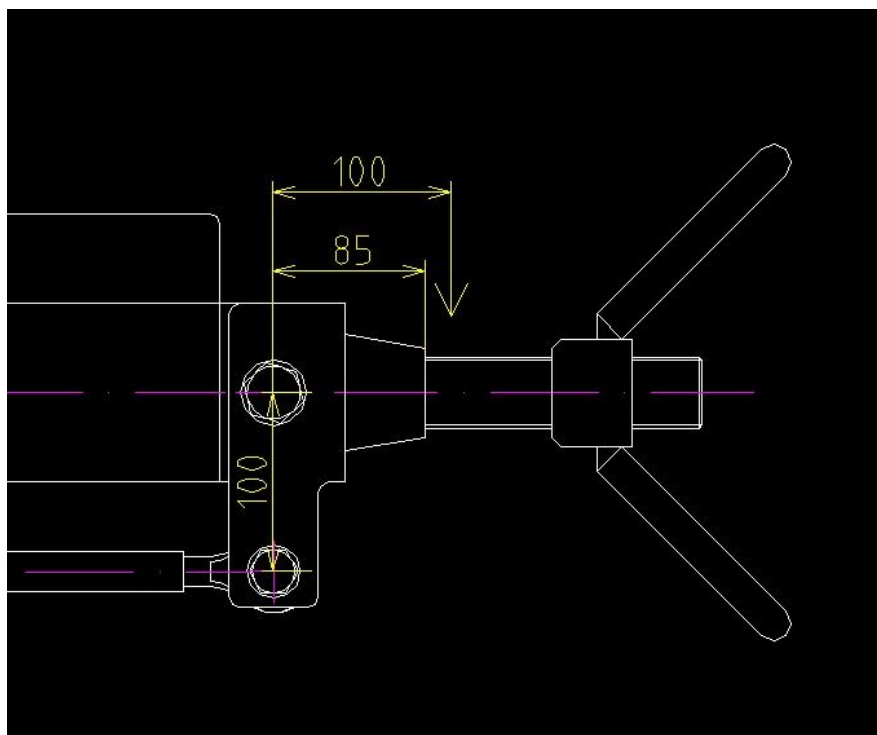
Odklon rovněž ovlivňuje životnost a zatížitelnost pneumatiky. Dle [3] klesá zatížitelnost při odklonu 4° až na 95%. Kompenzaci je možno provést zvýšením tlaku v pneumatice (viz kapitolu 1.6.4).



2.2 Konstrukční výpočty

2.2.1 Kontrolní výpočet pevnosti táhla v tahu

Táhlo sloužící k nastavení odklonu kola (dílec sestavy č. 5), je při zatěžování namáháno na tah. Velikost působící síly závisí na poloze usazení disku s testovanou pneumatikou na hřídeli měřicího zařízení. Jelikož je disk středěn usazením na kuželu (díl sestavy č. 7), lze největší vzdálenost bodu usazení disku od osy otáčení jednoznačně určit. Při výpočtu však uvažuji nejméně příznivý stav a rovněž pro zjednodušení volím stav, kdy bude disk působit na hřídel ve stejné vzdálenosti od osy otáčení, jako je vzdálenost této osy od bodu upevnění táhla (viz Obr. 26), čili 100 mm.



Obr. 26: Schéma polohy usazení disku s pneumatikou

Při této konfiguraci bude působící síla rovna síle zatěžovací. Jako velikost zatěžovací síly uvažuji maximální výsuvnou sílu hydraulického válce, tj 12,2 kN. Výpočet je následující:

Průřez táhla:

$$S = \frac{\pi \cdot d^2}{4}, \quad (6)$$

kde d je průměr táhla, $d = 22$ mm



$$S = \frac{\pi \cdot 22^2}{4} = 380,133 \text{ mm}^2 \quad (7)$$

Napětí v tahu:

$$\sigma = \frac{F}{S}, \quad (8)$$

kde F je zatěžovací síla. $F = 12\,200 \text{ N}$

$$\sigma = \frac{12\,200}{380,133} = 32,1 \text{ MPa} \quad (9)$$

Táhlo je vyrobeno z materiálu 11 600, jehož dovolené napětí v tahu je dle [9] pro míjivý průběh 110-165 MPa. Koeficient bezpečnosti je tedy nejméně:

$$k = \frac{110}{32,1} = 3,43 \quad (10)$$

2.2.2 Kontrolní výpočet na měrný tlak v závitech táhla

Na koncích táhla jsou našroubovány kloubové hlavice SKF SAKB 16F a SALKB 16F, jejichž maximální statické ztížení dle [11] je 34,5 kN a dynamické 21,4 kN. Průměr závitu těchto hlavice je 16 mm. Pro měrný tlak ve styčných plochách závitu platí:

$$p = \frac{4 \cdot F}{i \cdot \pi \cdot (D_1^2 - d_1^2)}, \quad (11)$$

kde i je počet závitů v kontaktu, volím $i = 5$,
 D_1 je vnější průměr závitu, $D_1 = 16 \text{ mm}$,
 d_1 je dle [10] 13,835 mm.

$$p = \frac{4 \cdot 12\,200}{5 \cdot \pi \cdot (16^2 - 13,835^2)} = 48,1 \text{ MPa} < p_{max} \quad (12)$$

Nejvyšší hodnota tlaku p_{max} pro materiál táhla 11600 je dle [9] 80-180 MPa.

2.2.3 Kontrola šroubů táhla na stříh

Táhlo je ukotveno k náboji (díl sestavy č. 4) a k nosníku II. (díl sestavy č. 2) pomocí lícovaných šroubů M16. Tyto šrouby jsou namáhány na stříh a platí:



$$\tau_s = \frac{4 \cdot F}{\pi \cdot d^2}, \quad (13)$$

kde d je průměr střižné plochy, $d = 16$ mm.

$$\tau_s = \frac{4 \cdot 12\,200}{\pi \cdot 16^2} = 60,68 \text{ MPa} < \tau_D \quad (14)$$

Dovolené napětí pro materiál šroubů 8.8, které jsou zatíženy rázy je podle [9]:

$$\tau_D = 0,3 \cdot R_e, \quad (15)$$

kde R_e , je mez kluzu, R_e (resp. $R_{p0,2}$) = 640 MPa (pro průměr šroubu ≥ 16 mm) a výsledkem tedy je maximální dovolené napětí:

$$\tau_D = 0,3 \cdot 640 = 192 \text{ MPa}. \quad (16)$$

Kontrolní výpočet sevřených součástí na otláčení je definován dle vztahu:

$$p = \frac{F}{s_{min} \cdot d}, \quad (17)$$

kde s_{min} je vzdálenost výběhu závitu od spoje, volím $s_{min} = 10$ mm.

$$p = \frac{12\,200}{10 \cdot 16} = 76,25 \text{ MPa} < p_{max} \quad (18)$$

Dovolený tlak ve stykových plochách pro materiál S450J0, ze kterého jsou vyrobeny sevřené součásti, je dle [12] 185-250 MPa.

2.2.4 Kontrola šroubového spojení náboje a nosníku II.

Spojení mezi nábojem a nosníkem II je realizováno lícovaným šroubem o průměru 20 mm (díl sestavy č. 10). Tento šroub je rovněž namáhán stříhem a platí pro něj vztahy (13) až (18). Materiál šroubu je volen taktéž 8.8.

$$\tau_s = \frac{4 \cdot 12\,200}{\pi \cdot 20^2} = 38,83 \text{ MPa} < \tau_D \quad (19)$$

$$p = \frac{12\,200}{10 \cdot 20} = 61 \text{ MPa} < p_{max} \quad (20)$$



2.2.5 Kontrola šroubů v patce na stříh

Měřicí zařízení je upevněno v patce (díl sestavy č. 3) pomocí čtyř lícovaných šroubů o průměru 16 mm vyrobených z materiálu 8.8. Při zatížení jsou i tyto šrouby namáhány na stříh a rovněž pro ně platí vztahy (13) až (18).

$$\tau_s = \frac{4 \cdot 12\,200}{\pi \cdot 16^2} = 60,67 \text{ MPa} \quad (21)$$

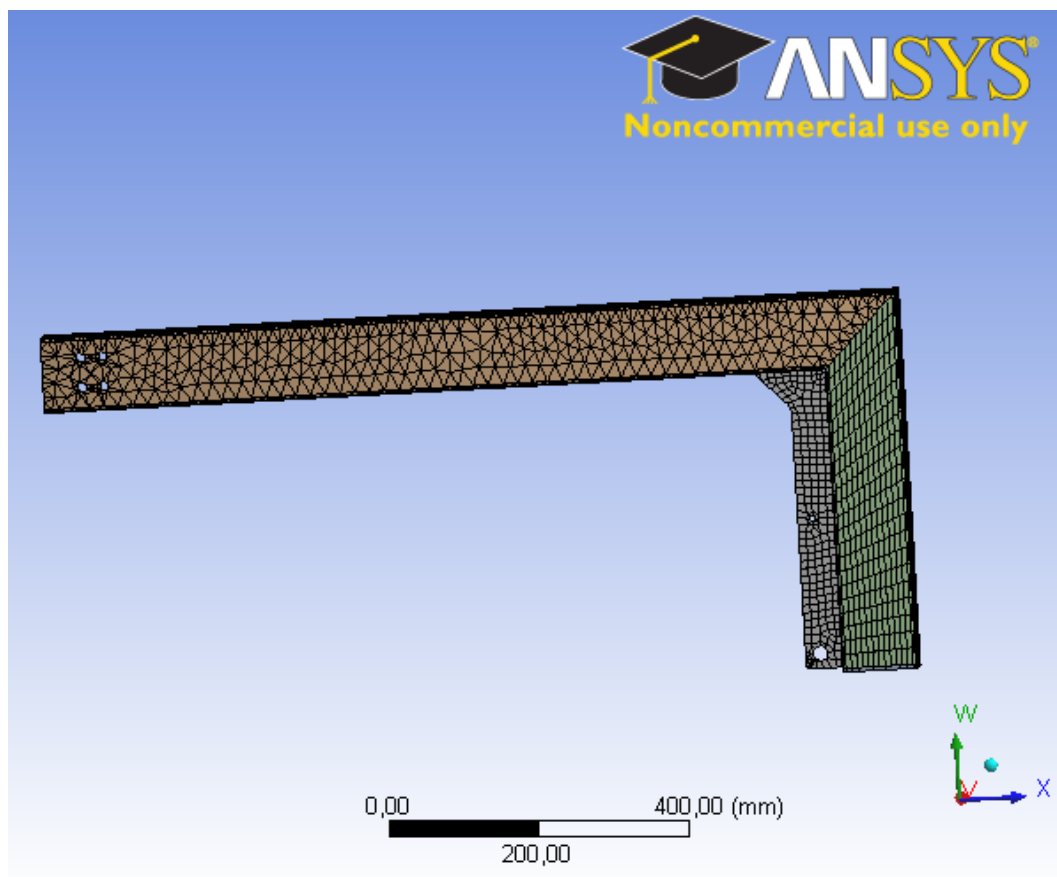
Pro jeden šroub spojení je napětí čtvrtinové, tedy 15,7 MPa, což je menší než τ_D .

$$p = \frac{12\,200}{10 \cdot 16} = 76,25 \text{ MPa} \quad (22)$$

Pro jeden šroub je měrný tlak také čtvrtinový, čili 19 MPa, což je menší než p_{\max} .

2.2.6 Simulace zatížení nosníků pomocí MKP

Pro simulaci zatížení hlavních částí konstrukce, tj. Nosníku I. (díl sestavy č. 1) a Nosníku II. (díl sestavy č. 2) byl použit program ANSYS 12.1 Workbench, do nějž byly modely importovány jako soubory typu *.igs.



Obr. 27: Ukázka vysíťovaného dílce Nosník I.



