

Numerická analýza prvku uložení mostní konstrukce

Bc. Vojtěch Mikulec

Diplomová práce
2011



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2010/2011

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Vojtěch MIKULEC**

Osobní číslo: **T09693**

Studijní program: **N 3909 Procesní inženýrství**

Studijní obor: **Konstrukce technologických zařízení**

Téma práce: **Numerická analýza prvku uložení mostní konstrukce.**

Zásady pro vypracování:

1. Vypracovat literární studii na dané téma.
2. Provést numerickou analýzu používaného prvku.
3. Návrh nového prvku.
4. Analýza a vyhodnocení návrhu.

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

Dle zadání vedoucího diplomové práce.

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Jakub Javořík, Ph.D.

Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce:

14. února 2011

Termín odevzdání diplomové práce:

13. května 2011

Ve Zlíně dne 6. ledna 2011



doc. Ing. Petr Hlaváček, CSc.
děkan



doc. Ing. Miroslav Maňas, CSc.
ředitel ústavu

Příjmení a jméno: Mikulec Vojtěch

Obor: Konstrukce technologických zařízení

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

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

Ve Zlíně 15. 2011

..... Vojtěch Mikulec

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

ABSTRAKT

Cílem této práce je analyzovat tvar elastomerového ložiska používaného jako prvek pro uložení části mostní konstrukce. Poté upravit tvar tak aby upravené ložisko lépe snášelo požadované zatížení.

Teoretická část se zabývá rozdělením kaučuků, popisuje gumárenské přísady a vulkanizaci. Popisuje pojení pryže s kovem a druhy spojů, přehled hyperplastických modelů používaných ve FEM systémech. Zabývá se problematikou pryžokovových pružin a elastomerových ložisek.

V experimentální části je popsána numerická analýza původního tvaru a upravených návrhů tvarů ložisek. Sleduje se deformace a napětí v pryži u jednotlivých návrhů.

Klíčová slova: elastomerové ložisko, pryžokovové prvky, hyperelastická, Patran, Marc, mechanická analýza, MKP, metoda konečných prvků, pryž

ABSTRACT

The aim of this work is to analyze the shape of elastomeric bearings used as a support element for part of bridge construction. Then adjust the shape so as to better prepared bearing of the requested load.

The theoretical part deals with the kind of rubber, rubber additives, and describes the vulcanization. Describes the connecting rubber to metal and types of joints. Overview of hyperelastic models used in the FEM systems. It deals with the issue of rubber-metal spring and elastomeric bearings.

The experimental section describes the numerical analysis of the original and modified form of the geometry of the bearings. It monitors the stress and strain in rubber for individual proposals.

Keywords: elastomeric bearing, rubber-metal elements, hyperelasticity, Patran, Marc, mechanical analysis, FEM, finite element method, rubber

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád poděkoval Ing. Jakobovi Javoříkovi, Ph.D. za odborné vedení, ochotně poskytnuté rady a čas, který mi věnoval při řešení této práce.

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

Ve Zlíně 2011

.....
Podpis diplomanta

OBSAH

ÚVOD	11
I TEORETICKÁ ČÁST	12
1 ELASTOMERY	13
1.1 HISTORIE KAUČUKU	13
1.2 ROZDĚLENÍ KAUČUKŮ.....	15
1.3 KAUČUKY PRO VŠEOBECNÉ POUŽITÍ	17
1.3.1 Přírodní kaučuk	18
1.3.2 Izoprenové kaučuky IR.....	19
1.3.3 Butadienstyrenové kaučuky SBR	19
1.3.4 Butadienové kaučuky BR.....	19
1.3.5 Ethylenpropylenové kaučuky EPM, EPDM.....	20
1.3.6 Butylkaučuky IIR	20
1.4 OLEJOVZDORNÉ KAUČUKY	20
1.4.1 Chloroprenové kaučuky CR.....	20
1.4.2 Butadienakrylonitrilové kaučuky NBR	21
1.4.3 Akrylátové kaučuky ACM.....	21
1.4.4 Polysulfidové kaučuky OT	21
1.5 TEPLOVZDORNÉ KAUČUKY	22
1.5.1 Silikonové kaučuky MQ.....	22
1.5.2 Fluorouhlíkové kaučuky FPM.....	22
2 GUMÁRENSKÉ PŘÍSAKY	23
2.1 PLASTIKAČNÍ ČINIDLA	23
2.2 VULKANIZAČNÍ ČINIDLA	23
2.3 AKTIVÁTORY A RETARDÉRY VULKANIZACE.....	24
2.4 URYCHLOVAČE VULKANIZACE.....	24
2.5 ANTIDEGRADANTY.....	25
2.6 PLNIVA.....	26
2.7 ZMĚKČOVADLA.....	26
2.8 FAKTISY	27
2.9 PIGMENTY	27
2.10 NADOUVADLA.....	27
2.11 POMOCNÉ LÁTKY	28
3 VULKANIZACE	29
4 POJENÍ PRYŽE S KOVEM	30

4.1	PRYŽKOVÉ VÝROBKY	30
4.2	POŽADAVKY NA SPOJ PRYŽ – KOV	30
4.3	TYPY SPOJŮ	30
4.3.1	Spoje dle typu vazby	30
4.4	STRUKTURA VULKANIZAČNÍHO SPOJE	31
4.5	ZÁLISKY	32
4.6	SPOJOVACÍ PROSTŘEDKY	33
5	HYPERELASTICITA	37
5.1	PŘEHLED HYPERELASTICKÝCH MODELŮ, KTERÉ JSOU DNES POUŽÍVÁNY VE FEM SYSTÉMECH	40
5.1.1	Polynomická funkce	40
5.1.2	Neo-Hookean	40
5.1.3	Yeoh	41
5.1.4	Mooney-Rivlin	41
5.1.5	Arruda-Boyce	42
5.1.6	Gent	43
5.1.7	Ogden	43
5.2	STANOVENÍ MATERIÁLOVÝCH KONSTANT PRO HYPERPLASTICKÉ MODELY	44
6	PRYŽKOVÉ PRUŽINY	47
6.1	CHARAKTERISTIKA PRUŽINY	47
6.2	PRVKY NAMÁHANÉ SMYKEM	48
6.3	TLAKOVÉ PRUŽINY	52
7	ELASTOMEROVÁ LOŽISKA.....	57
II	PRAKTICKÁ ČÁST	60
8	ZADÁNÍ	61
9	KONSTRUKCE PŮVODNÍHO LOŽISKA.....	62
10	NÁVRH NOVÉHO TVARU	63
10.1.1	Návrh 1: Ložisko bez děr 6.....	63
10.1.2	Návrh 2: Ložisko bez děr 11.....	63
10.1.3	Návrh 3: Ložisko bez děr 6 s rádiusem	64
10.1.4	Návrh 4: Ložisko original 6 s výplní	64
11	NASTAVENÍ ANALÝZY	65
11.1	ZHOTOVENÍ 3D MODELU	65
11.2	MATERIÁLOVÉ CHARAKTERISTIKY	66
11.3	ANALÝZA ZATÍŽENÍ LOŽISKA KOMBINACÍ SÍLY A POSUNUTÍ	66
11.3.1	Zadání okrajových podmínek.....	66
11.3.2	Vytvoření FEM sítě	67
11.4	ANALÝZA ZATÍŽENÍ LOŽISKA SVISLOU SILOU	67
11.4.1	Zadání okrajových podmínek.....	68

11.4.2	Vytvoření FEM sítě	68
11.5	ANALÝZA ZATÍŽENÍ LOŽISKA POSUNUTÍM.....	69
11.5.1	Zadání okrajových podmínek.....	69
11.5.2	Vytvoření FEM sítě	69
11.6	2D ANALÝZA	70
11.6.1	Vytvoření FEM sítě	70
12	ANALÝZY ZATÍŽENÍ LOŽISKA SVISLOU SILOU	71
12.1	ANALÝZA PŮVODNÍHO TVARU LOŽISKA	71
12.2	ANALÝZA UPRAVENÉHO TVARU LOŽISKA 1.....	72
12.3	ANALÝZA Vlivu ZAoblení HRAN VÝZTUH NA NAPĚTÍ V PRYŽI.....	73
12.4	ANALÝZA UPRAVENÉHO LOŽISKA 2	76
12.5	ANALÝZA PŮVODNÍHO TVARU S VÝPLNÍ	77
12.6	SROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ ANALÝZ.....	78
13	ANALÝZY ZATÍŽENÍ LOŽISKA POSUNUTÍM.....	84
13.1	ANALÝZA PŮVODNÍHO TVARU LOŽISKA	84
13.2	ANALÝZA UPRAVENÉHO TVARU LOŽISKA 1.....	85
13.3	ANALÝZA UPRAVENÉHO TVARU LOŽISKA 2.....	86
13.4	SROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ ANALÝZ.....	87
14	ANALÝZY ZATÍŽENÍ LOŽISKA ŠIKMOU SILOU A POSUNUTÍM.....	89
14.1	ANALÝZA PŮVODNÍHO TVARU LOŽISKA	89
14.2	ANALÝZA PŮVODNÍHO TVARU LOŽISKA S VÝPLNÍ.....	90
14.3	ANALÝZA UPRAVENÉHO TVARU LOŽISKA 1.....	91
14.4	ANALÝZA UPRAVENÉHO TVARU LOŽISKA 2.....	93
	ZÁVĚR.....	97
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	99
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	101
	SEZNAM OBRÁZKŮ	103
	SEZNAM TABULEK.....	106
	SEZNAM PŘÍLOH.....	107

ÚVOD

Elastomerová ložiska jako součást nosné konstrukce mají za úkol přenést nejen svislé a vodorovné síly, ale musí také umožnit posun a pootočení v jednom nebo více směrech, vyvozené zatížením a různými vlivy jako je změna teploty, smršťování a dotvarování betonu, pokles nebo naklonění podpěr apod. [4]

Materiálem ložisek analyzovaný v této práci je elastický polymer (přírodní nebo polychloroprenová pryž). Tento materiál je pružný, ale prakticky nestlačitelný, tj. nemění objem. Nebrání-li se mu konstrukční úpravou v deformaci, je poddajný ve všech směrech. Je-li uzavřen, chová se při zatížení jako kapalina. [4]

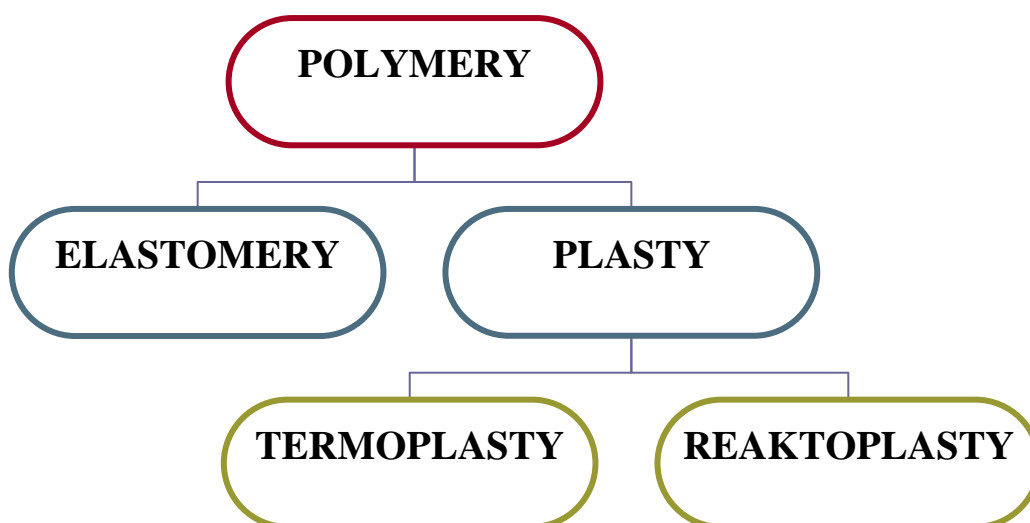
V teoretické části této práce je popsány druhy kaučuků a popsány základní vlastnosti elastomerních materiálů. Popis jednotlivých hyperplastických modelů a problematika pryžokovových prvků.

V praktické části je provedena mechanická analýza konkrétního elastomerového ložiska, které slouží k podpírání části mostní konstrukce. Dále provedena úprava tvaru tak aby se zlepšily vlastnosti tohoto ložiska.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 ELASTOMERY

Polymery jsou chemické látky, obsahující ve svých obrovských molekulách většinou atomy uhlíku, vodíku a kyslíku, často dusíku, chloru i jiných prvků. Polymery jsou ve formě výrobku prakticky v tuhém stavu, ale v určitém stádiu zpracování ve stavu v podstatě kapalném, dovolujícím, většinou za zvýšené teploty a tlaku, udělit budoucímu výrobku nej-různější tvar, podle předpokládaného použití. Dělíme je na elastomery a plasty, jak názorně ukazuje obr. 1.[1]



Obr. 1. Základní rozdělení polymerů.

Elastomer je, jak název napovídá, vysoce elastický polymer, který můžeme za běžných podmínek malou silou značně deformovat bez porušení, přičemž deformace je převážně vratná. Nejpočetnější podmnožinou elastomerů jsou kaučuky, z nichž se vyrábí pryž (guma).[1]

Plasty jsou polymery za běžných podmínek většinou tvrdé, často i křehké. Při zvýšené teplotě se stávají plastickými (odtud název) a tvarovatelnými. Pokud je změna z plastického do tuhého stavu vratná (opakovatelná), nazýváme je termoplasty. Pokud jde o změnu nevratnou (neopakovatelnou, trvalou), protože je výsledkem chemické reakce (často probíhající za zvýšené teploty), mluvíme o reaktoplastech. [1]

1.1 Historie kaučuku

V letech 1493 až 1496 při druhé objevné výpravě do Jižní Ameriky si Kolumbovi námořníci všimli, že Indiáni si pro své hry zhotovovali míče z vyschlé kapaliny, která vytékala z

poraněných stromů. Nazývali je "Hheve", (odtud latinský název kaučukovníku "Hevea") nebo "Cau-Uchu" (odtud i český termín "kaučuk"), což obojí znamená "plačící dřevo". Přírodní kaučuk dále užívali k výrobě nepromokavého plátna a obuvi. [1]

Do Evropy se přírodní kaučuk dostal r. 1736, ale k jeho prvnímu komerčnímu využití došlo až v r. 1791. Vyráběly se z něj nepromokavé lodní plachty a pytle na přepravu pošty, a to impregnační textilů roztokem kaučuku v terpentýnové silici. Kaučukové zboží však měklo a stávalo se lepivým v letních vedrech a naopak tvrdlo a křehlo v chladu zimního období. [1]

Tyto jeho nedostatky odstranili až dva nezávislí objevitelé vulkanizace kaučuku, Američan Charles Goodyear a Angličan Thomas Hancock. Zjistili, že zahříváním směsi kaučuku se sírou vzniká produkt nových vlastností, kterému dnes říkáme pryž. Goodyear za svůj objev dostal patent v r. 1844. Uvádí v něm také, že přeměna kaučuku v pryž proběhne rychleji, přimíchá-li se ke kaučuku a síře ještě oxid zinečnatý, přičemž kaučukovou směs je možno vyrobit buď v roztoku terpentýnu, nebo na válcovacím stroji s vyhřívanými válci. Hancock nezávisle na Goodyearovi objevil, že změněných vlastností kaučuku lze dosáhnout jeho zahříváním v roztavené síře. Tímto způsobem také jako první připravil tvrdou pryž (ebonit). Ve svém patentu z r. 1843 dále popisuje, že rychlost chemické reakce síry s kaučukem se zdvojnásobí zvýšením teploty o 10°C. [1]

Stručně řečeno, Goodyear v USA a Hancock ve Velké Británii položili základy vulkanizace kaučuku. Tento termín zavedl anglický výzkumník William Brockendon (r. 1842). Odvodil jej z řecké mytologie od jména boha Vulkána, jehož činnost je charakterizována právě působením síry a tepla. [1]

Skutečný rozvoj gumárenského průmyslu nastal však až po vynálezu pneumatiky, kterou r. 1845 jako první patentoval skotský inženýr Robert William Thomson ve Velké Británii. Jeho vynález našel ale praktické uplatnění teprve po r. 1888, kdy obdobnou pneumatiku patentoval shodou okolností rovněž Skot, veterinární lékař John Boyd Dunlop. Byl to ovšem zásadní vynález, který umožnil vývoj automobilu a další technické pokroky v dopravě. Od této doby se datující rychlý rozvoj gumárenského průmyslu a s ním související vzestup spotřeby kaučuku způsobil, že na přelomu 19. a 20. století bylo již přírodního kaučuku, získávaného z divoce rostoucích stromů, nedostatek. Ten podnítil jednak pokusy připravit kaučuk uměle, jednak vedl k zakládání plantáží na pěstování kaučukovníku a těžbu přírodního kaučuku i mimo oblast tropické Ameriky. [1]

1.2 Rozdělení kaučuků

Velký počet různých druhů průmyslově vyráběných kaučuků si vynutil jejich klasifikaci. Jejich většinou poměrně dlouhé názvy zase vedly k častému používání zkratek. Mezinárodní zkratky vycházejí z třídění kaučuků do 8 základních skupin podle chemické struktury. Tato klasifikace ovšem nemá přímou souvislost s hlavními oblastmi použití kaučuků, podle nichž je můžeme rozdělit na kaučuky pro všeobecné použití a kaučuky speciální a ty zase na olejovzdorné a teplovzdorné. Základní typy nejběžněji používaných kaučuků, jichž se vyrábí téměř 20 milionů tun, jejich mezinárodně používané zkratky a relativní spotřebu uvádí tabulka. [1]

Tab. 1. Mezinárodní klasifikace kaučuků do základních skupin. [1]

Označení skupiny	Chemická struktura makromolekulárního řetězce
M	nasyčený uhlovodíkový řetězec
R	nenasyčený uhlovodíkový řetězec
N	řetězec obsahující atomy dusíku
O	řetězec obsahující atomy kyslíku
Q	řetězec obsahující siloxanové vazby (-Si-O-)
T	řetězec obsahující atomy síry
U	řetězec obsahující současně atomy dusíku a kyslíku
Z	řetězec obsahující současně atomy fosforu a dusíku

Tab. 2. Zkratky a relativní spotřeba nejběžněji používaných kaučuků. [1]

Zkratka	Název	Spotřeba [%]	Určení
NR	přírodní kaučuk	32	Pro všeobecné použití
IR	izoprenový kaučuk	3	
SBR	butadienstyrenový kaučuk	37	
BR	butadienový kaučuk	10	
EPM	fluorouhlíkový kaučuk		
EPDM	ethylenpropylenový kaučuk	7	
IIR	butylkaučuk	3	
CR	chloroprenový kaučuk	3	olejovzdorné
NBR	butadienakrylonitrilový kaučuk	3	
ACM	akrylátový kaučuk	0,5	
OT	polysulfidový kaučuk	0,1	
MQ	silikonový kaučuk	0,1	tepluvzdorné
FPM	fluorouhlíkový kaučuk	0,1	

Dále můžeme kaučuky rozdělit na:

- Přírodní kaučuky
- Syntetické kaučuky

Tab. 3. Nejběžnější kaučuky a příklady použití. [6]

Nejběžnější kaučuky a příklady použití	
NR	pláště pneumatik, pružná uložení, povlaky válců
SBR	pláště pneumatik, pěnová pryž, latex do nátěrových hmot
HSR	obuvnický materiál na podešve
CR	vytlačované profily, dopravní pásy, hadice, lepidla
NBR	hřídelové těsnění, těsnicí kroužky, obložení cisteren
IIR	vzdušnice pláštů pneumatik
BR	běhouny pneumatik, obuvnictví
MQ	těsnění
EPDM	profily, kabely, střešní krytiny
ACM	technická pryž
FC	těsnění a nátěrové hmoty

1.3 Kaučuky pro všeobecné použití

Uvedené označení má tato skupina kaučuků proto, že se z nich dá vyrábět většina běžných pryžových výrobků, od různých dílů technické pryže přes spotřební zboží až po pneumatiky, hadice a dopravní pásy. Hlavními představiteli jsou polymery a kopolymery izoprenu a butadienu. Nejběžnějším plnivem pro ně jsou saze. Obsahují v hlavních řetězcích svých makromolekul dvojné vazby, jsou tedy nenasycené. Proto k jejich vulkanizaci nejčastěji používáme síru. V důsledku své nenasycenosti na druhé straně vyžadují ochranu proti degradaci, tj. přísadu antidegradantů. [1]

Pryže z kaučuků pro všeobecné použití značně bobtnají v olejích. Proto výrobky z těchto kaučuků nesmějí s oleji a uvedenými rozpouštědly přicházet do styku. Oleje jsou však pro směsi z kaučuků pro všeobecné použití dobrými změkčovadly. [1]

1.3.1 Přírodní kaučuk

Přírodní kaučuk je obsažen v některých rostlinách v podobě mlékovité šťávy, zvané latex. Pro těžbu kaučuku má však hospodářský význam prakticky jen strom *Hevea brasiliensis* z čeledi Euphorbiaceae (pryžcovité) pěstovaný na plantážích. [1]

Latex je uložen ve zvláštních trubkovitých buňkách, které jsou umístěny ve spodní vrstvě kůry stromu po celém jeho povrchu včetně kořenů a větví. Získává se tzv. čepováním. To se provádí tak, že pod šikmý zářez v kůře stromu (zasahující největší počet šikmo uložených latexových buněk) se umístí nádobka, do níž odtéká latex vytlačovaný vnitřním tlakem. [1]

Během několika hodin stání přírodní latex samovolně koaguluje. Aby bylo možno jej delší dobu uchovávat ve stavu rovnoměrné disperze, potom koncentrovat (na padesáti až šedesátiprocentní obsah kaučukového uhlovodíku), dopravovat a zpracovávat, je nutno jej napřed stabilizovat (konzervovat). K tomu účelu se používá nejčastěji amoniaku. [1]

Přímé zpracování latexu má mnoho výhod. Kvalita produktů, zejména mechanické vlastnosti a odolnost vůči stárnutí, je značně lepší než zboží vyrobeného z roztoků. Mnohé manipulace a zpracovatelské postupy jsou levnější (např. máčení) a poskytují větší možnost využití kontinuálních procesů. Latex umožňuje také některé technologické postupy, které nejsou použitelné při zpracování suchého kaučuku nebo jeho roztoků, např. výrobu pěnové pryže. [1]

Suchý kaučuk lze z latexu získat vysrážením, vymražením nebo odpařením vody. Na plantážích se vyrábí kaučuk téměř výhradně srážením kyselinou mravenčí nebo octovou. Srážené bloky se pak perou vodou a dále zpracovávají na celou řadu druhů přírodního kaučuku, z nichž klasickými jsou uzový kaučuk (Ribbed smoked sheet RSS) a světlá krepa (pale crepe). Stále většího významu nabývá standardní kaučuk, který vyrábějí např. Malajsie (standardní malajský kaučuk - Standard Malaysian Rubber - SMR), Indonésie (Standard Indonesian Rubber - SIR), Thajsko (Standard Thai Rubber - STR), Vietnam (Standard Vietnam Rubber - SVR), nebo Jižní Korea (SPR). Počet jeho výrobců se stále rozrůstá. [1]

Přírodní kaučuk má všeobecné použití. Při výběru druhů NR se vychází z kvality, pravidelnosti, čistoty a ceny. Používá se například k výrobě duší, pneumatik, pryžových nití, ochranných masek, plovacích pásů atd. [2]

1.3.2 Izoprenové kaučuky IR

Izoprenový kaučuk je tedy jediným, který můžeme označit jako umělý, neboť je to lidským umem připravený analog přírodního kaučuku. [1]

V radě výrobků je možno použít IR místo NR, nedostatkem je podstatně nižší pevnost surových směsí, menší odolnost proti oděru. Také odrazovou pružnost má IR menší než NR. Přesto se používá pro výrobu pneumatik, často v kombinaci s jinými kaučuky. Výraznou výhodou IR jsou dobré tokové vlastnosti, zvláště při vysokých smykových rychlostech, takže se uplatňuje pro vstřikované výrobky. [2]

1.3.3 Butadienstyrenové kaučuky SBR

Z kaučuků pro všeobecné použití se nejvíce uplatňuje SBR. Význam má především v pneumatikářském průmyslu. Protože má větší hysteretní ztráty než NR uplatňuje se jako sto procentní elastomer jen v osobních pneumatikách. V nákladních pneumatikách se z důvodu většího hnutí používá jen omezeně. SBR je dále vhodný pro krycí vrstvy dopravních pásů, hadice, tvrdou pryž, gumokov izolace kabelů. Vyhovuje pro většinu běžných výrobků technické pryže, u nichž se nepožaduje vysoká odolnost proti povětrnostním vlivům nebo některá jiná speciální vlastnost. [2]

1.3.4 Butadienové kaučuky BR

Samostatně se většinou k výrobě pryže nepoužívají vzhledem k jejich ne příliš dobré zpracovatelnosti. Jejich vulkanizáty však vynikají vysokou odolností vůči oděru a za účelem jejího zlepšení se proto butadienový kaučuk přidává do směsí na výrobky, kde se tato vlastnost významně uplatňuje, např. pro krycí vrstvy dopravních pásů a zejména běhouny pneumatik. Kombinuje se v nich většinou s kaučukem přírodním, případně izoprenovým a butadienstyrenovým. Polybutadien také zvyšuje mrazuvzdornost pryže, protože má nižší teplotu zesklnění než butadienstyrenový i přírodní kaučuk (pod -100°C). [1]

Homopolymery butadienu patří mezi tzv. kapalné kaučuky. V kombinaci s epoxidy a izokyanáty se uplatňují jako stavební tmely, těsniva, lepidla, pojiva, modifikátory jiných polymerů včetně drtě z polymerních odpadů apod. [1]

1.3.5 Ethylenpropylenové kaučuky EPM, EPDM

Jsou velmi odolné vůči degradaci. [1]

Ethylenpropylenové kaučuky se používají např. k opláštění kabelů, pro střešní krytiny a podobné aplikace, kde se vyžaduje vysoká odolnost vůči stárnutí; v oblasti technické pryže zase na vysoce teplovzdorné a přitom zdravotně nezávadné výrobky, těsnění sterilizátorů v potravinářském průmyslu nebo v lékařství. [1]

1.3.6 Butylkaučuky IIR

Kaučuky modifikované halogeny jsou schopny kovulkanizace s ostatními kaučuky pro všeobecné použití, čehož se využívá např. při skladbě směsí pro vnitřní vrstvy bezdušových pneumatik. [1]

Sírou se vulkanizují také směsi butylkaučuku určené k výrobě kvalitních duší pro pneumatiky, kde se rovněž využívá velmi malé propustnosti butylkaučuku pro plyny a páry. Výrobky, mající odolávat zvýšeným teplotám, se vulkanizují fenolformaldehydovými pryskyřicemi. Jsou to např. membrány lisů na vulkanizaci pneumatiky nebo značně tepelně namáhaná těsnění a jiné součástky motorů a strojů. [1]

1.4 Olejovzdorné kaučuky

Tyto kaučuky se od kaučuků pro všeobecné použití liší především svou polaritou. V jejich odolnosti vůči olejům jsou však velké rozdíly. Čím polárnější olej, tím polárnější musí být kaučuk, z něhož vyrobená pryž má oleji odolávat. [1]