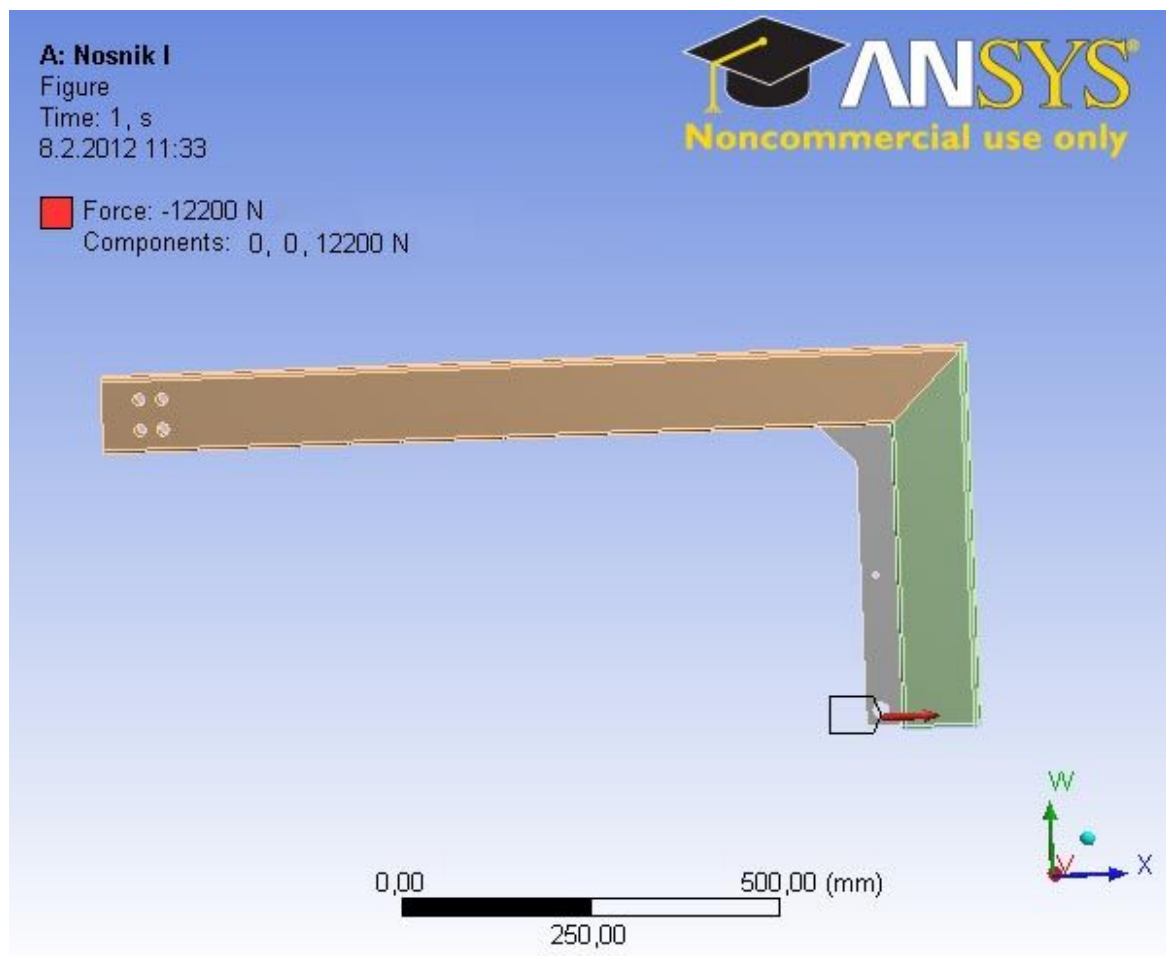
Po načtení modelů byly zadány následující materiálové vlastnosti:

- Modul pružnosti $E = 2,1 \cdot 10^5 \text{ MPa}$
- Hustota $\rho = 7850 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$.

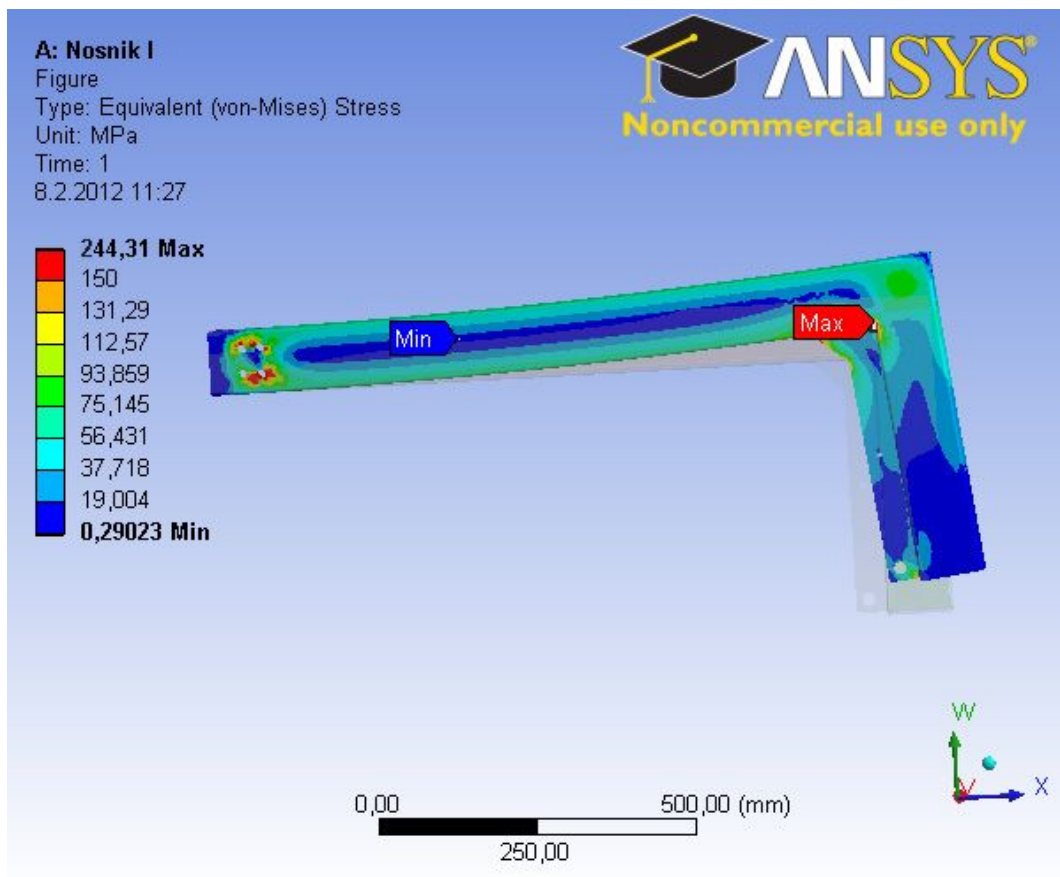
Vytvoření sítě modelů proběhlo pomocí funkce „Auto meshing“, kdy základní velikost elementů byla zvolena 20 mm a kde bylo nutné (např. v oblasti děr nebo u tvarově náročnějších prvků) byla síť zhuštěna až na velikost elementů 5 mm. Vysíťované dílce jsou znázorněny na Obr. 27 (Nosník I.) a Obr. 31 (Nosník II.).

Ukotvení modelů bylo realizováno vytvořením pomocných cylindrických souřadných systémů umístěných do os děr a omezením jejich pohybu v příslušných směrech (Nosník I.) anebo navíc omezením pohybu jednotlivých ploch dílce (Nosník II.).

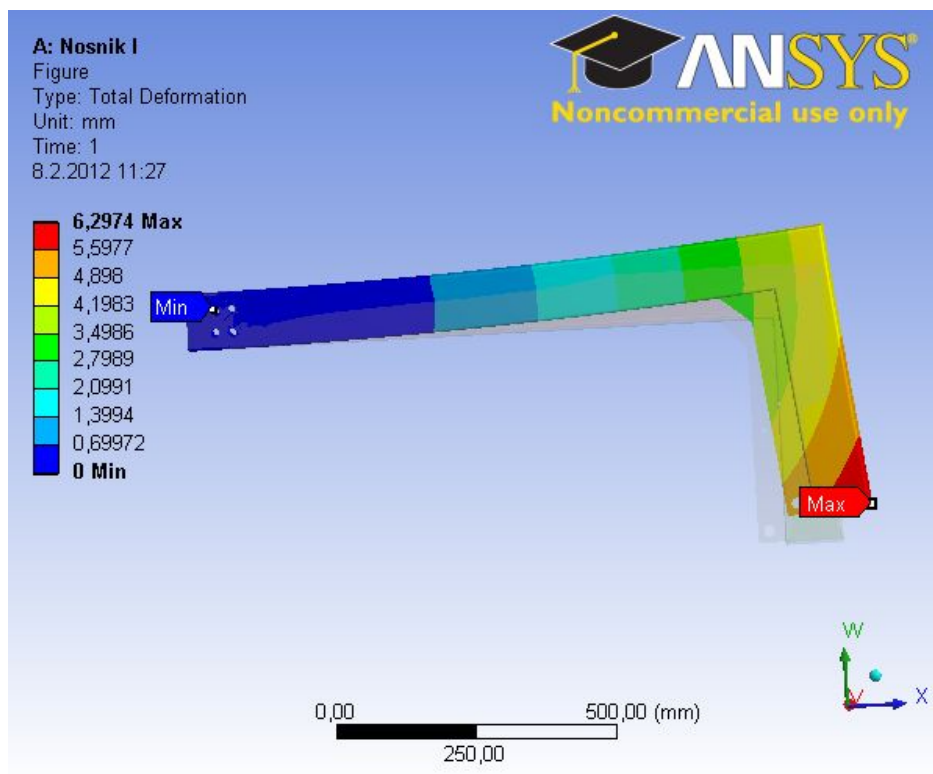
Zatížení těles bylo realizováno působením síly v otvorech pro přimontování hydraulického válce. Pro simulaci šroubového spojení byly opět vytvořeny pomocné cylindrické souřadné systémy, umístěné do os těchto montážních děr. Umístění zatěžovací síly na dílce ukazují Obr. 28 a Obr. 32. Velikost zatěžovací síly byla zvolena 12 200 N, což je největší možná síla, kterou je zvolený hydraulický válec HM1.2 32x18/250 121A111 schopen vyvinout. Reálná pracovní síla bude však s ohledem na vertikální zatížitelnost pneumatik nižší (cca 9000 N).



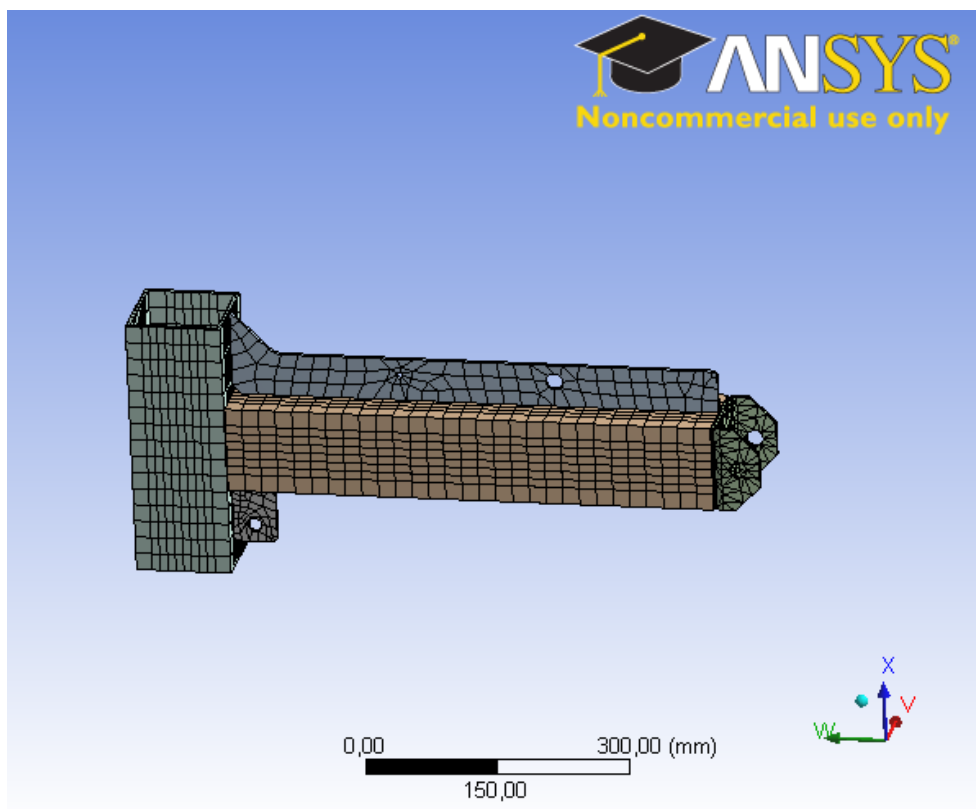
Obr. 28: Znázornění působící zatěžovací síly na dílec Nosník I.



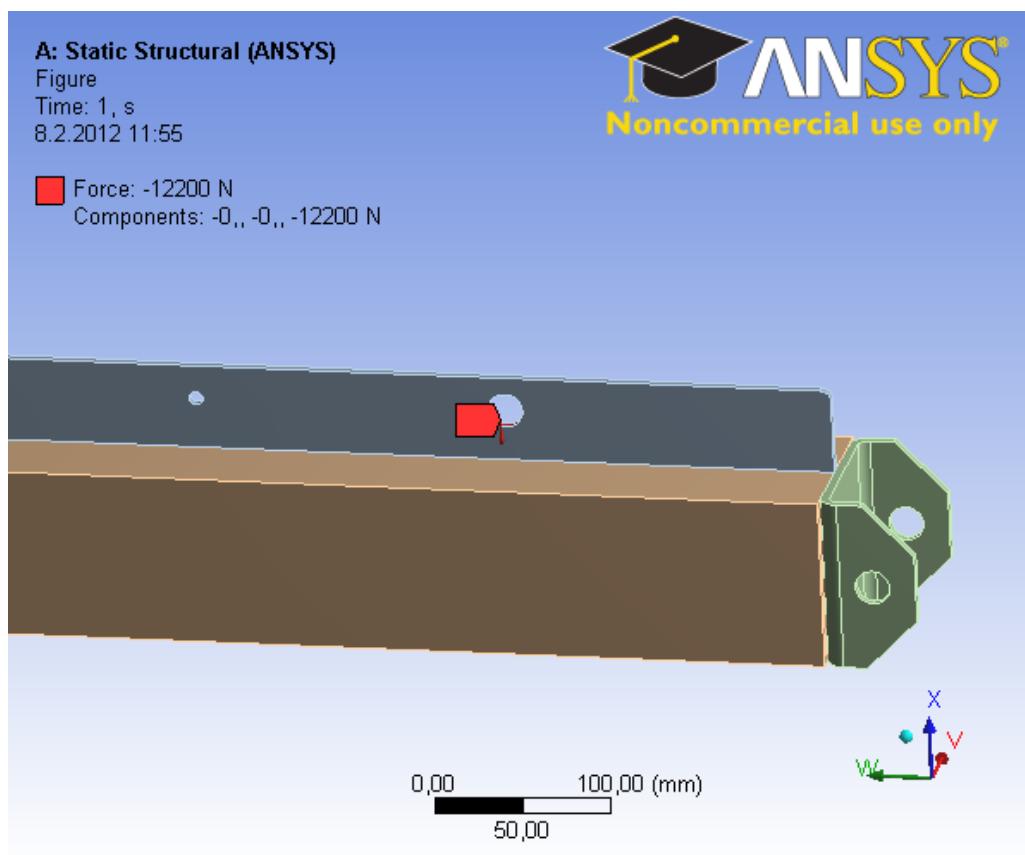
Obr. 29: Napěťová analýza (von Mises) dílce Nosník I.



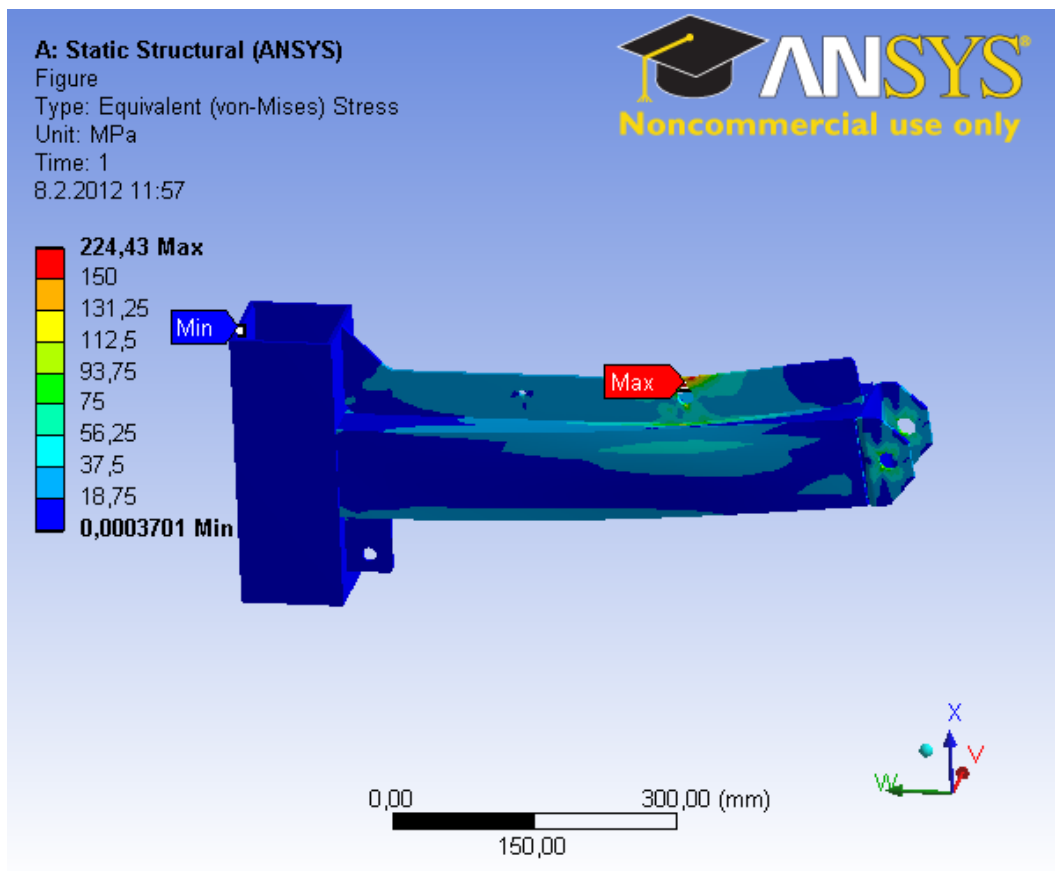
Obr. 30: Deformace dílce Nosník I. při zatížení silou 12 200 N.



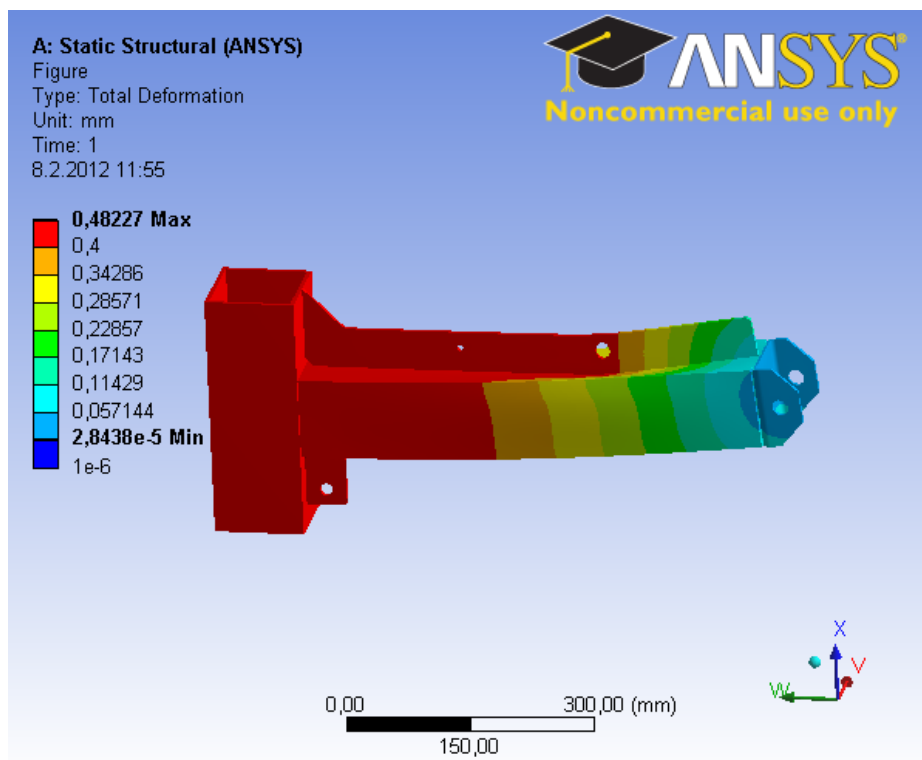
Obr. 31: Ukázka vysíťovaného dílce Nosník II.



Obr. 32: Znárodnění působící zatěžovací síly na dílec Nosník II.



Obr. 33: Napěťová analýza (von Mises) dílce Nosník II.

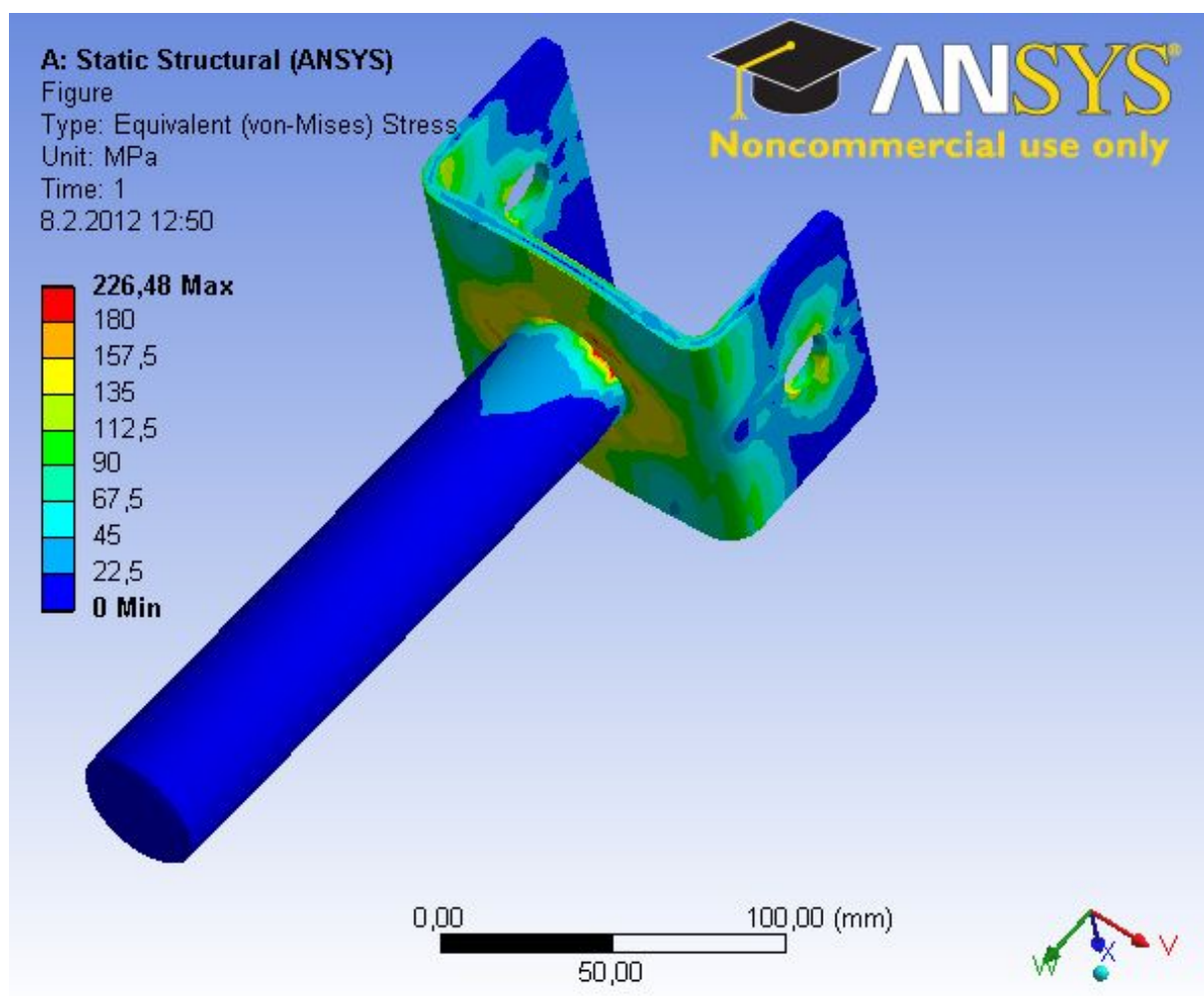


Obr. 34: Deformace dílce Nosník II. při zatížení silou 12 200 N.