1.4.1 Chloroprenové kaučuky CR

Polychloropren si díky velké elasticitě, malé hořlavosti a velmi dobré odolnosti vůči povětrnostnímu stárnutí pryží z něj vyrobených stále zachovává významné postavení mezi syntetickými kaučuky. [1]

Používají se k výrobě lepidel a v kabelářském průmyslu jako povrchové vrstvy odolné vůči ozonu a atmosférickým vlivům (přirozenému stárnutí). [1]

Největší množství chloroprenových kaučuků vyrábí americká společnost Du Pont pod značkou Neoprene, které se často používá i v odborné literatuře jako obecného označení chloroprenového kaučuku. [1]

1.4.2 Butadienakrylonitrilové kaučuky NBR

Pryže z nitrilkaučuku nejsou vhodné pro výrobky, které přicházejí do styku s ketony a s chlorovanými uhlovodíky, neboť právě v těchto rozpouštědlech silně bobtnají. Jsou to látky s podobnou hodnotou mezimolekulárních soudržných sil a jsou proto dobrými rozpouštědly pro nitrilkaučuky. Použití nitrilkaučuků je dáno hlavně jeho odolností olejům, benzínu a dalším palivům, brzdovým kapalinám apod. Vyrábějí se z něj především hadice, těsnění a membrány, ale i klínové řemeny a dopravní pásy. [1]

1.4.3 Akrylátové kaučuky ACM

Z akrylátových kaučuků se zhotovují výrobky, které mají současně odolávat oleji a zvýšeným teplotám (do 160°C). Pryže z akrylátových kaučuků převyšují pryže z NBR především odolností k olejům obsahujícím síru, neboť jejím účinkem (na rozdíl od pryží z nitrilkaučuků) netvrdnou. Nejdůležitějšími výrobky z akrylátových kaučuků jsou hadice na olej a nejrůznější pryžové součástky do motorů pracujících při velkých obrátkách, dále vyložení nádob, dopravní a pohonné pásy, světle zbarvené výrobky a teplovzdušná lehčená pryž. [1]

1.4.4 Polysulfidové kaučuky OT

Jejich hlavní předností je vynikající odolnost vůči bobtnání v olejích a mírně polárních rozpouštědlech. Kromě toho výborně odolávají ozonu a povětrnosti (neobsahují dvojně vazby). Mají také velmi malou propustnost pro plyny. Zpracovávají se však jen v omezeném množství, neboť při zahřívání více či méně zapáchají. [1]

Hlavní aplikací polysulfidových kaučuků jsou tiskařské válce a jiné speciální výrobky, které nesmějí v rozpouštědlech bobtnat. Tepelná odolnost jejich vulkanizátů je však malá. [1]

1.5 Teplovzdorné kaučuky

Hlavními představiteli teplovzdorných kaučuků vedle fluorouhlíkových, jsou kaučuky silikonové, které můžeme současně označit i za mrazuvzdorné. Jejich speciální typy jsou použitelné k výrobě pryží sloužících v teplotním rozmezí od -90°C do 200°C , přičemž vlastnosti pryží se s teplotou mění jen velmi málo. Neodolávají však vlhkému prostředí, v němž podléhají hydrolýze. [1]

1.5.1 Silikonové kaučuky MQ

Specifickou vlastností silikonových pryží je malá závislost jejich fyzikálních vlastností na teplotě ve velmi širokém rozmezí. Používají se běžně od -60°C do 180°C . Velmi malá mezimolekulární soudržnost řetězců silikonového kaučuku, která toto chování podmiňuje, však na druhé straně vede k relativně horším fyzikálním vlastnostem vulkanizátů ve srovnání s vlastnostmi vulkanizátů uhlovodíkových kaučuků (při běžných teplotách). Proto se silikonové pryže uplatňují především pro teploty nad 150°C . Do 180°C vykazují speciální silikonové pryže dlouhodobou odolnost v suchém prostředí. Ve vlhku za zvýšených teplot a hlavně v páře degradují v důsledku hydrolýzy základního řetězce. Jsou částečně odolné vůči bobtnání v olejích. Používají se v kabelářském průmyslu k izolaci tepelně namáhaných vodičů, pro tepelně namáhané součástky ve strojírenství a v automobilovém průmyslu, dále v elektrotechnice a elektronice, stavebnictví jako zalévací hmoty a tmely, v chemickém, potravinářském a farmaceutickém průmyslu. Pro dobrou snášenlivost s lidským organismem se často používají v lékařství jako implantáty a též jako kontaktní čočky. [1]

1.5.2 Fluorouhlíkové kaučuky FPM

Pryže z těchto kaučuků se vyznačují největší odolností k vysoké teplotě, jsou elastické od -25°C , dlouhodobě odolávají teplotám do 200°C až 230°C . Současně jsou nejvíce odolné vůči olejům i značně agresivním chemikáliím, jak aromatického charakteru, tak i silným kyselinám a mírně alkalickým roztokům. Koncentrované kyselině sírové při teplotě kolem 70°C odolávají bez patrné změny více než 100 hodin. Podobně je tomu i s odolností k jiným kyselinám. Vulkanizáty fluorouhlíkových kaučuků mají současně vynikající odolnost k páře a také účinku oxidačních látek, od kyslíku a ozonu až ke koncentrované kyselině dusičné. Patří však k nejdražším druhům speciálních kaučuků. [1]

2 GUMÁRENSKÉ PŘÍSADY

Kaučukové směsi vyžadují řadu přísad, které usnadňují zpracování, umožňují vulkanizaci a dodávají pryži žádané vlastnosti. Dělíme je na: [2]

- plastikační činidla
- vulkanizační činidla
- aktivátory a retardéry vulkanizace
- urychlovače vulkanizace
- antioxidanty a antiozonanty
- plniva
- změkčovadla
- anorganické pigmenty a organická barviva
- pomocné látky.

2.1 Plastikační činidla

Je známa celá řada sloučenin schopných urychlovat plastikaci kaučuku. Jsou to látky nej-
různějšího složení: aromatické merkaptany nebo jejich soli, disulfidy, fenoly, aromatické
aminy, organické kyseliny a jejich soli, peroxidy, nitro-, nitroso-, hydrazo- a diazo- slouče-
niny, tiuramdisulfidy, deriváty močoviny, guanidiny, redukčně-oxidační systémy a kovy
přechodné valence. [2]

Některé gumárenské přísady (saze, antioxidanty, síra) snižují nebo úplně in-
hibují účinek plastikačních činidel. Vlivu síry se využívá k zastavení plastikace u kaučuků
náchylných k přeplastikování (např. IR), chceme-li zastavit další průběh při míchání směsí. [2]

V praxi nejužívanějšími plastikačními činidly jsou: Fepton 22, Fepton 65, Renacit IV, Re-
nacit V, Peptazín BFT a Peptazín BAFD. [2]

2.2 Vulkanizační činidla

Podstatou vulkanizace je vytváření chemických vazeb mezi molekulami kaučuku. K tomu,
aby se zabránilo neomezenému toku celých molekul vzhledem k sousedním molekulám,

stačí poměrně malé množství příčných vazeb rozmístěných podél řetězce. Vlastnosti kaučuku se přitom podstatně mění; z převážně plastického stavu přechází v elastickou pryž. Zlepšují se také vlastnosti jako pevnost, odrazová pružnost, odolnost proti nízkým a vysokým teplotám, roste tvrdost a modul, snižuje se tažnost a trvalá deformace. [2]

Vulkanizační činidla jsou látky, které mají schopnost vytvářet chemickou reakcí příčné vazby mezi molekulami kaučuku. Nejběžnějšími vulkanizačními činidly jsou: síra, donory síry, selén, telur, peroxidy, kovové kysličníky, chinondioximy, reaktivní pryskyřice, diamíny a diizokyanáty. [2]

2.3 Aktivátory a retardéry vulkanizace

Bez přídavku aktivátoru by byla síra málo účinným vulkanizačním činidlem. K dosažení potřebné koncentrace příčných vazeb by bylo třeba ve směsích bez aktivátoru dávkovat podstatně více síry nebo donoru síry. Podstata aktivace při vulkanizaci sirou spočívá ve zvýšení sířovací účinnosti vulkanizačního systému. [2]

Jako aktivátorů se používá různých kysličníků kovů: ZnO, U₂O₃, CaO, PbO, CdO. V praxi se nejlépe osvědčil kysličník zinečnatý spolu s kyselinou stearovou a pro transparentní směsi stearan zinečnatý. [2]

Použití retardérů vulkanizace je nezbytné pro směsi obsahující vysoce aktivní vulkanizační přísady nebo urychlovače vulkanizace, mají-li se takové směsi zpracovávat při vyšších teplotách. Retardéry chrání směs před předčasným navulkanizováním při míchání a dalším zpracování. Mají význam především v provozních podmínkách, kdy často vznikají potíže s chlazením. Zvláště v létě není voda o teplotě kolem 30°C schopna uchládit stroje tak, aby se nesnížila bezpečnost zpracovávaných směsí pod únosnou mez. I když jsou nyní k dispozici urychlovače se zpožděným účinkem, retardérů se v řadě receptur používá, především u směsí ztužených vysoce aktivními retortovými sazemi, které snižují bezpečnost. Dále tam, kde se vlivem intenzifikace procesu přípravy a zpracování směsí dosahuje vysokých teplot. [2]

2.4 Urychlovače vulkanizace

Význam urychlovačů vulkanizace spočívá nejen ve zrychlení procesu, ale i ve zvýšení efektivnosti vázání síry a tím ve zlepšení užitných vlastností pryže, jmenovitě teplovzdor-

nosti, odolnosti proti reverzi a stárnutí. Spolu se sírou a aktivátory vulkanizace tvoří urychlovače vulkanizační systém. [2]

Vyráběné urychlovače je možno rozdělit podle různých kriterií (např. chemického složení nebo rychlosti vulkanizace) do různých skupin. Podle rychlosti vulkanizace je dělíme na: [2]

- pomalé (aminy, guanidiny)
- rychlé (tiazoly, sulfenamidy)
- velmi rychlé (tiuramy a kombinace urychlovačů)
- ultraurychlovače (ditiokarbamáty, xantogenáty).

2.5 Antidegradanty

Stárnutí elastomerů a vulkanizátů má řadu příčin. Výsledné účinky posuzujeme podle způsobu a stupně znehodnocení původních vlastností. Při stárnutí se uplatňují tyto vlivy: [2]

- kyslík a teplo (termooxidace)
- kyslík a mechanické namáhání (vznik trhlin únavou materiálu)
- ozón a statické nebo dynamické namáhání (vznik ozonových trhlin)
- kyslík a světlo, hlavně UV záření (zvrásnění povrchu)
- kyslík se solemi kovů přechodných valencí (stárnutí vlivem kaučukových jedů)
- horká voda nebo pára (hydrolýza některých funkčních skupin)
- účinek samotného tepla - za nedokonalého přístupu kyslíku (síťování, reverse).

Antidegradanty je možno rozdělit do těchto hlavních skupin: [2]

- antioxidanty a antiozonanty
- činidla chránící proti účinkům světla (UV absorbéry)
- ochranné vosky
- přísady potlačující hydrolýzu funkčních skupin
- akceptory rozkladných produktů.

2.6 Plniva

Použití plniv v kaučukových směsích má obecně dva důvody. Prvořadým důvodem je úprava zpracovatelnosti směsí a fyzikálně mechanických vlastností vulkanizátů. Druhý důvod je ekonomický, použitím levných plniv se dosahuje podstatného snížení ceny výrobků. Při volbě druhu plniva vycházíme z uvedených záměrů a z dalších technických požadavků. [2]

Pro běžnou praxi vyhovuje rozdělení plniv do tří skupin: [2]

- saze
- světlá plniva (aktivní a neaktivní)
- ostatní

Aktivní plniva se ztužujícími účinky označujeme jako ztužovadla. [2]

2.7 Změkčovadla

Při vyšším dávkování plniv do směsi dochází již v nevulkanizovaném stavu k takovému ztužení, že by zpracovatelnost byla velmi špatná. Z toho důvodu, kromě dalších, je třeba do směsi přidávat změkčovadla. Z hlediska tokových vlastností není rozhodující druh použitého změkčovadla, důležité je především jeho množství. Další důvody pro použití změkčovadel jsou: zlepšení disperze plniv a přísad, snížení teploty a spotřeby energie při míchání, úprava fyzikálních a mechanických vlastností pryže (tvrdosti, odrazové pružnosti, mrazuvzdornosti a v neposlední řadě snížení ceny výrobků. [2]

Zhruba můžeme rozdělit změkčovadla do následujících skupin: [2]

- produkty ropného původu (minerální oleje, parafín, asfalty, vosky),
- produkty zpracování uhelných dehtů (oleje, pryskyřice, smoly),
- produkty zpracování dřeva (smrkový dehet, kalafuna),
- syntetická změkčovadla (estery, kapalné polymery, pryskyřice),
- látky rostlinného nebo živočišného původu (oleje, tuky, vosky).