Z provedené analýzy znázorněné na Obr. 29 a Obr. 33 vyplynula nutnost použít vysokopevnostní konstrukční ocel. Pro výrobu hlavních dílců byl tedy zvolen materiál S450J0, který má dle [12] dovolené napětí v ohybu pro mívivý průběh zatížení $\sigma_{DO} = 255\text{--}285\text{ MPa}$. Námi zjištěné nejvyšší hodnoty napětí byly pro „Nosník I.“ $244,31\text{ MPa}$ a pro „Nosník II.“ $224,43\text{ MPa}$, což z hlediska únavové pevnosti vyhovuje. Deformace dílců při zatížení jsou znázorněny na Obr. 30 a Obr. 34.

Pro úplnost ještě uvádím výsledek napěťové analýzy dílce „Náboj“, který je vyobrazen na následujícím obrázku. Součást byla zatížena silou $12\,200\text{ N}$, dle Obr. 26 a ukotvena v otvorech obdobně jako předcházející modely. Napěťová analýza vyšla rovněž příznivě, kdy nejvyšší napětí bylo zjištěno $226,48\text{ MPa}$.



Obr. 35: Napěťová analýza (von Mises) dílce Náboj.



2.3 Měření teploty a tlaku v pneumatice

Pro měření teplot a tlaků uvnitř pneumatiky v reálném čase jsem zvolil použití systému RETROFIT (Obr. 29). Systém se skládá z řídicí jednotky s displejem a několika (nejvýše čtyř) snímačů umístěných uvnitř pneumatik, které tvoří jeden celek s ventilkem. Výhodou je, že se dá použít již namontovaný ventilek a není třeba jej měnit za jiný, speciální.

Tento kompaktní systém je také komerčně běžně dostupný, což byl další důvod proč jsem si jej vybral. Systém je schopen bezdrátově měřit tlaky až do hodnoty 700 kPa a teplotu v rozmezí -40 až 125 °C. Důležitým údajem pro nastávající měření (kapitola 3.3) je vzorkovací frekvence systému (tj. doba mezi snímáním jednotlivých hodnot), která činí 2 minuty. Tato doba je pro naše účely dostačující.



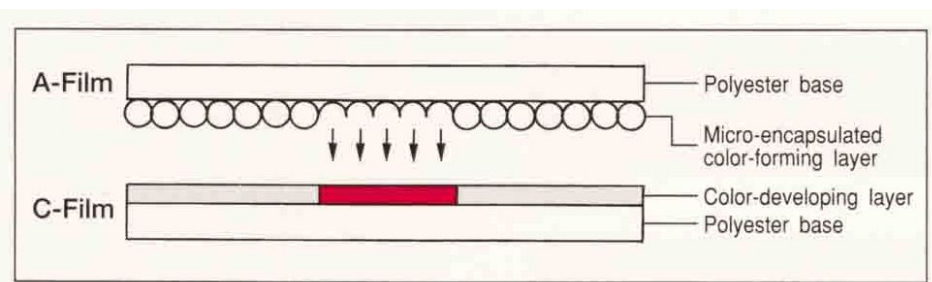
Obr. 36: Systém RETROFIT pro sledování tlaku a teploty v pneumatice



3 Provedení měření a vyhodnocení výsledků

3.1 Měření vlivu velikosti pneumatiky, jejího huštění a provedení dezénu na velikost stopy pneumatiky.

Při měření byla analyzována běžná civilní pneumatika CONTINENTAL o rozměru 195/55 R15 a dále pro srovnání závodní pneumatika MATADOR slick s rozměry 180/530 R13 a 210/560 R13. Pro informativní měření rozložení tlaků ve stopě byl použit tlakocitlivý film FUJI Prescale, jehož princip znázorňuje obr. 37. Film se skládá ze dvou vrstev, které se k sobě přiloží a po aplikaci tlaku dojde k porušení mikrokapslí obsahujících zbarvovací látky. Mikrokapsle jsou navrženy tak, aby jejich destrukce probíhala v závislosti na aplikovaném zatížení a intenzita výsledného zbarvení tak odpovídala úrovni působícího tlaku. Intenzita barvy se pak porovnává s barevnou škálou intenzit a výsledný působící tlak se určí odečtením z grafu v závislosti na zbarvení a na okolních podmínkách měření.



Obr. 37: Princip tlakocitlivého filmu FUJI Prescale [13]

Měření bylo realizováno nejprve pro odklon kola 0° a na pneumatikách bez vzorku, aby bylo možné výpočtem snadno ověřit závislost velikosti stopy na tlaku uvnitř pneumatiky (obr. 38 a obr. 39). Výpočet velikosti plochy byl proveden po elektronickém zpracování otisků v programu AutoCAD pomocí funkce „PLOCHA“. Pro pneumatiku o rozměrech 180/530 R13 byl proveden následující výpočet:

vnitřní tlak v pneumatice $p_m = 1,4 \text{ bar} = 0,14 \text{ MPa}$
 vertikální zatížení pneumatiky $m = 115 \text{ kg} \rightarrow 1128,15 \text{ N}$

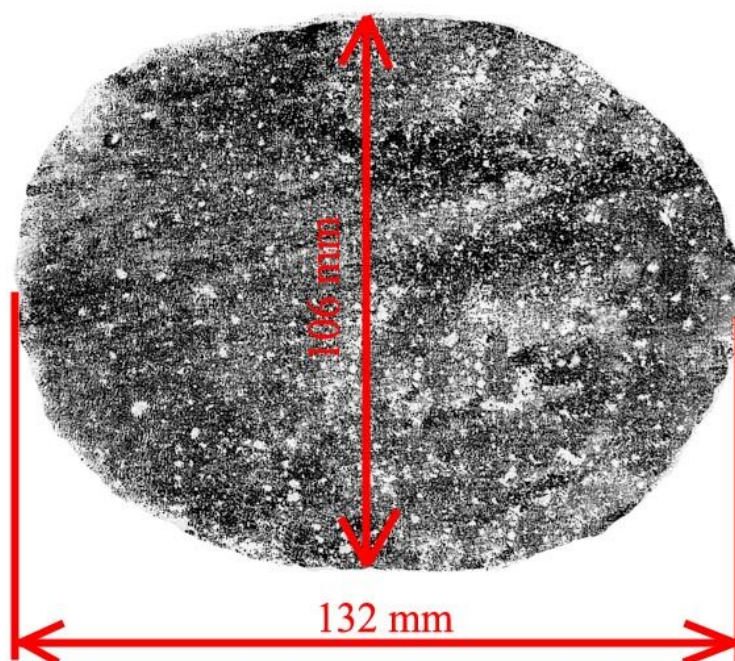
$$S = \frac{F}{p_{in}} = \frac{1128,15}{0,14 \cdot 10^6} = 80,5821 \text{ cm}^2 \quad (23)$$

změřená velikost plochy $S' = 78,82345 \text{ cm}^2$

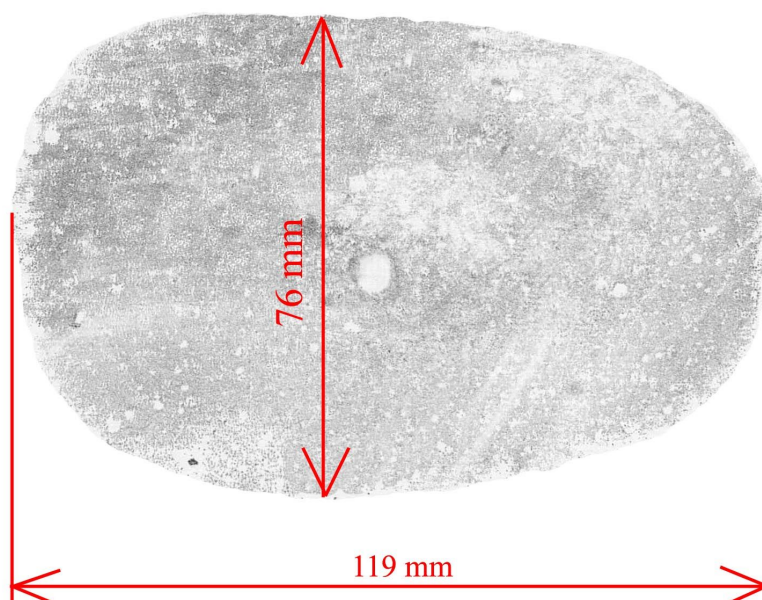
$$\text{relativní chyba měření: } \delta_s = \frac{S' - S}{S'} = \frac{78,82345 - 80,5821}{80,5821} = 2,2 \% \quad (24)$$

Souhrnné výsledky jsou pro všechna měření uvedeny v tabulce č.1 a č.2 v závěru podkapitoly.

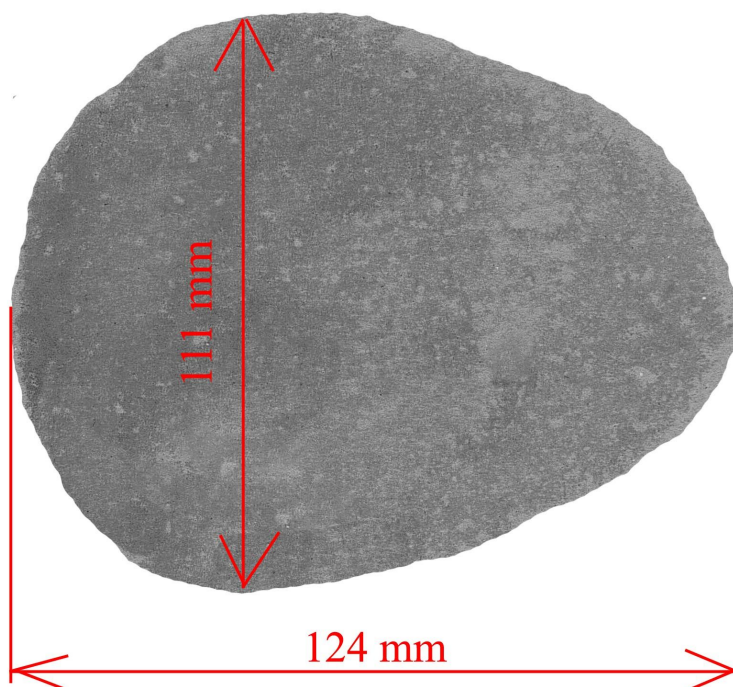
Na následujících obrázcích jsou znázorněny stopy mnou měřených pneumatik. Ačkoliv měřítko nebylo z typografických důvodů zachováno, jsou pro ilustraci uvedeny i největší rozměry všech stop.