2.8 Faktisy

Ke zlepšení hladkosti povrchu při vytlačování, pro přesnější dodržování tvaru vytlačeného profilu a zlepšení dalších vlastností polotovarů se do kaučukových směsí někdy přidávají tzv. faktisy. Použití nacházejí také při výrobě stíracích pryží, jimž umožňují dosažení potřebné odírací schopnosti. Výrobkům z opryžovaného textilu dodává přísada faktisu příjemný omak. Při vyšších koncentracích zhoršuje faktis mechanické vlastnosti pryže. Činí ji však měkkou a vláčnou, čehož se využívá při výrobě velmi měkké pryže, určené např. na potahy tiskových válců.[1]

- Hnědý faktis
- Bílý faktis

2.9 Pigmenty

Neplněná měkká pryž má světle hnědou barvu. Neplněná tvrdá pryž - ebonit, vyrobený jen z kaučuku a síry s malým množstvím aktivátorů je téměř černý. Technická pryž a pneumatiky jsou většinou černé, neboť jako plniva se nejčastěji používá sazí. Pro spotřební zboží se však žádá vybarvení směsí do různých odstínů. K tomu účelu se používá pigmentů. Původně to byly pouze minerální pigmenty, které umožňovaly jen omezený rozsah barevných odstínů. Zavedením organických pigmentů necitlivých k vulkanizační teplotě a síře (tzv. vulkánové barvy) se možnosti vybarvování pryže rozšířily a zvýšila se účinnost vybarvování. Z toho důvodu moderní organické pigmenty, přestože jsou dražší, postupně vytlačují anorganické pigmenty. [2]

Minerální pigmenty si trvale zachovávají své místo především pro bílou barvu a pro některé odstíny jako červenohnědou nebo khaki. [2]

2.10 Nadouvadla

Pro výrobu lehčené pryže (houbové a mechové) se používá různých druhů nadouvadel. Což jsou látky, které se při vyšších teplotách v průběhu vulkanizace rozkládají za vzniku většího objemu plynů. Teplota rozkladu a objem plynů závisí především na druhu použitého nadouvadla. Teplotu rozkladu je možno dále ovlivnit přísadami, které působí jako akti-

vátory rozkladu nadouvadla. Kaučukové směsi musí mít vysokou plasticitu a určitý průběh vulkanizace, aby nadouvání proběhlo v požadovaném rozsahu. [2]

2.11 Pomocné látky

Některé látky nejsou přímo složkami gumárenských směsí, ale při zpracování umožňují správný průběh technologických operací. Patří mezi ně především práškovadla (separační činidla). Práškovadla zabraňují slepování polotovarů při výrobě, manipulaci a skladování, zabraňují přilepení směsi k formě a umožňují unikání vzduchu mezi směsí a formou při zalisování. [2]

Jako práškovadla se uplatňují: křída, klouzek, kaolin, stearan zinečnatý, slída, škrob, grafit nebo i mletá pryž. Stearan zinečnatý působí jen dočasně, za studena; během vulkanizace se vstřebává do směsi. [2]

Jako separační činidla působí roztoky mýdel nebo saponátů ve vodě a emulze (např. silikonového oleje) ve vodě. [2]

3 VULKANIZACE

Víme již, že zahříváním kaučukové směsi na vhodnou teplotu (např. 150°C) dojde za určitou dobu (např. 30 min) k její vulkanizaci. Při ní probíhají chemické reakce mezi kaučukem a dalšími složkami kaučukové směsi a koncentrace vulkanizačního činidla přitom postupně klesá až na téměř nulovou hodnotu. [1]

Kaučukové směsi vulkanizujeme většinou za tlaku. Jednak proto, že je při vulkanizaci současně tváříme, jednak proto, že tlak zabraňuje vzniku nežádoucích pórů ve výrobku v důsledku vývoje plynných látek a zejména vypařování vody, která je ve formě všudypřítomné vlhkosti obsažena ve všech složkách kaučukové směsi (kaučucích i přísadách). [1]

Vulkanizace je klíčovým procesem v celé gumárenské technologii, protože je energeticky i časově nejnáročnější operací při zpracování kaučuku a vzniká během ní výsledný produkt - vulkanizát neboli pryž. Ta má své charakteristické vlastnosti, které ji předurčují pro nejrozličnější použití prakticky ve všech oborech lidské činnosti. [1]

Základní schopností běžné tzv. měkké pryže je být bez porušení poměrně malou silou a prakticky vratně vysoce deformována, na řádově stovky procent. Tato vlastnost, kterou nemá v podobném rozsahu žádná jiná dosud známá látka, souvisí především se sítovou strukturou pryže, vznikající právě vulkanizací. [1]

Reakci vulkanizačního činidla s kaučukem se totiž vytváří prostorová síť, v níž jsou původně lineární makromolekulární řetězce kaučuku pospojovány chemickými vazbami, které nazýváme příčné. [1]

se vzrůstajícím stupněm vulkanizace významně vzrůstá pevnost kaučuku až do určité hodnoty; po jejím překročení pevnost pryže klesá, vzrůstá však nadále její tvrdost. S postupující vulkanizací po počátečním vzrůstu klesá tažnost pryže. Platí zde jednoduché obecné pravidlo, že největší pevnost mají vulkanizáty při tažnosti kolem 500 % až 700 %. [1]

Se vzrůstajícím stupněm vulkanizace se zlepšuje odolnost proti trvalé deformaci. Mění se i další fyzikální vlastnosti pryže. Proto je znalost jejich závislosti na stupni zasíťování velmi důležitá. [1]

4 POJENÍ PRYŽE S KOVEM

4.1 Pryžokovové výrobky

Pryžokovové výrobky se začaly používat postupem času s rozvojem průmyslu strojírenství a hlavně automobilního průmyslu. Zpočátku se používaly hlavně celopryžové díly, které byly zamontovány do montážních celků. Konstrukce těchto celků byla mnohdy složitá a díly byly náročné na montáž a neplnily často spolehlivě nároky na ně kladené. Proto byla snaha co nejvíce díly konstrukčně zjednodušit a přitom vytvořit kvalitní spoje. [3]

4.2 Požadavky na spoj pryž – kov

Nároky na takovéto výrobky nejsou přitom malé. Kvalitní spoj musí mít: [3]

- pevnost vyšší než je pevnost použité pryže,
- musí být odolný působení chemikálií,
- musí být odolný působení tepla, UV záření, ozonu,
- nesmí poškozovat životní prostředí.

4.3 Typy spojů

Typy spojů mezi pryží a zálisky můžeme rozdělit do několika kategorií: [3]

- podle pevnosti spoje,
- podle typu vytvořené vazby,
- podle technologie vytváření vazby.

4.3.1 Spoje dle typu vazby

Spoj mezi pryží a záliskem může být vytvořen několika různými postupy: [3]

- na čistě mechanické bázi: Pryž je zakotvena v prolisech nebo otvorech v zálisku a pevnost spoje je závislá pouze na tření a mechanické pevnosti pryže proteklé otvory v zálisku. Pryžová část může být na zálisek dokompletována dodatečně. V tomto případě nevznikají na kontaktní ploše mezi výliskem a záliskem žádné chemické ani fyzikální vazby.

- lepením: Spoj mezi záliskem a z vulkanizovanou pryží je vytvořen dodatečně pomocí lepidla. Zálisek i výlisek musí být pro lepení již upraveny a musí být použit správný typ lepidla. Při tomto procesu se vytvářejí chemické a fyzikální vazby mezi záliskem a lepidlem a mezi lepidlem a pryží. Tímto způsobem lze vytvořit relativně pevné spoje.
- vulkanizací: Spoj mezi záliskem a pryží je vytvořen speciálním postupem při vulkanizaci ve formě. Je nutná správná předúprava zálisků. Při tomto procesu vytvářejí vazby na chemické a fyzikální bázi. Spoje vytvořené tímto postupem vykazují nejvyšší hodnoty pevností ze všech tří uvedených typů spojů.

4.4 Struktura vulkanizačního spoje

Spoj mezi záliskem a pryží se vytváří během vulkanizace. Vlastní struktura spoje obsahuje několik částí: [3]

- zálisek
- povrchová vrstva zálisku s povrchovou úpravou
- primární spojovací prostředek
- sekundární spojovací prostředek
- pryž.

Mezi jednotlivými částmi se vytvářejí vazby na fyzikální a chemické bázi. Obecně platí, že spoj je tak pevný, jak je pevný jeho nejslabší článek. Snažíme se tedy při vulkanizaci vytvořit tak pevné spoje, že jejich pevnost je vyšší než pevnost pryžového materiálu. [3]

Spoj zálisek - povrchová úprava zálisku

Je závislý na typu povrchových úprav zálisků, je vytvořen chemickými vazbami mezi materiálem a chemickými sloučeninami, které obsahuje (např. fosfátem). [3]

Spoj povrchová úprava zálisku - primární spojovací prostředek

Je vytvořen kombinací mechanického zakotvení spojovacího prostředku v drsné povrchové úpravě a fyzikálních sil. [3]

Spoj mezi primárním a sekundárním spojovacím prostředkem

Je vytvořen na základě chemických vazeb. [3]

Spoj spojovací prostředek - pryž

Je vytvořen chemickými vazbami. Na tomto spoji se také vytváří přechodová vrstva, protože sekundární spojovací prostředek při vulkanizaci difunduje do pryže. Tato přechodová vrstva je tvrdší než vlastní pryž. [3]

Rychlost vytváření jednotlivých vazeb je různá. Proto složením kaučukové směsi a podmínkami vulkanizace musíme vždy dosáhnout toho, aby chemické reakce probíhaly současně. Pokud tomu tak není, ať již z důvodu různé reakční rychlosti, nebo proto, že nezačínají současně, nedojde k vytvoření kvalitního spoje a objeví se separace vrstev. Kvalitně vytvořený spoj musí být vytvořen na celé styčné ploše. Kontrola kvality spojů se provádí na speciálních laboratorních tělískách při trhacích zkouškách. Přitom dochází k destrukci tělíška a podle umístění lomu na tělísku rozlišujeme jednotlivé vady: [3]

- M - jedná se o separaci mezi povrchovou úpravou zálisku a spojovacím prostředkem,
- RC - jedná se o separaci mezi spojovacím prostředkem a pryží,
- R - jedná se o lom v pryži. Lom mezi přechodovou vrstvou pryže a vlastní pryží spadá už do této kategorie.

U pryžokovových dílů s kvalitně vytvořenými spoji dochází při destrukci vždy k lomům v pryži. [3]

4.5 Zálisky

Zálisky vytvářejí pevnou výztužnou část na výlisku a jsou svými mechanicko- fyzikálními vlastnostmi odlišné od pryže. Zpravidla jsou kovové nebo plastové, v případě plastů se používají pouze typy schopné snášet bez tvarových deformací podmínky vulkanizace. [3]

Zálisky jsou zpravidla upevněny na vyšší montážní celek a přenášejí namáhání na pryžovou část dílu. [3]

Pro pojení lze použít každého kovu, musí ale projít vhodnou povrchovou úpravou. Nejvhodnější a nejpoužívanější k pojení jsou oceli a hliníkové slitiny. Čím je ocel z hlediska

materiálového složení kvalitnější, tím je náročnější na provedení povrchové úpravy, aby se dosáhlo kvalitního spoje. [3]

Při povrchové úpravě dochází k odstranění chemických a mechanických nečistot z povrchu zálisků a k nánosu speciálního spojovacího prostředku. [3]

Pod pojmem mechanické nečistoty si můžeme představit například prach, zamaštění povrchu nebo jiným způsobem ulpělé cizorodé částice na povrchu zálisku. Ty jsou na povrchu zálisků udržovány pouze fyzikálními silami (adhezí), nikoliv silami chemickými. [3]

Chemické nečistoty jsou korozní zplodiny na povrchu zálisku vzniklé při výrobě zálisku či jeho polotovaru nebo vzniklé působením chemikálií na povrch zálisku (např. znečištěného ovzduší). Oba typy nečistot musí být při povrchové úpravě odstraněny, jinak není možno dosáhnout kvalitního spoje. [3]

4.6 Spojovací prostředky

Spojovací prostředek je látka, která umožňuje vytvoření kvalitního spoje mezi upraveným povrchem zálisku a pryží. Její složení prochází stále vývojem. Jako spojovací prostředky se používají (nebo používaly) následující látky: [3]

- tvrdá pryž,
- latex-albuminová pojiva,
- termoprenová pojiva,
- izokyanatany,
- mosaz (pomosazení),
- halogenované deriváty kaučuku.