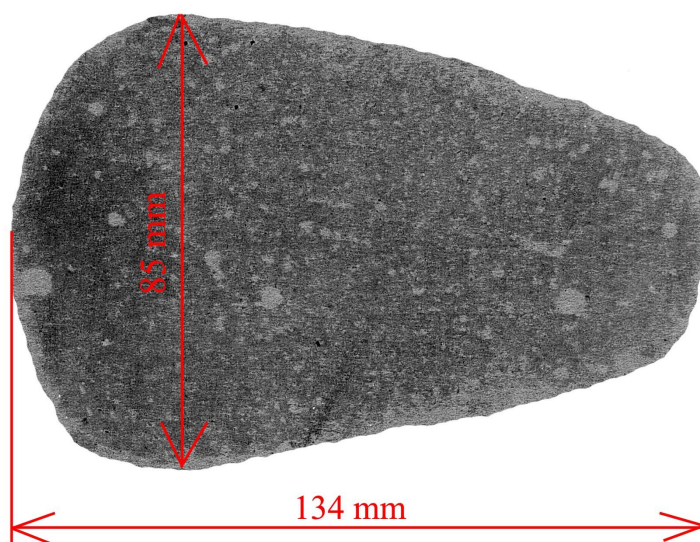
Obr. 38: Stopa pneumatiky slick 180/530 R13 při $p_{in} = 1$ bar, vertikálním zatížení = 115 kg a odklonu kola = 0°



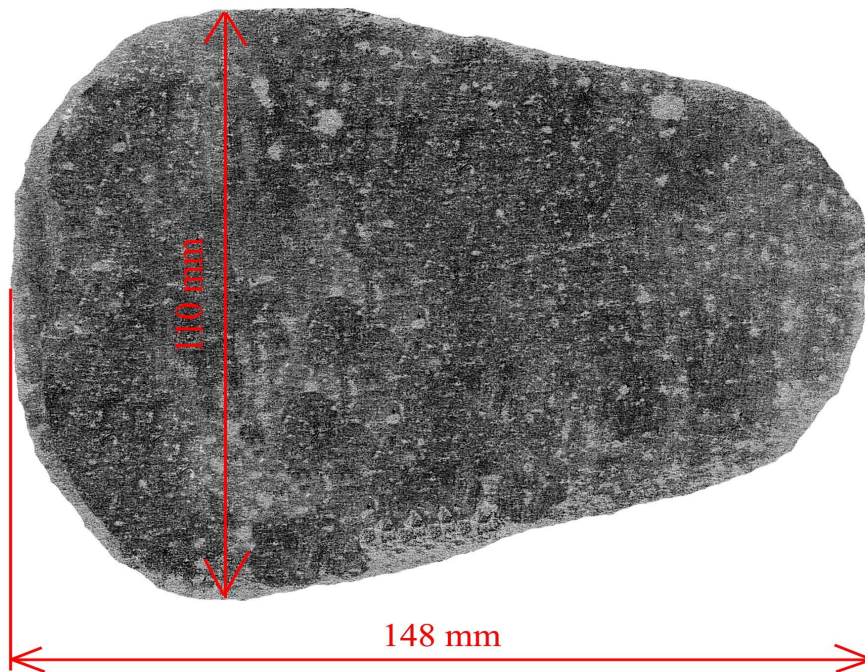
Obr. 39: Stopa pneumatiky slick 180/530 R13 při $p_{in} = 1,4$ bar, vertikálním zatížení = 115 kg a odklonu kola = 0°



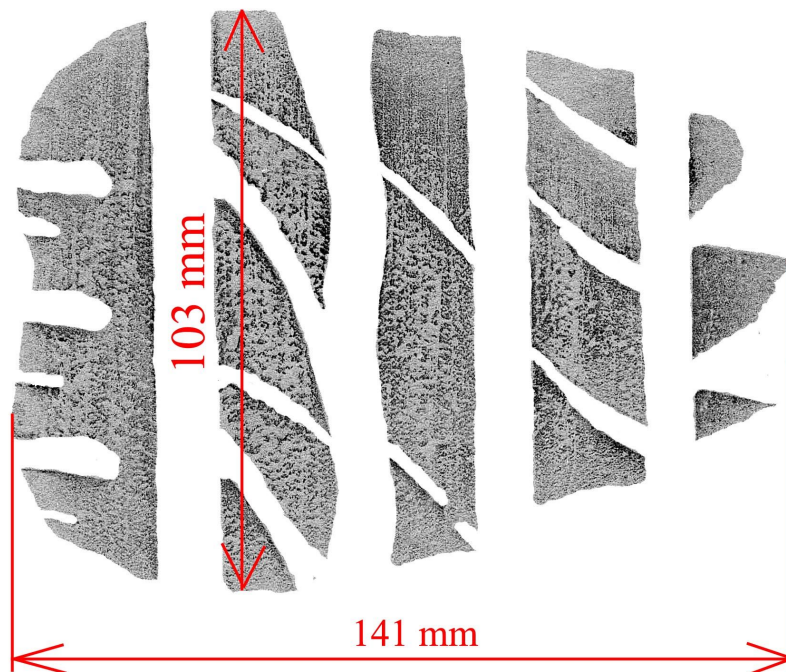
Obr. 40: Stopa pneumatiky slick 180/530 R13 při $p_{in} = 1$ bar, vertikálním zatížení = 115 kg a odklonu kola = 2°



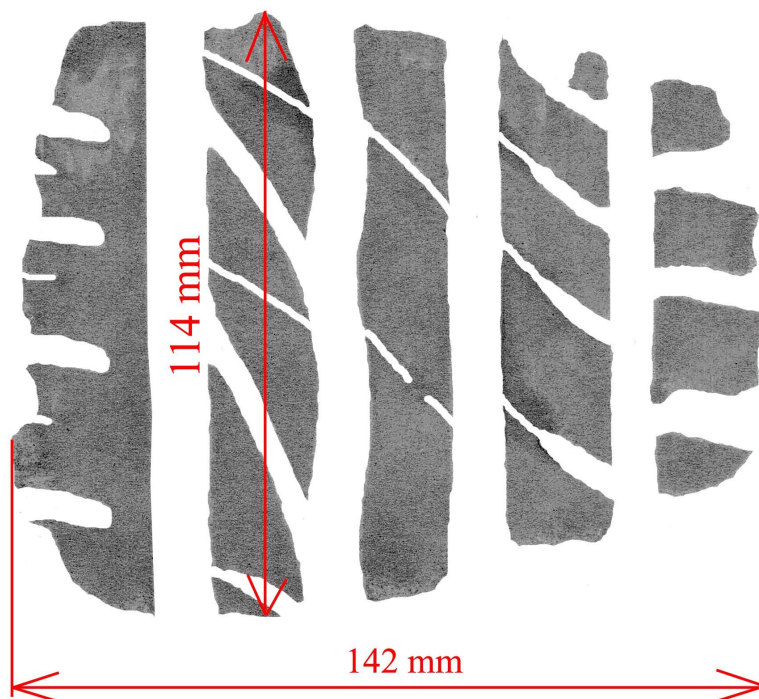
Obr. 41: Stopa pneumatiky slick 180/530 R13 při $p_{in} = 1,4$ bar, vertikálním zatížení = 115 kg a odklonu kola = 2°



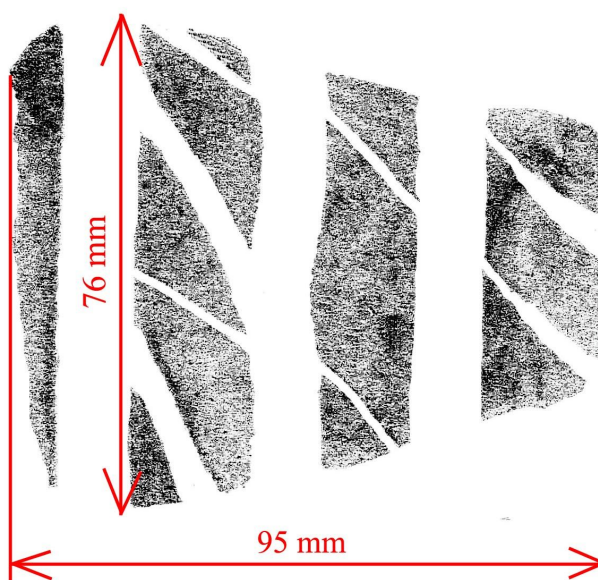
Obr. 42: Stopa pneumatiky slick 210/560 R13 při $p_{in} = 1$ bar, vertikálním zatížení = 115 kg a odklonu kola = 2°



Obr. 43: Stopa pneumatiky 195/55 R15 při $p_{in} = 2,1$ bar, vertikálním zatížení = 255 kg a odklonu kola = $1,5^\circ$



Obr. 44: Stopa pneumatiky 195/55 R15 při $p_{in} = 1,4$ bar, vertikálním zatížení = 255 kg a odklonu kola = $1,5^\circ$



Obr. 45: Stopa pneumatiky 195/55 R15 při $p_{in} = 1,4$ bar, vertikálním zatížení = 130 kg a odklonu kola = $1,5^\circ$



Na obrázcích 43 až 45 je nejlépe patrná změna zabarvení v otisku stopy, zejména na okrajích jednotlivých figur, což značí nárůst měrných tlaků právě v těchto oblastech. Pomocí tlakocitlivého filmu bylo možné odečíst orientační hodnoty měrných tlaků, které v okrajových oblastech jednotlivých figur byly přibližně o řád vyšší než průměrný tlak ve zbývající ploše. Z důvodů této nerovnoměrnosti zabarvení bylo stanovení přesné hodnoty nemožné.

Situace u závodních pneumatik byla jednodušší, jelikož nevznikala tak výrazná nerovnoměrnost zabarvení. Na obr. 41 je uvedena stopa pneumatiky s odklonem 2°, kdy pouhým okem je patrné větší zatížení v levé části snímku. Naměřená hodnota tlaku v této oblasti byla (při teplotě okolí 17°C a relativní vlhkosti 70%) 0,155 MPa, což je hodnota, která může odpovídat skutečnosti.

Na obr. 39 je stopa pneumatiky s rovnoměrným rozložením zatížení. Ověřovací měření potvrdilo, že hodnota tlaku ve styčné ploše je rovna hodnotě tlaku uvnitř pneumatiky.

Typ pneu	slick	slick	slick	slick	slick
Rozměr	180/530 R13	180/530 R13	180/530 R13	180/530 R13	210/560 R13
Tlak p_{in} (bar)	1	1,4	1	1,4	1
Zatížení (kg)	115	115	115	115	115
Odklon	0°	0°	2°	2°	2°
Plocha vypočtená (cm ²)	112,815	80,582	112,815	80,582	112,815
Plocha naměřená (cm ²)	104,688	78,823	99,135	90,866	127,596
Chyba měření (%)	7,2	2,2	12,1	12,7	13,1

Tab. 1: Naměřené a vypočtené hodnoty veličin měřených závodních pneumatik

Typ pneu	běžný provoz	běžný provoz	běžný provoz
Rozměr	195/55 R15	195/55 R15	195/55 R15
Tlak p_{in} (bar)	2,1	1,4	1,4
Zatížení (kg)	255	255	130
Odklon	1,5°	1,5°	1,5°
Plocha vypočtená (cm ²)	118,092	177,981	91,093
Plocha naměřená (cm ²)	114,707	139,534	58,067
Chyba měření (%)	2,9	21,6	36,3

Tab. 2: Naměřené a vypočtené hodnoty veličin měřených pneumatik pro běžný provoz

Z výsledků ověřovacích měření lze potvrdit následující skutečnosti:

- při poklesu tlaku p_{in} anebo při zvětšení zatížení se plocha stopy zvětšuje
- při zvýšení tlaku p_{in} anebo při zmenšení zatížení se plocha stopy zmenšuje
- výraznější změna nastává u délky stopy, šířka je víceméně dána šířkou pneumatiky
- odklon kola výrazně ovlivňuje měření, jelikož dochází k deformaci stopy vlivem konstrukce pneumatiky a její tuhosti
- měrný tlak na okrajích figur dezénu pneumatiky je mnohonásobně vyšší než průměrný tlak ve zbylé ploše stopy pneumatiky
- v ideálním případě (odklon 0°, neprofilovaný dezén) je tlak ve stopě roven tlaku uvnitř pneumatiky.