Tvrdá pryž

Tohoto materiálu bylo použito ke spojování pryže s kovem jako prvního. Proces spojování pomocí tvrdé pryže byl objeven již v polovině 19. století. Jedná se o pryžovou směs s vysokým obsahem síry (25 - 47 dsk) - tzv. ebonit. Pro spojování se nanáší na předem upravený povrch kovového dílu v nevulkanizovaném stavu, a to buď ve formě fólie, nebo ve formě gumárenského cementu. K vlastnímu spojení dochází při vulkanizaci. Soudržnost je možno ještě zvýšit přidávkem oxidů železa (nejlépe v dávkování 20 dsk). Vulkanizace

probíhá v kotlích vyhříváných tlakovou parou. Takto nanesená vrstva pryže sice chrání povrch nádoby před agresivními látkami, tvrdá pryž je však křehká a ztrácí své vlastnosti při teplotách nad 70°C. Při této teplotě společně s měknutím tvrdé pryže dochází k destrukci spoje. Dnes se tohoto spojovacího prostředku požívá velmi zřídka, většinou byl již nahrazen modernějšími prostředky na bázi halogenovaných kaučuků. [3]

Latex – albuminová pojiva

Základem těchto pojiv byla směs latexu, běžných vulkanizačních přísad a sušeného hemoglobinu. Latex způsobuje adhezi k pryži, hemoglobin ke kovu. Tato pojiva se v dnešní době již nepoužívají. [3]

Termoprenová pojiva

Jedná se o tvrdé, křehké termoplastické pryskyřice, tzv. cyklokaučuky. Vznikají působením silných kyselin, např. sírové na přírodní kaučuk za zvýšené teploty. Na spoji se vytváří tvrdá, křehká vrstva, spoj neodolává teplotám nad 70°C. V dnešní době se již nepoužívají. [3]

Pomosazení

Spojování touto metodou využívá schopnosti pryžové nezvulkanizované směsi vytvářet během vulkanizace spoj mezi pryží a vrstvou mosazi vyloučené elektrolyticky na povrchu kovového dílu. Tato schopnost byla objevena již v roce 1911. Tento způsob pojení pryže s kovem byl velmi rozšířen v době před druhou světovou válkou. Jeho výhodou je výborná tepelná odolnost spoje. Nejlepší výsledky se dosahovaly při spojování pryží z přírodního kaučuku, dobré výsledky byly také dosaženy s butadien-styrenovým a chloroprenovým kaučukem. Bylo nutno dodržet určitou skladbu kaučukové směsi. Směsi bez síry nebo s nízkým obsahem síry neposkytovaly téměř žádnou pevnost spoje. Tato metoda je velmi citlivá na přesné dodržení technologického postupu a vyžaduje přítomnost galvanické linky v blízkosti gumárenského podniku. V současné době se používá hlavně pro pojení pryže s ocelovými kordy. [3]

Izokyanatanová pojiva

Jedná se o roztoky izokyanatanů (diizokyanatanu nebo triizokyanatanu) v rozpouštědlu, koncentrace sušiny činí obvykle 20 až 50%. Tyto spojovací prostředky vytvářejí kvalitní spoje, jsou odolné řadě chemikálií i vyšším, nikoliv však vysokým teplotám. Izokyanata-

nová pojiva jsou však na základě své chemické struktury velmi reaktivní, proto je při jejich používání důležité správné skladování a dodržování technologických postupů. Použití těchto pojiv se již neomezuje pouze na některé typy kaučuků, jsou totiž poměrně málo citlivá na složení nevulkanizované kaučukové směsi. [3]

Spojování samospojivých vulkanizátů s kovy

Při tomto způsobu vytváření spoje jsou spojovací látky součástí kaučukové směsi. Spoj vzniká při vulkanizaci. Jako spojovací aktivní látky lze použít např. komplexní kobaltové soli merkaptobenzothiazolu. Kvalita takto vytvořených spojů však zdaleka nedosahuje současných požadavků kladených moderním průmyslem na kvalitu spoje. [3]

Halogenové deriváty kaučuku

Tyto spojovací prostředky se vyrábějí působením halogenu, většinou chloru, nebo halogenvodíku na roztok kaučuku, většinou přírodního. Izolovaný produkt je dále smíchán s polymerní maticí a naředěn rozpouštědly na požadovanou viskozitu. Tím se získá velmi kvalitní spojovací prostředek, spoj neabsorbuje vodu, odolává dobře stárnutí, je odolný proti působení řady chemikálií i mořské vody. Tato pojiva velmi dobře pojí pryžové směsi, kde kaučukovou složku tvoří polární kaučuk (např. chloroprenový nebo butadienakrylonitrilový). Pokud se mají pojit nepolární kaučuky (např. přírodní), je třeba jako mezivrstvu mezi kovem a nepolárním kaučukem použít fólii ze směsi polárního kaučuku. Stala se výchozím produktem při vývoji moderních spojovacích prostředků. [3]

Moderní spojovací prostředky

Moderní spojovací prostředky se vyvíjely poměrně dlouhou dobu a začínaly se používat komerčně okolo roku 1960. Jedná se o systémy založené na organické bázi, které mohou být aplikovány jako jednosložkové nebo dvousložkové. Po nanesení na povrch zálisku musí být důkladně vysušeny, pokud se nanášejí ve více vrstvách, je třeba důkladně vysušit každou. Po vysušení každé vrstvy spojovacího prostředku se získá uspořádání molekul, které umožňuje jejich navázání na aktivní povrch zálisku ze strany jedné a na řetězce nevulkanizované kaučukové směsi na straně druhé. [3]

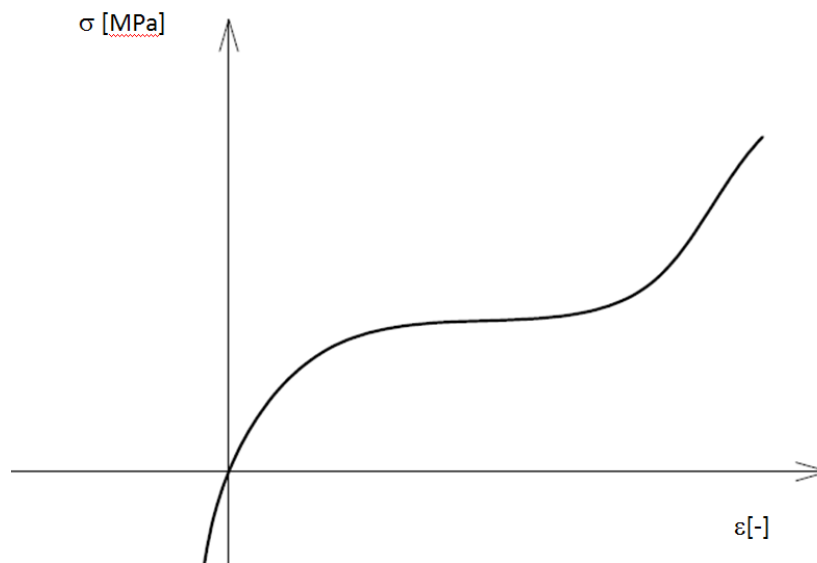
Složení moderních spojovacích prostředků je předmětem výrobního tajemství každé firmy, která si hájí jak detailní složení svých produktů, tak i samotný technologický postup výroby každého spojovacího prostředku. [3]

Spojovací prostředek musí nejenom dobře smáčet povrch zálisku, ale musí mít i dobré reologické vlastnosti, aby byl schopen proniknout do všech pórů a penetrovat do povrchu zálisku. [3]

5 HYPERELASTICITA

Elastomery mají charakteristické vlastnosti, které jsou výrazně odlišné od většiny ideálně elastických materiálů. Materiály s takovými vlastnostmi považujeme za hyperplastické a charakteristické vlastnosti označujeme jako hyperelasticitu. Hyperelasticitu se vyznačuje těmito základními vlastnostmi: [5]

- Velké vratné (elastické) deformace a velká tažnost. Tažnost dosahuje několika set procent původní délky.
- Závislost napětí na deformaci je silně nelineární. Tvar této závislosti má zpravidla charakteristický esovitý průběh.
- Materiál se deformuje již při účinku malých sil.
- Velká objemová tuhost a Poissonův poměr se blíží hodnotě 0,5. Většinu těchto materiálů lze považovat za objemově nestlačitelné.



Obr. 2. Závislost napětí a deformace při zatěžování elastomerů.

Další charakteristické vlastnosti elastomerů jsou:

- Časová závislost deformace. Elastické deformační přeměny tu probíhají s určitým zpožděním, protože jsou brzděny vnitřními viskózními odpory uvnitř kaučukové hmoty. Deformační chování pryže má obecně elastické i viskózní projevy současně. Takové chování se označuje jako viskoelastické chování.

- Mechanické chování elastomerů je dále velmi závislé na teplotě. Při nízkých teplotách (pod $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$) tuhost materiálu výrazně roste a může se přiblížit vlastnostem kovů. Při vysokých teplotách (nad $100\text{ }^{\circ}\text{C}$) naopak dochází k velkému poklesu tuhosti.

Takže pro použití Hookeova zákona nejsou splněny dvě základní podmínky: [5]

- závislost deformace na napětí není lineární
- dochází k velkým deformacím ($> 2\%$).

Proto pro přesné výpočty a pro případy větších deformací je nutno použít nelineární popis závislosti napětí-deformace. [5]

Hyperelastické modely lze rozdělit do skupin:

- Hyperelastické modely založené na mikromechanických modelech vnitřní struktury elastomerů

Neo-Hookean, Arruda-Boyce.

Materiálové konstanty v těchto modelech mají jednoznačný fyzikální význam.

- Hyperelastické modely založené na základě pozorování deformačně napětového chování elastomerů na makroskopické úrovni tak, aby model co nejlépe aproximoval toto pozorování.

Polynomický, Mooney-Rivlin, Ogden, Yeoh, Gent

Takové modely jsou nazývány fenomenologické a jejich materiálové konstanty často nemají konkrétní fyzikální význam.

Dnes používané hyperelastické modely obecně formulují vztah pro hustoty deformační energie ve tvaru: [5]

$$W = f(I_1, I_2, I_3 \{M\}) \quad \text{nebo} \quad W = f(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3 \{M\})$$

kde I_i jsou invarianty pravého Cauchy-Greenova tenzoru deformace, λ_i jsou hlavní protažení a $\{M\}$ je množina materiálových konstant. [5]

Protažení λ_i je poměrem deformované délky l_i ve směru osy i ku původní délce l_0 .

$$\lambda_i = \frac{l_i}{l_{0i}}$$

Deformační invarianty I_i jsou definovány vztahy: [5]

$$I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2$$

$$I_2 = \lambda_1^2 \lambda_2^2 + \lambda_2^2 \lambda_3^2 + \lambda_3^2 \lambda_1^2$$

$$I_3 = \lambda_1^2 \lambda_2^2 \lambda_3^2$$

Pro nestlačitelné materiály je invariant $I_3 = I$.

Pokud známe funkci W můžeme napětí vypočítat jako derivaci této funkce podle příslušné složky deformace. [5]

$$S_{ij} = 2 \frac{\partial W}{\partial C_p}$$

kde S_{ij} jsou složky 2. Piola-Kirchhoffova tenzoru napětí a C_{ij} jsou složky pravého Cauchy-Greenova deformačního tenzoru. [5]

Pokud je souřadný systém zvolen tak, že je shodný s hlavními směry deformace, pak je pravý Cauchy-Greenův deformační tenzor definován takto: [5]

$$C_{ij} = \begin{bmatrix} \lambda_1^2 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2^2 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_3^2 \end{bmatrix}$$

Z rovnice 4 lze tedy odvodit vztah pro složky Cauchyova tenzoru napětí (skutečné napětí). [5]

$$t_{ij} = p \delta_{ij} + 2 \frac{\partial W}{\partial I} C_{ij} - 2 \frac{\partial W}{\partial I} C_{ij}^{-1}$$

kde p je nespecifikovaný tlak a S_{ij} je Kronekerovo delta, pro které platí ($\delta_{ij} = 1, i = j, \delta_{ij} = 0, i \neq j$)

5.1 Přehled hyperelastických modelů, které jsou dnes používány ve FEM systémech.

Jednotlivé hyperelastické modely se liší definicí funkce hustoty deformační energie W . Níže jsou uvedeny dnes nejpoužívanější tvary funkce W , které jsou většinou pojmenovány po svých autorech. [5]

5.1.1 Polynomická funkce

Polynomická forma je založena na prvním a druhém deformačním invariantu (I_1, I_2). Jde o model, jenž má formu: [5]

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

kde c_{ij} jsou materiálové konstanty a za N se dosazují hodnoty od jedné do nekonečna, ale obvykle není hodnota N vyšší než 3. [5]

- Tato forma může být aplikována pro deformaci dosahující až 300 %.

5.1.2 Neo-Hookean

Je možné ho brát, jako podmnožinu polynomické formy pro $N = 1$, $c_{01} = 0$, $c_{10} = \mu/2$. Vychází z termodynamických principů a ze statistického přístupu k modelování vnitřní struktury elastomerů. [5]

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

kde μ je počáteční smykový modul. [5]

$$\mu = nkT$$

kde n je počet polymerních řetězců v jednotkovém objemu, k je Boltzmanova konstanta a T je absolutní teplota. [5]

- Patří k nejstarším a nejjednodušším modelům.
- je použitelný pro deformaci do 40 % v jednoosém namáhání.
- Model není schopen věrohodně postihnout závěrečnou vyztužovací fázi napět'ově deformační odezvy elastomerů.

- Vykazuje lineární chování při smykové deformaci.

5.1.3 Yeoh

Model Yeoh je podobný polynomické formě, ale nepoužívá druhého deformačního invariantu. Je definován jako: [5]

$$W = \sum_{i=1}^N c_{i0} (I_1 - 3)$$

kde c_{i0} je materiálová konstanta a za N se dosazují hodnoty od jedné do nekonečna, ale obvykle není hodnota N vyšší než 3. Pokud $N = 1$ jde o model Neo-Hookean.

Yeoh model je obvykle uvažován s $N = 3$. [5]

- Obtížněji se vyhodnocuje a poskytuje méně přesné výsledky
- Jeho výhodou je naopak jeho jednoduchost.
- Tří-parametrový Yeoh model obecně poskytuje dobré výsledky pro deformace velkého rozsahu i když nemusí být přesný pro nižší hodnoty deformace.

5.1.4 Mooney-Rivlin

Ve čtyřicátých letech 20. stol. Mooney navrhl fenomenologický model se dvěma parametry založenými na předpokladu lineárního vztahu mezi zatížením a smykem během jednoduché smykové deformace. V padesátých letech Rivlin modifikoval Mooneyho model, aby obdržel obecné vyjádření funkce deformační energie vyjádřené pomocí deformačních invariantů. [5]

Používají se dvou, tří, pěti a devíti-parametrové Mooney-Rivlin modely, které také můžeme považovat za speciální případy polynomické formy. [5]

- Dvou-parametrový model je jeden z nejvíce používaných modelů. Je ekvivalentní polynomické formě s $N = 1$:

$$W = c_{10} (I_1 - 3) + c_{01} (I_2 - 3)$$

kde c_{10} , c_{01} jsou materiálové konstanty. [5]

- Tří-parametrový model je shodný s polynomickou formou pro $N = 2$ a $c_{20} = c_{02} = 0$

$$W = c_{10}(I_1 - 3) + c_{01}(I_2 - 3) + c_{11}(I_1 - 3)(I_2 - 3)$$

kde c_{10} , c_{01} , c_{11} jsou materiálové konstanty. [5]

- Pěti-parametrový model je shodný s polynomickou formou pro $N = 2$:

$$W = c_{01}(I_1 - 3) + c_{01}(I_2 - 3) + c_{20}(I_1 - 3)^2 + c_{11}(I_1 - 3)(I_2 - 3) + c_{02}(I_2 - 3)^2$$

kde c_{10} , c_{01} , c_{11} , c_{20} , c_{02} , jsou materiálové konstanty. [5]

- Devíti-parametrový model je shodný s polynomickou formou pro $N = 3$:

$$\begin{aligned} W = & c_{10}(I_1 - 3) + c_{01}(I_2 - 3) \\ & + c_{20}(I_1 - 3)^2 + c_{11}(I_1 - 3)(I_2 - 3) + c_{02}(I_2 - 3)^2 \\ & + c_{30}(I_1 - 3)^3 + c_{21}(I_1 - 3)^2(I_2 - 3) + c_{12}(I_1 - 3)(I_2 - 3)^2 + c_{03}(I_2 - 3)^3 \end{aligned}$$

kde c_{10} , c_{01} , c_{11} , c_{20} , c_{02} , c_{30} , c_{21} , c_{12} , c_{03} jsou materiálové konstanty. [5]

- Dvou-parametrový model je využíván do 90-100 % tahové deformace, ale nemusí být dobře charakterizováno chování materiálu při stlačení.
- Pěti nebo devíti-parametrové modely mohou být používány pro deformace až do 300 %.

5.1.5 Arruda-Boyce

Arruda-Boyce je model založený na mikromechanice vnitřní struktury elastomerů. Arruda-Boyce může být uvažován jako rozšíření modelu Yeoh pro $N = 5$, kde konstanty mají reálný význam. [5]

$$W = \mu \sum_{i=1}^5 \frac{C_i}{\lambda_L^{2i-2}} (I_1^i - 3^i)$$

kde konstanty C_i jsou definovány jako: [5]

$$C_1 = \frac{1}{2}, \quad C_2 = \frac{1}{20}, \quad C_3 = \frac{11}{1050}, \quad C_4 = \frac{19}{7000}, \quad C_5 = \frac{519}{673750},$$

kde μ je počáteční smykový modul (stejně jako u modelu Neo-Hookean) a λ_L je tzv. "limitní protažení" sítě mikromechanického modelu struktury materiálu, při kterém už se síť

dál neprotahuje a napětí se začíná blížit nekonečnu. Jestliže se λ_L rovná nekonečnu, forma Arruda-Boyce přechází na Neo-Hookean. [5]

- Model je vhodný pro deformaci do 300 %.

5.1.6 Gent

Gentův model je podobný formulačně složitějšímu modelu Arruda-Boyce, jelikož také užívá konceptu limitního síťového protažení, nevychází však z modelu vnitřní struktury elastomerů. [5]

$$W = -\frac{EI_m}{6} \ln\left(1 - \frac{I_1 - 3}{I_m}\right)$$

kde E je počáteční modul pružnosti, který je pro nestlačitelné materiály 3μ I_m je limitní hodnota členu $(I_1 - 3)$, analogická k λ_L v Arruda-Boyce modelu. Jestliže hodnota přirozeného logaritmu narůstá, výsledná forma se bude podobat modelu Yeoh. Jestliže se I_m bude rovnat nekonečnu model opět přejde na formu Neo-Hookean. [5]

- Výhody modelu spočívají v jeho jednoduchosti (pouze dvě materiálové konstanty) a schopnosti postihnout závěrečnou vyztužovací fázi napětově deformační odezvy.

5.1.7 Ogden

Ogden navrhl funkci vyjádřenou v hodnotách hlavních protažení. [5]

- Tento model je dnes široce používaný a poměrně dobře vystihuje chování elastomerů i při velkých deformacích.

$$W = \sum_{i=1}^N \frac{\mu_i}{\alpha_i} (\lambda_1^{\alpha_i} + \lambda_2^{\alpha_i} + \lambda_3^{\alpha_i} - 3)$$

kde μ a α_i jsou materiálové konstanty bez konkrétního fyzikálního významu (μ_i mají však obecně význam počáteční tuhosti). Za N se dosazují hodnoty od jedné do nekonečna, ale obvykle není hodnota N vyšší než 3. [5]

Pro $N = 1$ a $\alpha_i = 2$ se Ogden stává ekvivalentní k modelu Neo-Hookean. Pro $N = 2$, $\alpha_i = 2$ a $\alpha_i = -2$ Ogden přechází na dvou-parametrový Mooney-Rivlin model.

- Ogden může být obecně aplikován pro deformaci do 700 %.

Výše uvedené vztahy jsou v důsledku předpokládané objemové nestlačitelnosti elastomerů nezávislé na třetím invariantu I_3 pravého Cauchy-Greenova deformačního tenzoru. Pro případné zahrnutí objemové stlačitelnosti "téměř nestlačitelných" elastomerů je funkce W doplněna o aditivní člen W_{vol} závislý na I_3 (respektive poměrné objemové deformaci i , pro kterou platí $I_3=J^2$) a objemovém modulu K . Níže je stručný přehled tvarů W_{vol} používaných v uvedených modelech: [5]

$$W_{vol} = \frac{K}{2}(J-1)^2$$

$$W_{vol} = \frac{K}{4}((J-1)^2 + (\ln J)^2)$$

$$W_{vol} = K(J \ln J - J + 1)$$

$$W_{vol} = \frac{9K}{2} \left(J^{\frac{1}{3}} - 1 \right)^2$$

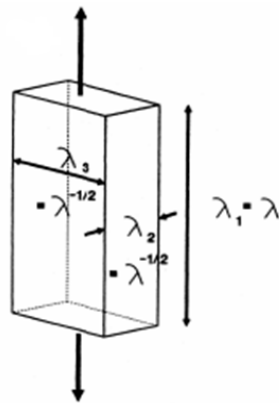
$$W_{vol} = \frac{K}{2} \left(\frac{J-1}{2} - \ln J \right)$$

5.2 Stanovení materiálových konstant pro hyperplastické modely

Jednoduché lineární modely jsou založeny na modulu pružnosti a Poissonově konstantě. Tyto parametry lze stanovit poměrně jednoduše na standardních sériově vyráběných zařízeních. Avšak, pro stanovení materiálových konstant nelineárních hyperelastických modelů je nutno v materiálu dosáhnout i dalších módů namáhání. Pro tento způsob zatížení jsou nezbytné speciální přístroje a vybavení. [5]

Vzhledem k různorodosti elastomerů je nutné pro každou konkrétní analýzu přesně stanovit materiálové konstanty daného materiálu. Požadovaným výstupem z testů je vždy celá křivka závislosti napětí/deformace pro daný způsob zatěžování.

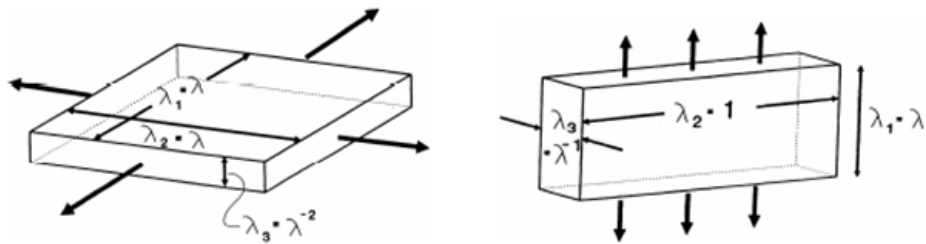
Abychom získali přesné parametry do hyperelastických modelů musíme materiál zkoušet v jednoosém a dvouosém tahu.



Obr. 3. Jednoosý tah.

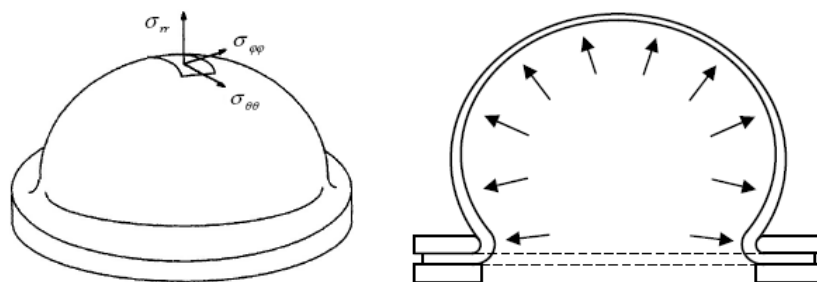
Jednoosý tah lze testovat na univerzálních zkušebních strojích. V tomto případě je vzorek materiálu roztahován ve směru jediné osy. [5]

Dvouosém tahu a čistém smyku (Kohnke 1998). [5]



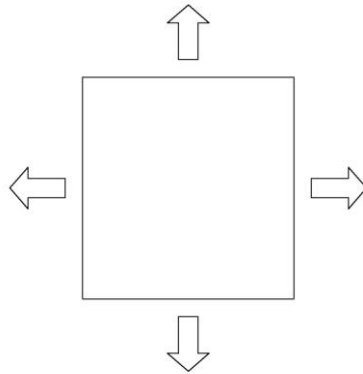
Obr. 4. dvouosý tah a čistý smyk.

Při dvouosém zatížení je nutno plochý vzorek materiálu napínat ve všech směrech jeho roviny (dohází k tomu např. při nafukování míče). Tohoto stavu lze dosáhnout několika způsoby, již zmíněním vydutím plochého vzorku stlačeným vzduchem (Reuge 2001). [5]



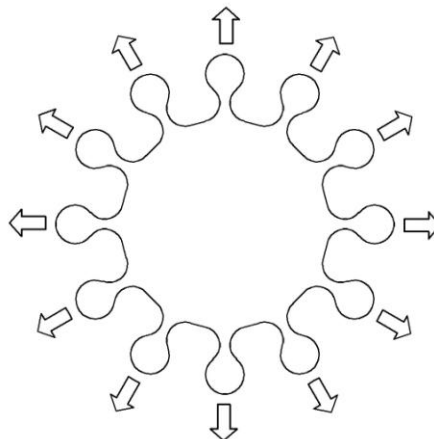
Obr. 5. Metoda dvouosého tahu pomocí nafouknutí vzorku.

Roztahováním čtvercového vzorku do dvou navzájem kolmých směrů. [5]



Obr. 6. Metoda dvouosého namáhání pomocí tahu ve dvou kolmých osách.

Roztahováním kruhového vzorku radiálně ve směru od středu (MSC.Software, 2000). [5]



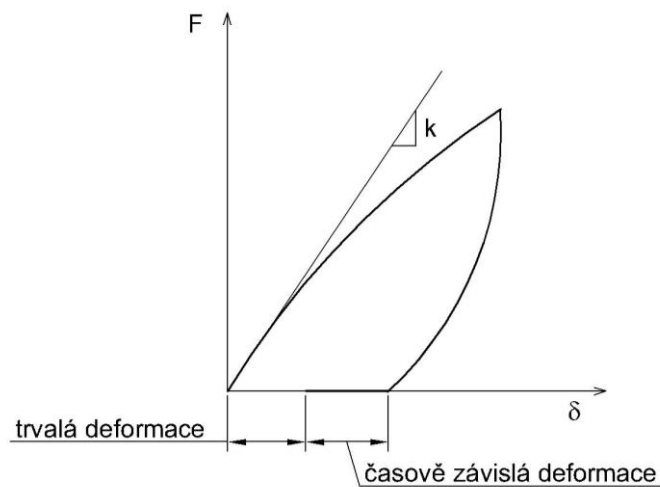
Obr. 7. Metoda dvouosého namáhání pomocí radiálního tahu.

Čistého smyku lze v tělese dosáhnout natahováním podélného vzorku jehož výška je alespoň 10x menší než jeho šířka. [5]

6 PRYŽKOVÉ PRUŽINY

6.1 Charakteristika pružiny

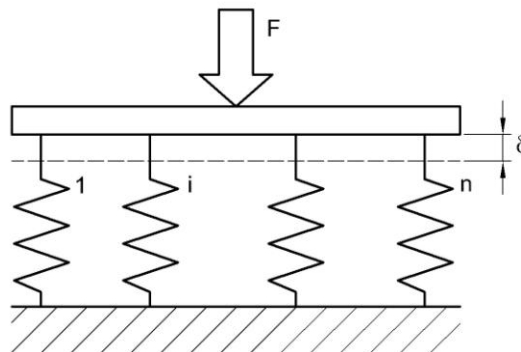
Charakteristikou pružného prvku nazýváme závislost jeho zatížení na deformaci - obr. 8. Při větších deformacích jsou charakteristiky pryžových pružin obecně nelineární. Tato nelinearita je obecně působena nejen materiálovými, ale i geometrickými vlivy. Tuhost, nebo též konstanta pružiny je dána směrnicí charakteristiky v jejím počátku. [8]



Obr. 8. Charakteristika pružiny.

V praxi je často uložení realizováno několika pružnými prvky. Při uspořádání pružin vedle sebe je [8]

$$\delta = \delta_i \quad \text{takže} \quad F = \sum_{i=1}^n F_i = \delta \sum_{i=1}^n k_i \quad k = \sum_{i=1}^n k_i$$



Obr. 9. Uspořádání pružin vedle sebe.

Výsledná tuhost uložení je tak součtem tuhostí jednotlivých pružin. [8]

Při uspořádání za sebou platí: [8]

$$F = F_i, \quad \delta = \sum_{i=1}^n \delta_i, \quad \text{takže} \quad \frac{1}{k} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{k_i}$$



Obr. 10. Uspořádání pružin za sebou.