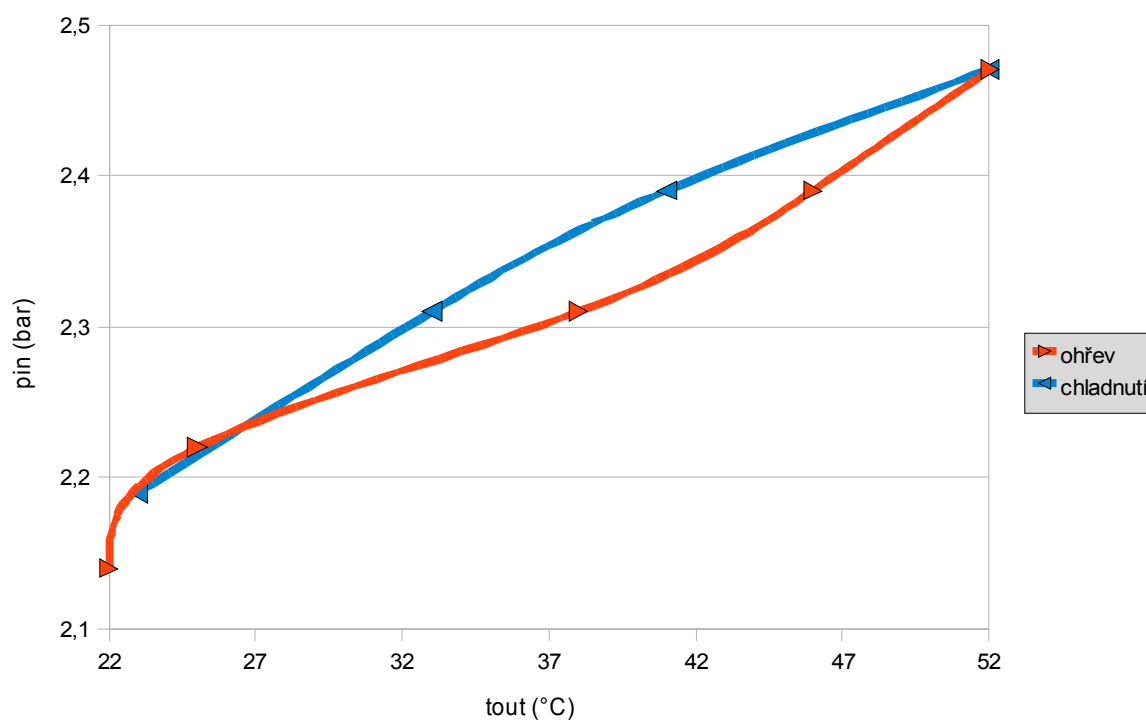


3.2 Měření vlivu teploty v oblasti dezénu na tlak uvnitř pneumatiky

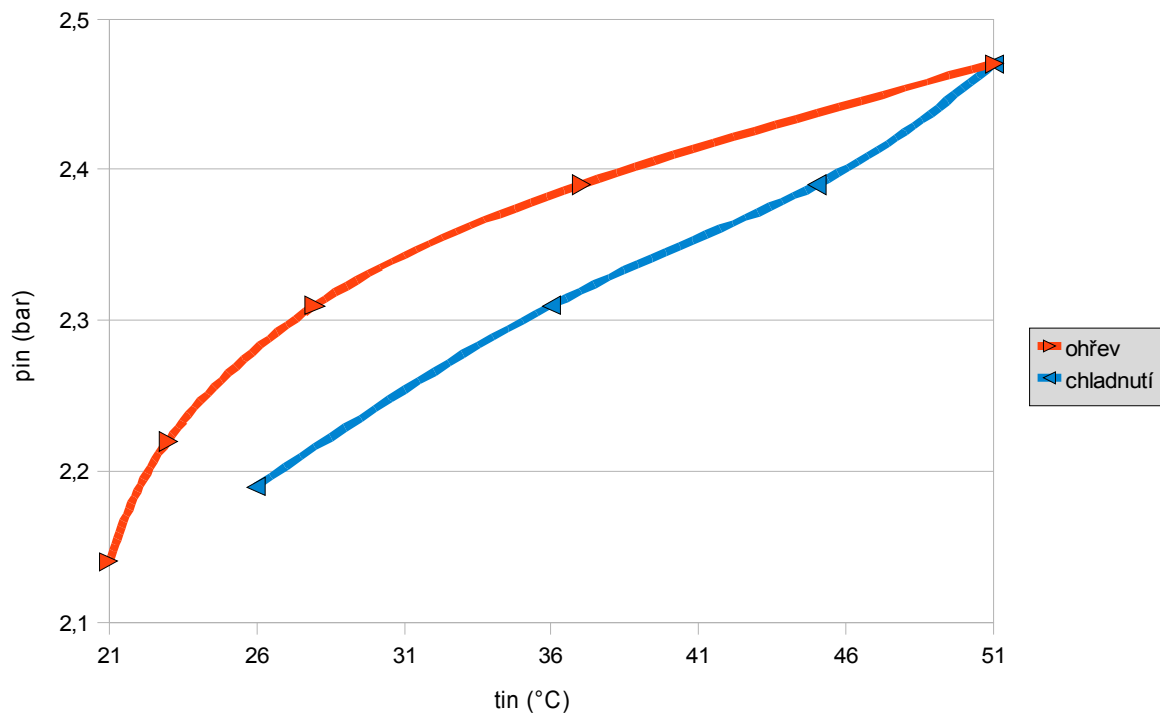
U následujícího experimentu byly u profilované pneumatiky pro běžný provoz o rozměru 195/55 R15 zaznamenány nejprve hodnoty v ustáleném stavu za studena. Následně za použití závodních elektrických ohřivačů byla pneumatika ohřáta až na nejvyšší možnou teplotu danou typem použitých ohřivačů (cca 50 °C). V průběhu ohřevu byly zapsány další hodnoty teplot a tlaku. Po ohřevu a vyrovnání teplot v oblasti dezénu a uvnitř pneumatiky byly zaznamenány hodnoty pro tento ustálený stav. Poté byly ohřivače odstraněny a pneumatika se nechala samovolně vychladnout, přičemž byla opět zaznamenána trojice hodnot. Veškeré hodnoty získané tímto měřením jsou uvedeny v nadcházející tabulce.

	ustálený stav	ohřev			ustálený stav	chladnutí		
t_{out} (°C)	22	25	38	46	52	41	33	23
t_{in} (°C)	21	23	28	37	51	45	36	26
p_{in} (bar)	2,14	2,22	2,31	2,39	2,47	2,39	2,31	2,19

Tab. 3: Naměřené hodnoty tlaku a teplot pro pneumatiku 195/55 R15



Obr. 46: Graf závislosti tlaku uvnitř měřené pneumatiky na teplotě v oblasti dezénu



Obr. 47: Graf závislosti tlaku a teploty uvnitř měřené pneumatiky

Na obr. 46 je grafické znázornění průběhu tlaku uvnitř měřené pneumatiky v závislosti na **teplotě v oblasti dezénu** měřené teploměrem se vpichovací sondou. Červeně je vykreslen průběh ohřevu a modře průběh chladnutí pneumatiky. Pro úplnost je na obr. 47 uvedena ještě závislost tlaku na **teplotě uvnitř pneumatiky**.

Naměřené hodnoty tlaku je také ještě možné porovnat s teoretickými, následujícím výpočtem získanými, hodnotami. Ze stavové rovnice ideálního plynu vypočítáme objem vzduchu v pneumatice:

$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T \quad (25)$$

$$n \cdot R = konst. \quad (26)$$

$$\frac{p \cdot V}{T} = konst. \quad (27)$$

$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2} \quad (28)$$

Pro zjednodušení považují hodnotu objemu vzduchu v pneumatice za konstantní. Využitím Charlesova zákona (28) získám pro jednotlivé hodnoty teploty uvnitř pneumatiky hodnoty tlaku p_{inTEOR} . Vypočtené hodnoty jsou uvedeny v tabulce č. 4, přičemž do vztahů dosazují hodnoty **teploty uvnitř pneumatiky** T_{in} .



T_{out} (K)	295,15	298,15	311,15	319,15	325,15	314,15	306,15	296,15
T_{in} (K)	294,15	296,15	301,15	310,15	324,15	318,15	309,15	299,15
p_{inTEOR} (bar)	2,14	2,15	2,26	2,38	2,50	2,42	2,32	2,24

Tab. 4: Teoretické hodnoty tlaku uvnitř pneumatiky o rozměru 195/55 R15

Porovnáním tabulek č. 3 a č. 4 zjistíme, že naměřené tlaky v pneumatice odpovídají vypočteným. Odchyłka naměřených a vypočtených hodnot tlaků může být způsobena nepřesností měřicího přístroje.

Na základě provedeného měření lze tedy udělat pouze tyto jednoznačné závěry:

- teplota v oblasti dezénu ovlivňuje teplotu uvnitř pneumatiky
- se vzrůstající teplotou uvnitř pneumatiky roste i tlak v pneumatice
- teplotu uvnitř pneumatiky ovlivňuje i teplota disku, na který je pneumatika obuta

3.3 Měření vlivu tlaku a teploty uvnitř pneumatiky na velikost stopy

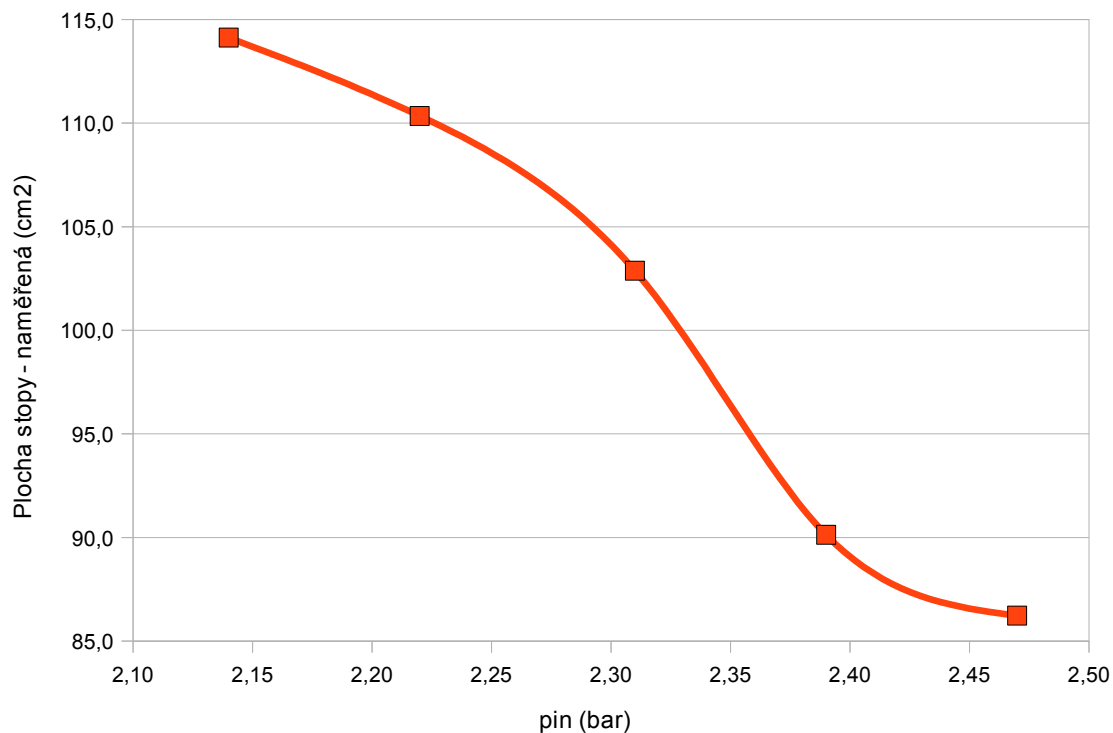
S ohledem na tabulku č. 5, kde jsou uvedeny naměřené hodnoty tlaku a teploty uvnitř pneumatiky, můžeme posuzovat vliv těchto veličin na velikost stopy. Snímání otisku stopy bylo provedeno na pneumatice pro běžný provoz o rozměru 195/55 R15, při jejím vertikálním zatížení 255 kg a odklonu kola 1,5°. U každého stavu byla vypočtena teoretická hodnota velikosti stopy a porovnána s hodnotou naměřenou, jak ukazuje následující tabulka:

Tlak p_{in} (bar)	2,14	2,22	2,31	2,39	2,47
Plocha vypočtená (cm ²)	116,436	112,241	107,868	104,257	100,880
Plocha naměřená (cm ²)	114,129	110,347	102,877	90,135	86,232
Chyba měření (%)	2,0	1,7	4,9	15,7	17,0