Výsledná tuhost za sebou řazených pružin je tak vždy menší než nejmenší použitá tuhost pružiny. [8]

6.2 Prvky namáhané smykem

Pro zatížení základního pryžokovového prvku smykem platí rovnice: [9]

tuhost pružiny: $k = \frac{F}{\delta}$

Hookův zákon ve smyku: $\tau = G \cdot \gamma$

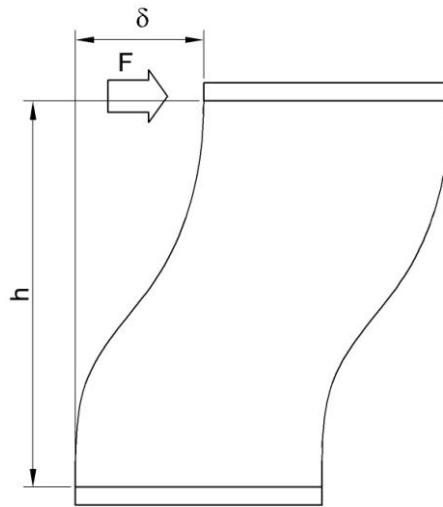
smykové přetvoření: $\gamma \approx \frac{\delta}{h}$

Kombinací rovnic získáme základní rovnici vztahu smykové tuhosti, modulu pružnosti ve smyku a tvarového designu. [9]

tuhost ve smyku: $k_s = \frac{F}{\delta} = \frac{\tau \cdot S}{\delta} = \frac{G \cdot \gamma \cdot S}{\delta} = \frac{G \cdot S}{h}$

Kde K_s je smyková tuhost pružiny, F_s je aplikovaná síla ve směru smyku, δ_s je smykové posunutí, S zatížená plocha, G smykový modul pružnosti, a h je tloušťka pryže.

Rovnice může být použita v jednoduchých smykových kalkulacích pro ploché pružiny. Rovnice platí, pouze když smyková deformace způsobená ohybem je nepatrná. Jestliže poměr tloušťky a délky přesáhne přibližně 0,25 tak by se smyková deformace způsobena ohýbáním měla zohledňovat. Efekt ohýbání je ukázaný na obr. 11. [9]



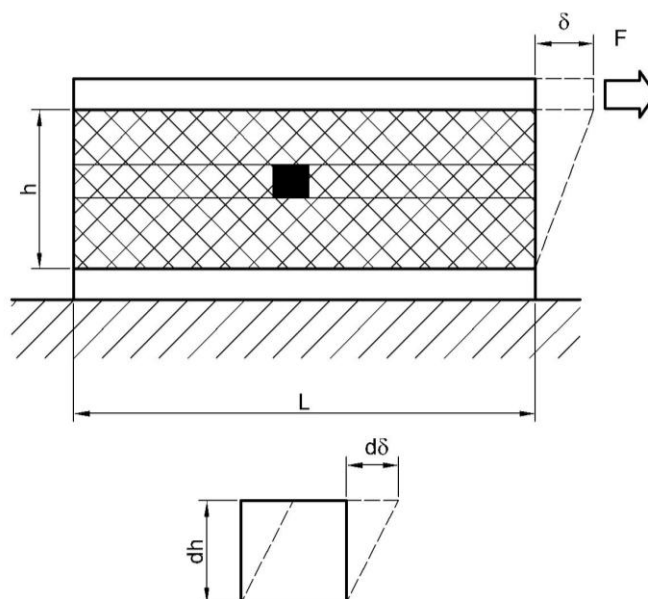
Obr. 11. Efekt ohýbání.

Dva další faktory, které mohou ovlivnit smykovou tuhost jsou: [9]

- Tahové napětí v pryži když smyková deformace $d\delta/h$ dosáhne přibližně 75% nebo když součást má efektivní tvarový faktor menší než 0.1. V tomto bodě pryž není namáhána pouze ve smyku, ale jsou zde i složky tahové síly v pryži mezi dvěma konci desek.
- Změna smykového tuhosti způsobena aplikovaným tlakovým napětím. U komponentů s vysokým tvarovým faktorem se smyková tuhost zvyšuje se zvyšujícím se tlakovým zatížením.

Konstanta jednoduché pružiny (případ tzv. lineárního smyku) je: [8]

$$k = \frac{F}{\delta}$$

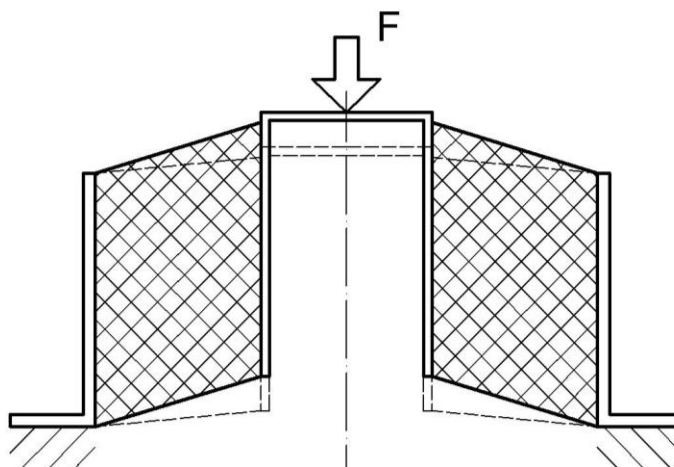


Obr. 12. Pružina namáhaná smykem.

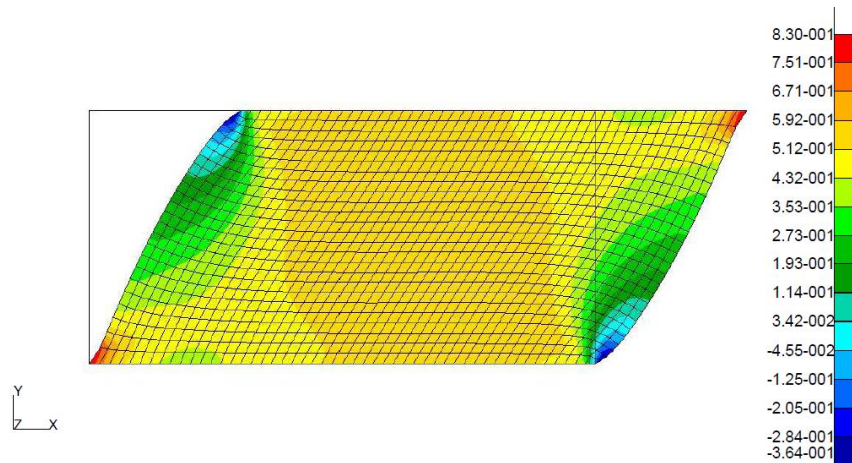
Střední smykové napětí vyjádříme v oblasti malých deformací Hookeovým zákonem: [8]

$$\tau_{sř} = G \cdot \gamma \quad \gamma = \operatorname{tg} \varphi = \frac{d\delta}{dh} \quad \text{je tedy } F = \tau_{sř} \cdot b \cdot l \quad \text{takže } k = \frac{Gbl}{h}$$

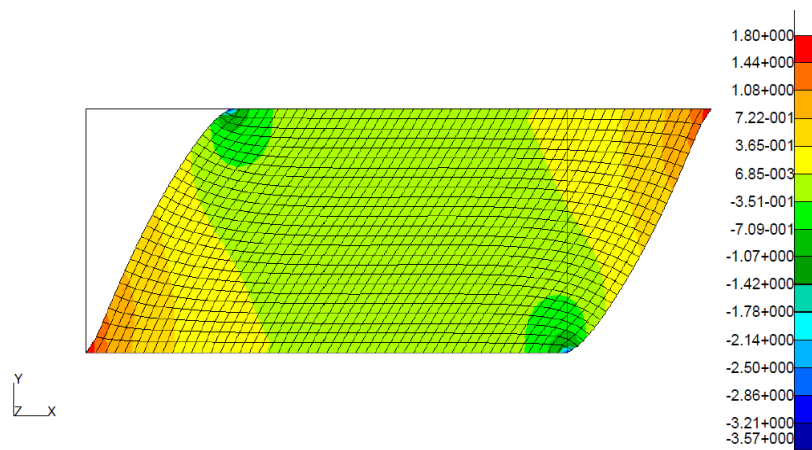
Jak patrně z výsledků deformačně-napěťové analýzy v oblasti lineární elasticity, oblast tzv. čistého smyku je v důsledku okrajové podmínky volného povrchu na obou koncích prvků porušena. Jednotlivé složky 2D napjatosti vykazují v rozích pružiny napěťové špičky, mající za následek snížení trvanlivosti prvku vlivem tvorby separací v těchto místech. Ke snížení nepříznivého tahového napětí v místech dle obr.14 lze montovat dvojice pružin s tlakovým přepětím. Podobně působí konstrukční úprava znázorněná na obr. 16. [8]



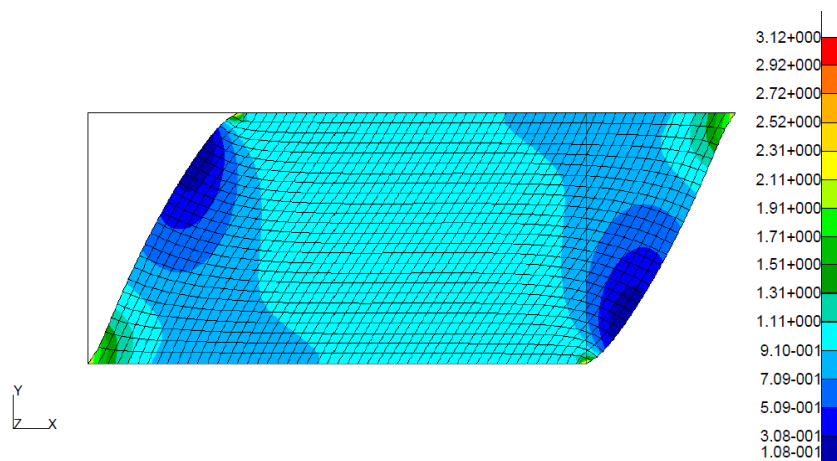
Obr. 13. Konstrukční úprava smykové pružiny.



Obr. 14. Pružina namáhaná smykem, smykové napětí XY.[8]

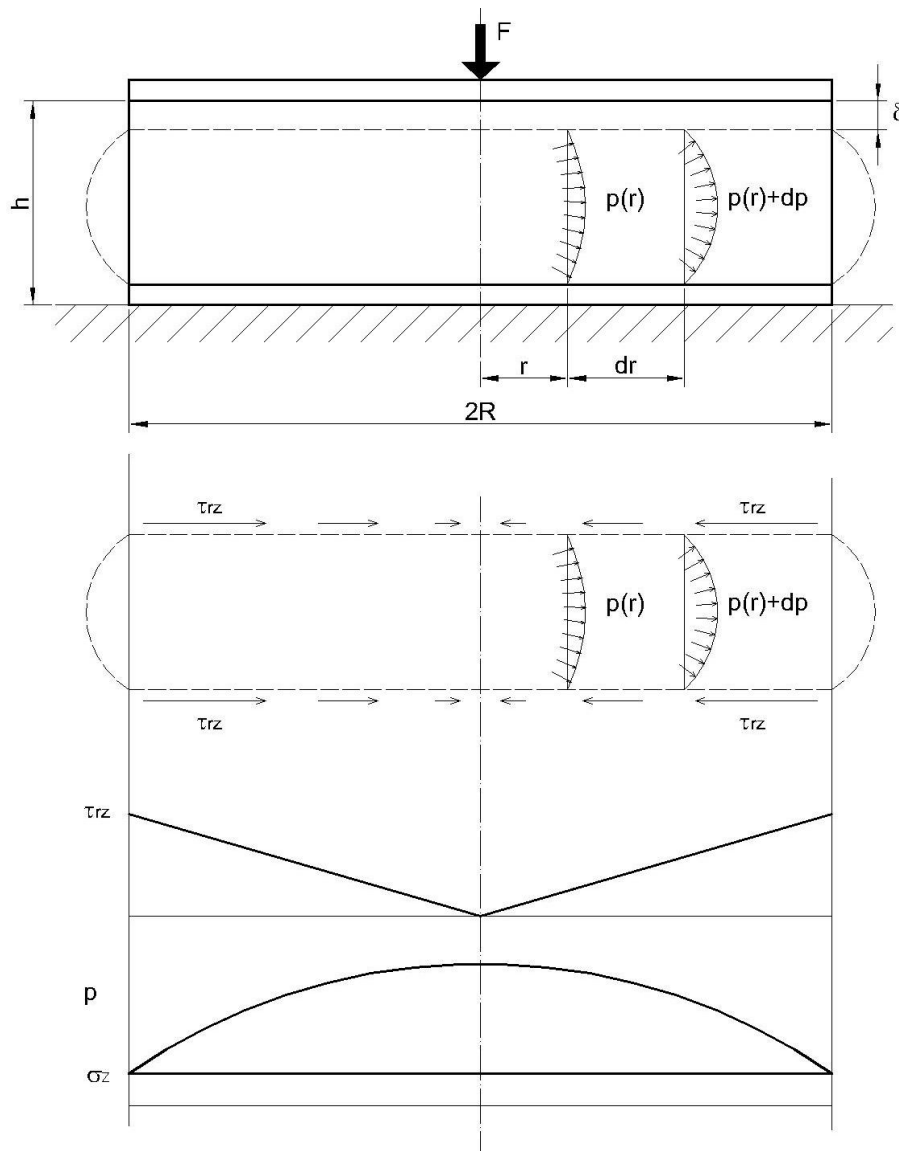


Obr. 15. Pružina namáhaná smykem, tahové napětí ve směru Y.[8]



Obr. 16. Pružina namáhaná smykem, von misesovo napětí.[8]

6.3 Tlakové pružiny

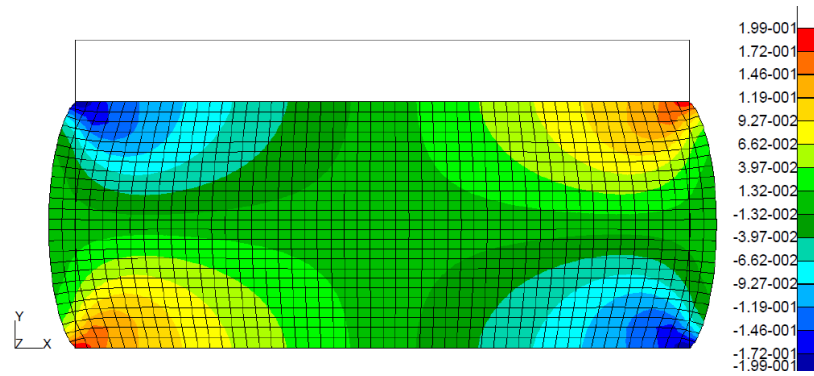


Obr. 17. Tlaková pružina.