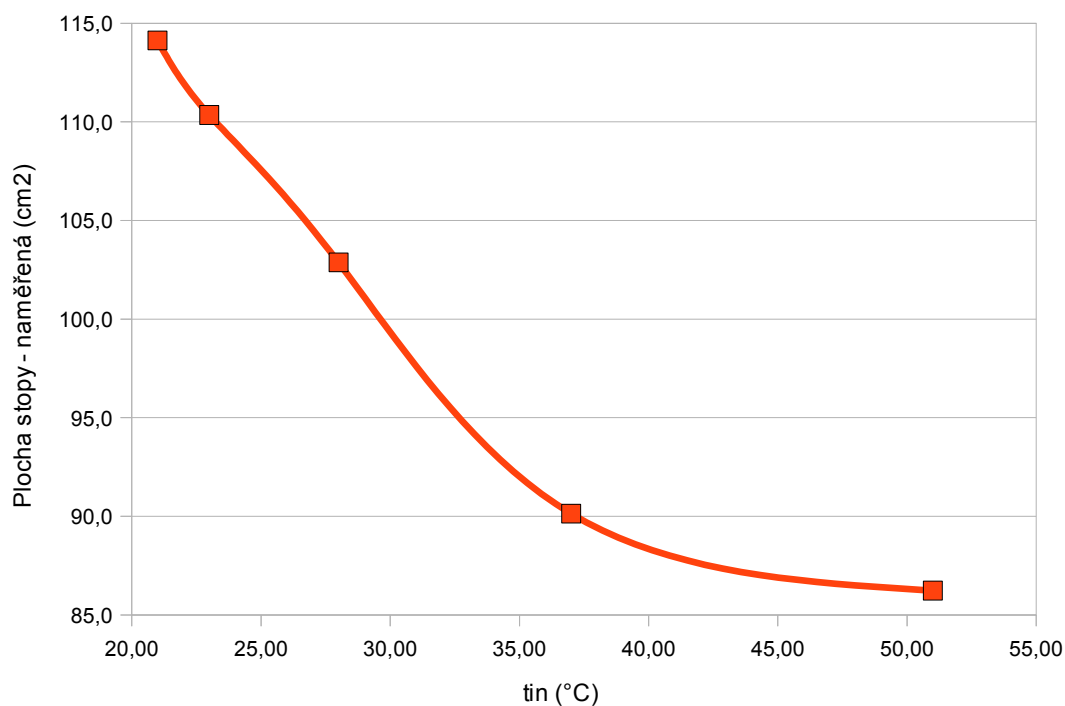
Tab. 5: Naměřené a vypočtené hodnoty veličin pneumatiky o rozměru 195/55 R15

Grafické znázornění jednotlivých závislostí ukazují obr. 48 a obr. 49, na nichž je patrný klesající charakter obou křivek, které by v ideálním případě byly přímky. Měření tedy ověřilo tyto skutečnosti:

- se vzrůstající teplotou uvnitř pneumatiky klesá obsah styčné plochy pneumatiky
- se vzrůstajícím tlakem uvnitř pneumatiky obsah styčné plochy rovněž klesá



Obr. 48: Graf závislosti plochy stopy na tlaku uvnitř měřené pneumatiky o rozměru 195/55 R15, při zatížení 255 kg a odklonu kola 1,5°



Obr. 49: Graf závislosti plochy stopy na teplotě uvnitř měřené pneumatiky o rozměru 195/55 R15, při zatížení 255 kg a odklonu kola 1,5°



3.4 Měření vlivu huštění na součinitel aerodynamického odporu

Při měření součinitele aerodynamického odporu vozidla v aerodynamickém tunelu má na výsledné obtékání vliv světlá výška vozidla. Jelikož však je tato výška dána konstrukčně (délkou pružin) využívá se pro nastavení výšky vozidla v tunelu změna tlaku v pneumatikách. Při snižování tlaku však dochází k vyboulení bočnic a dochází tím ke změně čelní plochy pneumatiky (vliv má zejména čelní plocha pneumatik na přední nápravě). Jak výrazný vliv na celkový součinitel aerodynamického odporu c_x má změna huštění zjišťuje následující experiment, prováděný na vozidle Škoda Roomster.

Pro zjištění velikosti čelní plochy pneumatiky jsem zvolil metodu projekce, kdy byla pneumatika (zejména její hrany) osvětlována silným zdrojem světla a získaný obrys byl zakreslen na papír, jak je patrné z obr. 50 a obr. 51.



Obr. 50: Měření čelní plochy pneumatiky metodou projekce

Zjištěné obrysy pneumatiky pro jednotlivé hodnoty vnitřního tlaku v pneumatice byly poté naskenovány, elektronicky upraveny a v závislosti na změřených světelných výškách byly za pomoci AutoCADu dopočítány velikosti čelní plochy. Následující tabulka obsahuje naměřené hodnoty.

p_{in} (bar)	1,0	1,2	1,4	1,7	2,1	2,4
h (mm)	70	71	72	74	76	76
S (cm ²)	141,9580	145,0724	149,2803	152,5029	163,2910	160,2829

Tab. 6: Naměřené a vypočtené hodnoty veličin pneumatiky o rozměru 195/55 R15



Obr. 51: Měření čelní plochy pneumatiky metodou projekce

Pro ověření přesnosti metody projekce jsem provedl kontrolní měření a výpočet ještě pomocí 3D skenovacího systému ATOS. Nejprve jsem pořídil silikonový otisk měřené pneumatiky za dané hodnoty vnitřního tlaku $p_{in} = 2,1 \text{ bar}$ (obr. 52), který se po vytvrzení naskenoval a zpracoval systémem ATOS (obr. 53 až obr. 56). Velikost plochy se nakonec dopočítala opět v AutoCADu. Výsledná hodnota plochy vypočtená touto metodou byla $S = 163,9625 \text{ cm}^2$, čímž je možno považovat obě metody za srovnatelně přesné.



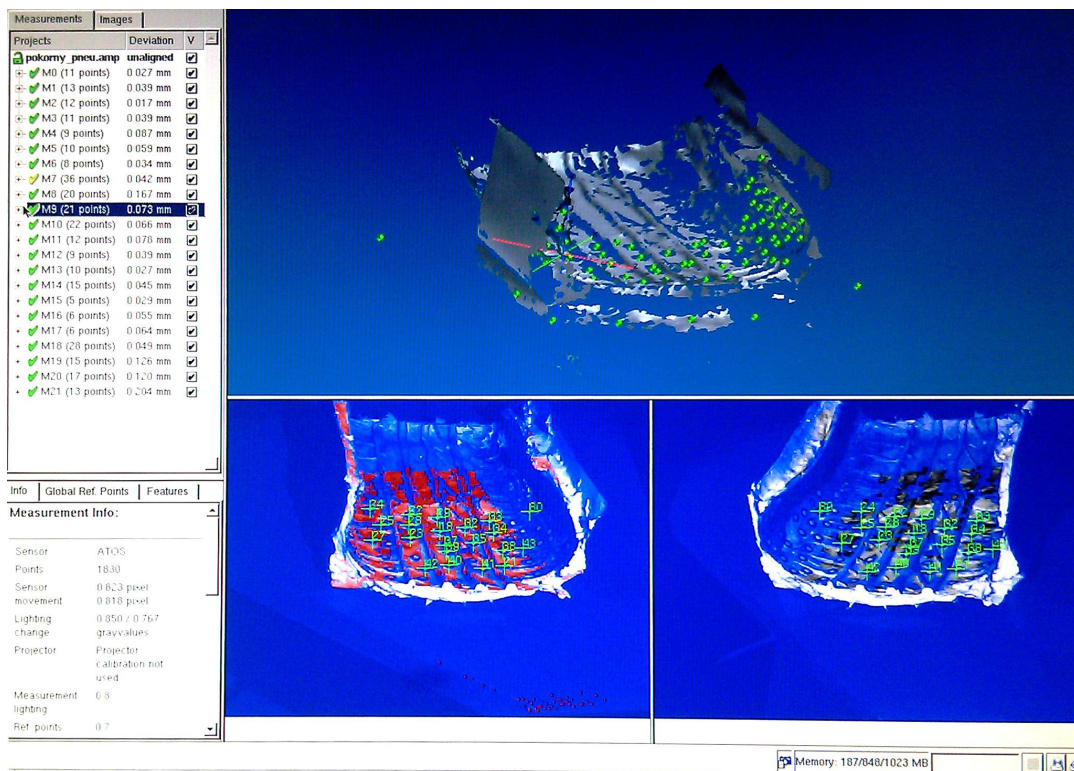
Obr. 52: Příprava odlitku pneumatiky pro měření plochy průmětu pneumatiky pomocí systému ATOS



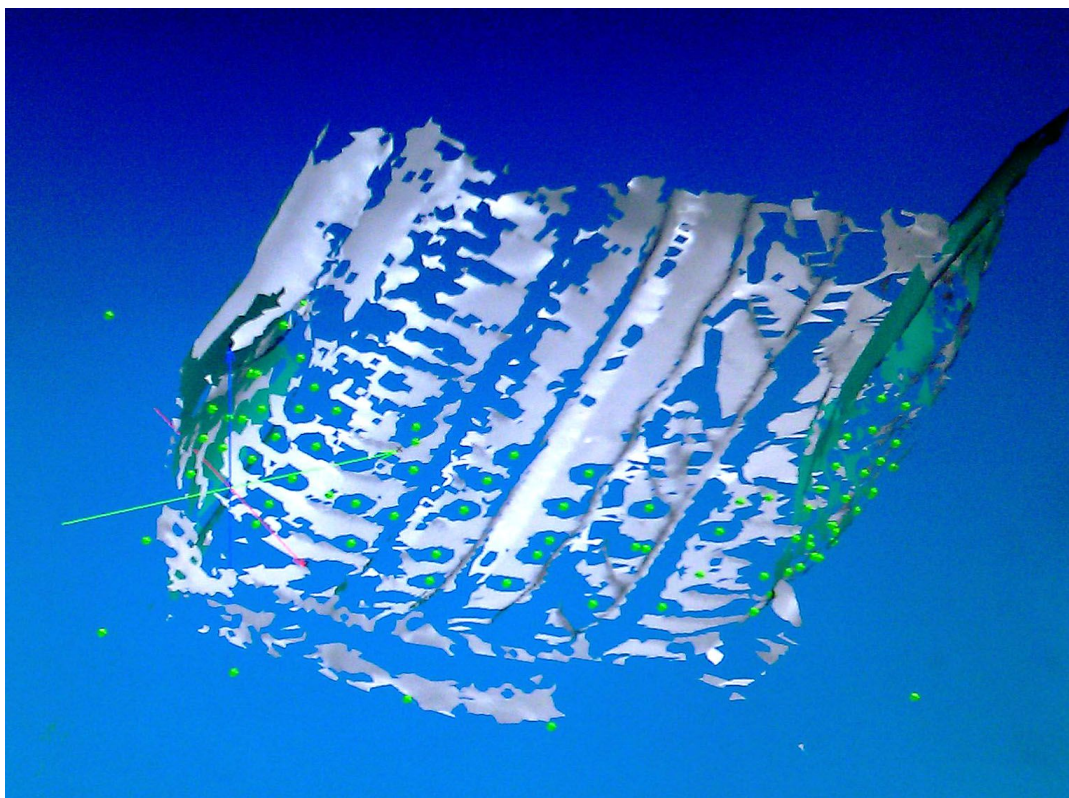
Obr. 53: Odlitek pneumatiky pro měření plochy průmětu pneumatiky pomocí systému ATOS



Obr. 54: Příprava systému ATOS pro měření plochy průmětu pneumatiky



Obr. 55: Skenování stopy pneumatiky a zpracování dat pomocí systému ATOS



Obr. 56: Náhled naskenované stopy pneumatiky pomocí systému ATOS

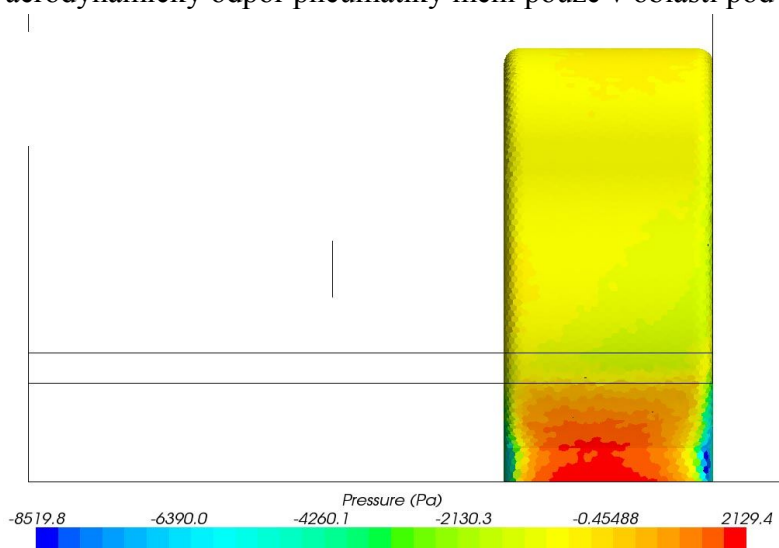


Pro aerodynamický odpor platí následující vztah:

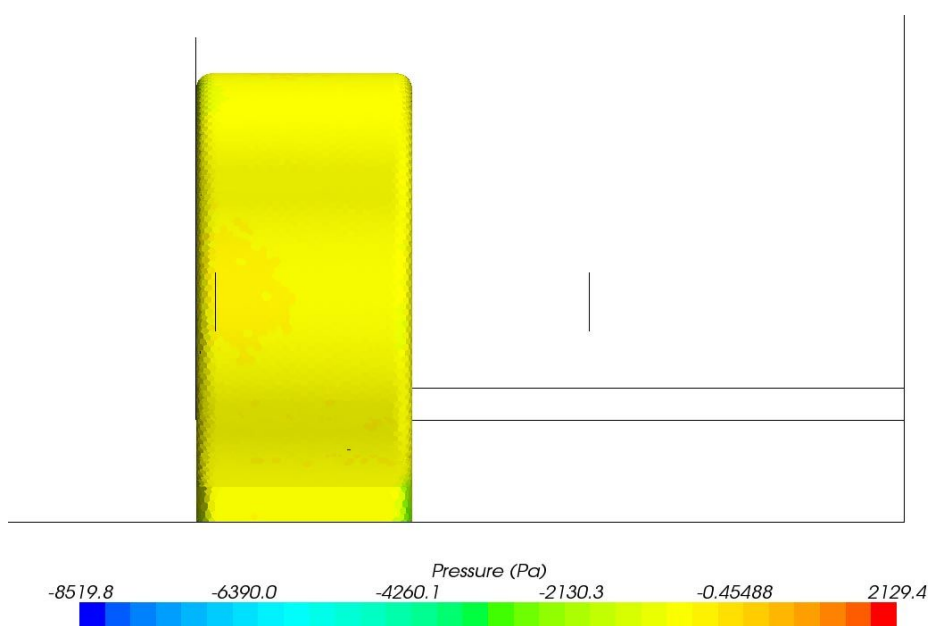
$$F_v = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot c_x \cdot S \cdot v^2, \quad (29)$$

kde ρ je hustota vzduchu, c_x je součinitel aerodynamického odporu, S je obsah plochy průmětu vozidla a v je rychlost proudícího vzduchu.

Na následujících obrázcích CFD simulace měřené pneumatiky (pozn.: poskytnuto vedoucím práce) je vidět, že před pneumatikou vzniká přetlak a za pneumatikou podtlak vyvolaný proudícím vzduchem. Vodorovná čára v každém z obrázků znázorňuje světlou výšku vozidla, jelikož dle [15] se aerodynamický odpor pneumatiky mění pouze v oblasti pod karosérií.



Obr. 57: Znáznornění tlaků proudícího vzduchu před pneumatikou pomocí CFD ($v=160$ km/h)



Obr. 58: Znáznornění tlaků proudícího vzduchu za pneumatikou pomocí CFD ($v=160$ km/h)



Hodnota součinitele c_x pro pneumatiku není známa, ale je přímo úměrná velikosti aerodynamického odporu. Výsledný vliv huštění pneumatiky zjistím tedy porovnáním hodnot F_v . Dosazením do vztahu (29) získáme hodnotu celkového aerodynamického odporu pro měřené vozidlo Škoda Roomster, při rychlosti 160 km/h:

$$F_v = \frac{1}{2} \cdot 1,29 \cdot 0,36 \cdot 2,45 \cdot 44,4^2 = 1123,73 \text{ N} \quad (30)$$

Z poskytnuté simulace mám k dispozici hodnotu přtlaku před pneumatikou ($p_{před} = 1775 \text{ Pa}$) a podtlaku za pneumatikou ($p_{za} = -1065 \text{ Pa}$). Rozdíl tlaků tedy je:

$$\Delta p = p_{před} - p_{za} = 1775 - (-1065) = 2840 \text{ Pa} \quad (31)$$

Hodnoty tlaku proudícího vzduchu měřené pneumatiky se podle [15] výrazně nemění v závislosti na vyboulení způsobené snižováním tlaku v pneumatice (ale na celkové šířce pneumatiky a rychlosti obtékajícího vzduchu).

Změna odporu vzduchu, která je způsobena zvětšením čelní plochy podhuštěné pneumatiky je tedy na základě hodnot provedených měření nejvýše:

$$\Delta F_{max} = \Delta p \cdot \Delta S_{max} = 2840 \cdot 0,002133022 = 6,0586 \text{ N} \quad (32)$$

Porovnáním F_v a ΔF_{max} je zřejmé, že změna hodnoty c_x vlivem změny huštění je nepatrná (nejvýše 0,54%), avšak při rostoucích požadavcích na snižování spotřeby paliva a emisí může být i tato hodnota dost vysoká.



Závěr

Pneumatika je z konstrukčního hlediska složitý objekt, sestávající z několika prvků, které jsou navzájem svázány chemickými procesy a tvoří tak komplexní celek (kapitola 1). A právě konstrukce a provozní stavy výrazně ovlivňují vlastnosti pneumatiky.

Pro měření velikosti stopy pneumatik staticky zatížených (max. 12 200 N) byl zhotoven návrh konstrukce měřicího zařízení pro průměry pneumatik 13-17 palců. Kompletní výkresová dokumentace se nachází v příloze této práce. Výpočet je uveden v kapitole 2.

Z výsledků ověřovacích měření různých pneumatik jsem ověřil závislost tlaku uvnitř pneumatiky a jejího zatížení na velikosti stopy (kapitola 3.1). Při poklesu tlaku p_{in} anebo při zvětšení zatížení se plocha stopy zvětšuje a v ideálním případě je tlak ve stopě roven tlaku uvnitř pneumatiky.

Měřením tlaku uvnitř pneumatiky a teploty jak uvnitř pneumatiky, tak v oblasti dezénu jsem ověřil, že teplota v oblasti dezénu ovlivňuje teplotu uvnitř pneumatiky a že se vzrůstající teplotou uvnitř pneumatiky roste i tlak v pneumatice (kapitola 3.2). Důležitou skutečností je také vliv teploty disku na teplotu vzduchu uvnitř pneumatiky.

Teplota uvnitř pneumatiky tedy ovlivňuje tlak vzduchu p_{in} a ověřil jsem, že se vzrůstající teplotou uvnitř pneumatiky klesá obsah styčné plochy pneumatiky (kapitola 3.3).

Při měření vlivu huštění na celkový součinitel aerodynamického odporu vozidla jsem pro stanovení obsahu čelní plochy pneumatiky srovnal užití dvou metod – metodu projekce a systém ATOS (kapitola 3.4). Z konečných výsledků vyplývá, že změna huštění nemá v provozu výrazný vliv na součinitel c_x , avšak v laboratorních podmínkách je třeba i tuto skutečnost uvážit a pro nastavení světlé výšky vozu najít jiný způsob.

Všechny body zadání této diplomové práce byly splněny.



Použitá literatura

- [1] REIMPELL, J.: *The Automotive Chassis*. 2nd edition. Germany: SAE, 2001. ISBN 0768006570.
- [2] MILLIKEN, W., MILLIKEN, D.: *Race Car Vehicle Dynamics*. 1st edition. Warrendale: SAE, 1995. 857 s. ISBN 1-56091-526-9.
- [3] HANEY, P.: *The Racing & High-Performance Tire*. 1st edition. Warrendale: TV Motorsports and SAE, 2003. 286 s. ISBN 0-9646414-2-9.
- [4] GERINGER, B.: *KFZ-Technik Grundzüge*. [Skripta]. Vídeň 2011. Technische Universität Wien. Institut für Fahrzeug Antriebe und Automobiltechnik.
- [5] *Tyre tread compounds*. Článek na adrese: <<http://tyres.wordpress.com/2009/03/26/tyre-tread-compounds/>> (citace leden, 13., 2012).
- [6] *Compound*. Článek na adrese: <<http://www.chm.bris.ac.uk/webprojects2003/hancock/compound.html>> (citace leden, 13., 2012).
- [7] *Výroba pneumatik*. Článek na adrese: <<http://www.dnoviny.cz/silnicni-doprava/vyroba-pneumatik2335>> (citace leden, 22., 2012).
- [8] STODOLA, J.: *Diagnostika motorových vozidel*. [Skripta]. Brno 2010. Vysoké Učení Technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství.
- [9] LEINVEBER, J. VÁVRA, P. *Strojnické tabulky*. 1. vyd. Úvaly: Albra, 2003. 865 s. ISBN 80-86490-74-2
- [10] SVOBODA, P. BRANDEJS, J. PROKEŠ, F. *Výběry z norem*. CERM Brno, 2007. ISBN 978-80-7204-534-1
- [11] *Kloubová ložiska a hlavice SKF*. Dostupné z: <http://www.skf.com/portal/skf/home/products?maincatalogue=1&newlink=3_0_0&lang=en> (citace 18.11.2011)
- [12] *S450J0 – material characteristics and datasheet*. Dostupné z: <http://www.education-support.com/portal/support/steel/catalogue=blank_printall> (citace 18.11.2011)
- [13] *Fuji Prescale Instruction Manual*. Dostupné z: <<http://www.fujifilm.eu/eu/products/industrial-products/prescale/download/>> (citace 13.4.2012)
- [14] *Wikipedia: elektronická encyklopedie* [online]. Dostupné na adrese: <<http://en.wikipedia.org/wiki/>> (citace duben, 13., 2010).
- [15] WITTMEIER, F. *FAT Projekt: Aerodynamisch optimierter Reifen*. [prezentace]. Stuttgart 12/2011. Forschungsinstitut für Kraftfahrwesen und Fahrzeugmotoren Stuttgart gGmbH.



Seznam zkratk

NBR	Nitril-butadien
NR	Přírodní kaučuk (Natural Rubber)
SBR	Styren-butadien
CFD	dynamika proudících částic

Seznam symbolů

ζ	úhel svírající vlákna kostry pneumatiky s centrální rovinou pneumatiky
σ	mechanické napětí
ε	prodloužení, deformace
C_t	koeficient tření
K	modul pružnosti (obecně)
E	modul pružnosti v tahu
G	modul pružnosti ve smyku
γ	objemový modul pružnosti
φ	úhel odklonu kola
S	plocha, průřez
d	průměr
F	síla, zatížení
k	součinitel bezpečnosti
i	počet závitů v kontaktu
D_1	vnější průměr závitů
d_1	vnitřní průměr závitů
τ_s	napětí ve smyku
τ_D	dovolené napětí ve smyku
R_e	mez kluzu
$R_{p0,2}$	smluvní mez kluzu
s_{min}	minimální délka výběhu závitů
μ	Poissonovo číslo
ρ	hustota materiálu
σ_C	mez únavy
σ_{DO}	dovolené napětí v ohybu
p_{in}	tlak uvnitř pneumatiky
t_{in}	teplota uvnitř pneumatiky
t_{out}	teplota v oblasti dezénu pneumatiky
n	látkové množství
R	molární plynová konstanta
T	termodynamická teplota
b	šířka
h	výška
c_x	součinitel aerodynamického odporu
F_v	aerodynamický odpor
v	rychlost



Přílohy

Příloha č. 1: Výkresová dokumentace MĚŘICÍHO ZAŘÍZENÍ (celkem 32 listů)

Příloha č. 2: Datový list hydraulického válce typu HM 1.2

Příloha č. 3: Datový list lineárního snímače dráhy GEFRAN typu PC 225