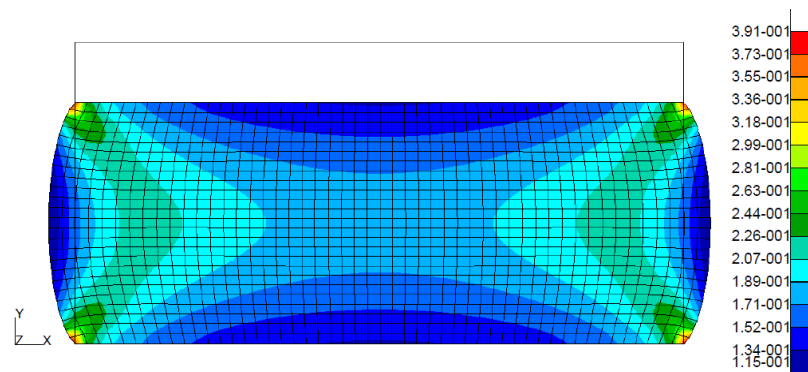
Uvažujme cylindrický pryžokový prvek o poloměru r a tloušťce h , obr.17, zatížený osově symetricky silou F . Prosté jednoosé kompresi pryžové části brání vazba s ocelovými plechy, k nimž je pryž přivulkanizována. Tuto vazbu (pokud nedochází k separaci), lze uvažovat jako totálně tuhou, vzhledem k značnému rozdílu tuhostí ocelí a pryže. [8]

$$\varepsilon = \frac{\delta}{h}$$

$$\sigma_z = E \cdot \varepsilon = E \cdot \frac{\delta}{h}$$



Obr. 18. Pružina namáhaná tlakem, smykové napětí XY.[8]



Obr. 19. Pružina namáhaná tlakem, von misesovo napětí.[8]

Vliv tuhé vazby s ocelovými plechy projeví navenek vyšší tuhostí prvku, jako důsledek bránění volným radiálním deformacím v oblasti vazby. Zjednodušeně myšleno, lze si představit nahrazení účinku ocelových částí smykovým napětím τ_{rz} . Tato napětí budou zřejmě přímo úměrná normálové složce a závislá na relativní radiální pořadnici r/h . Budeme-li zjednodušeně považovat závislost na r/h za lineární, bude [8]

$$\tau_{rz} \approx \sigma_z \cdot \frac{r}{h}$$

$$\tau_{rz} \approx E \frac{\delta}{h} \cdot \frac{r}{h}$$

Z přibližné rovnice rovnováhy elementu pryžového bloku v radiálním směru je zřejmě podle [8]

$$2\tau_{rz} dr = h \cdot dp(r) \quad \text{tj.} \quad \tau_{rz} \approx \frac{h}{2} \cdot \frac{dp(r)}{dr}$$

kde $p(r)$ je hodnota normálového napětí - tlaku, charakterizujícího "vytékání" pryže (analogicky toku kapaliny mezi dvěma rovnoběžnými deskami). Je tedy [8]

$$dp = \frac{2 \cdot \tau_{rz} \cdot dr}{h}$$

$$dp = \frac{2E\delta r dr}{h^3}$$

a hodnota tlaku v místě r

$$p(r) = \int_0^r dp(r) = 2E \frac{\delta}{h^3} \int_0^r r dr = 2E \frac{\delta}{h^3} \left[\frac{r^2}{2} \right]_0^r = E \frac{\delta}{h^3} r^2 + C$$

$$\text{V } r = R \quad p(R) = 0 \quad \text{takže } C = -E \frac{\delta}{h^3} R^2$$

Odhadovaná závislost tlaku p na radiální pořadnici r je tedy tvaru [8]

$$p(r) \approx E \frac{\delta}{h^3} (R^2 - r^2)$$

Uvedená zjednodušení a předpoklady dobře korespondují s výsledky konečnoprvkové analýzy. Patrné jsou rovněž koncentrace von Misesova napětí na okraji rozhraní ocel - pryž. [8]

Celková síla F , potřebná ke stlačení pryžokovového cylindrického prvku je dána integrací normálových napětí po zátěžné ploše prvku: [8]

Síla nevázaného prvku:

$$F_0 = \sigma_z \cdot S$$

$$F_0 = \int_{r_0}^R 2 \cdot \pi \cdot r \cdot \sigma_z \cdot dr$$

$$F_0 = \frac{\pi E \delta R^2}{h}$$

Síla vyvolaná vázáním:

$$F_p = \int_0^R 2\pi \cdot p(r) dr$$

$$F_p = \frac{E\delta}{h^3} \int_0^R (R^2 - r^2) 2\pi r \cdot dr = \frac{2\pi E\delta}{h^3} \left[R^2 \cdot \frac{r^2}{2} - \frac{r^4}{4} \right]_0^R = \frac{2\pi E\delta}{h^3} \left[\frac{R^4}{2} - \frac{R^4}{4} \right]$$

$$F_p = \frac{\pi E \delta R^4}{2h^3}$$

Celková síla je tak
$$F = F_0 + F_p = \pi E \frac{\delta}{h} R^2 \left[1 + 2 \left(\frac{R}{2h} \right)^2 \right]$$

$$F = F_0 + \left[1 + 2 \left(\frac{R}{2h} \right)^2 \right]$$

tvárový faktor
$$f = \frac{R}{2h}$$

$$F = F_0 + \left[1 + 2(f)^2 \right]$$

tvárová funkce
$$\phi(f) = 1 + 2f^2$$

$$F = F_0 \cdot \phi(f)$$

kde $\phi(f)$ je funkcí tzv. tvarového faktoru, definovaného jako podíl zatížené plochy a povrchu volné pryže tlakové pružiny. V daném případě cylindrické pružiny je [8]

$$f = \frac{\pi R^2}{2\pi R h} = \frac{R}{2h}$$

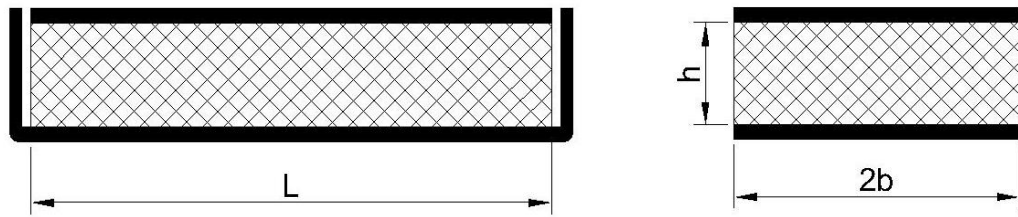
A tvarová funkce
$$\phi(f) = 1 + 2f^2$$

Tvarová funkce vyjadřuje (pro danou geometrii prvku) poměrné zvýšení tuhosti pryžového prvku vlivem vazby na ocelové části. Je-li konstanta nevázaného pryžového prvku $k_0 = \frac{F_0}{\delta}$, konstanta pryžokovového prvku $k = \frac{F}{\delta}$, potom poměrné zvýšení tuhosti vlivem vazby na ocelové části činí [8]

$$\frac{k}{k_0} = \frac{F}{F_0} = \phi(f)$$

Zatímco tvarový faktor f charakterizuje tvar v rámci určité geometrie - typu pryžokovového tlakového prvku, funkce $\phi(f)$ přísluší určité geometrii resp. typu pružiny. Např. pro pružiny typu dlouhého pásu šířky $2b$ - obr. 20 je zřejmé [8]

$$f = \frac{2bL}{2hL} = \frac{b}{h}$$



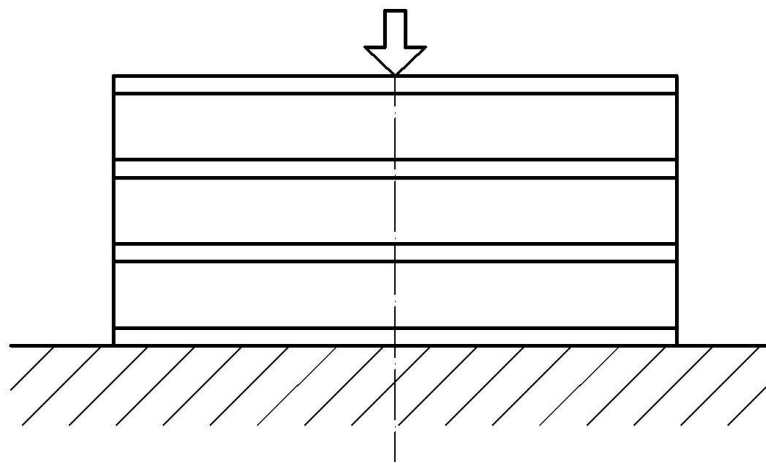
Obr. 20. Pružina typu dlouhý pás.

Funkce $\phi(f)$ tlakové pružiny typu dlouhý pás (případně kratší pás, ale s nulovým přetvořením v podélné ose pásu) má tvar [8]

$$\phi(f) = 1 + f^2$$

V praxi se často sestavují tlakové pružiny pomocí meziplechů ve vícevrstvou pružinu. Pro její konstantu platí [8]

$$\frac{1}{k_v} = n \frac{1}{k} \quad \text{tj.} \quad k_v = \frac{k}{n} \quad \text{kde } n \text{ je počet vrstev. [8]}$$



Obr. 21. Vícevrstvá pružina.

7 ELASTOMEROVÁ LOŽISKA

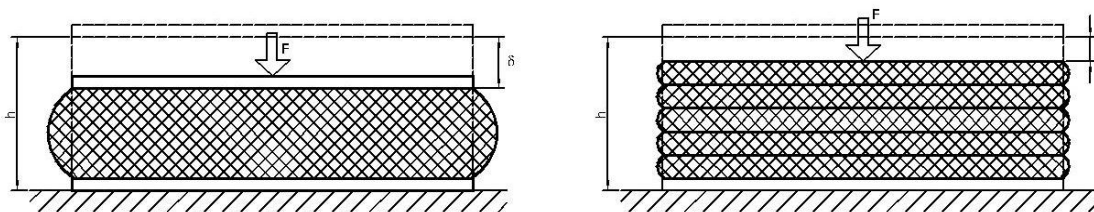
Materiálem těchto ložisek je elastický polymer (přírodní nebo polychloroprenová pryž). Tento materiál je pružný, ale prakticky nestlačitelný, tj. nemění objem. Nebrání-li se mu konstrukční úpravou v deformaci, je poddajný ve všech směrech. Je-li uzavřen, chová se při zatížení jako kapalina. [4]

Tato ložiska mohou být vytvořena jako pás nebo blok=deska (obdélníková, kruhová, eliptická, osmiboká). Konstrukčně mohou být provedena jako nevyztužená nebo vyztužená ocelovými plechy (vrstevnatá). Nevyztužená bloková ložiska, tj. bez výztužných plechů se obecně pro mostní konstrukce nepoužívají. [4]

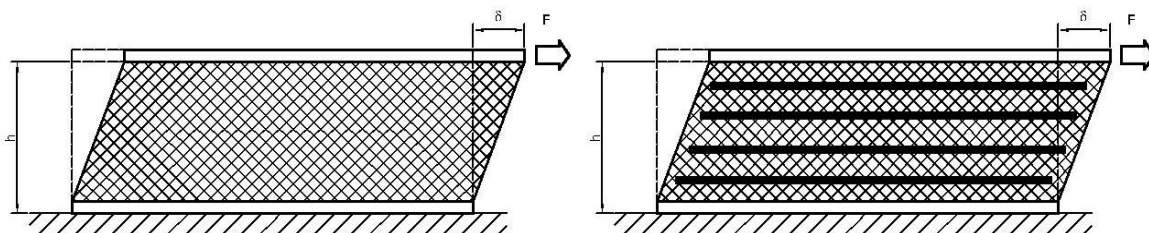
Na elastomerovou vrstvu působí svislé a vodorovné síly a deformace vyvolané vnějšími vlivy. V závislosti na vnějších silách a účincích vzniká její svislé stlačení, vodorovné vychýlení a vzájemné naklonění její horní a dolní úložné plochy. [4]

Účinkem svisle působící síly se ložisko stlačí. Stlačení je poměrně velké, odpovídá (při konstantním objemu) plochám bočního vyboulení. Je-li při stejné celkové výšce elastomeru tato výška rozdělena meziplechy na několik vrstev, omezí se velikost plochy bočního vyboulení, svislá tuhost ložiska se několikanásobně zvětší a tím se podstatně zmenší stlačení. [4]

Účinkem vodorovně působící síly se elastomer deformuje - vychýlí ve směru působící síly, tj. horní plocha se vodorovně posune vzhledem k ploše dolní. Vychýlení elastomerového ložiska je závislá na výšce elastomeru velikosti vodorovné síly a modulu pružnosti ve smyku G ; vložení meziplechů ovlivňuje vychýlení v malé míře a jejich vliv je možné zanedbat. [4]



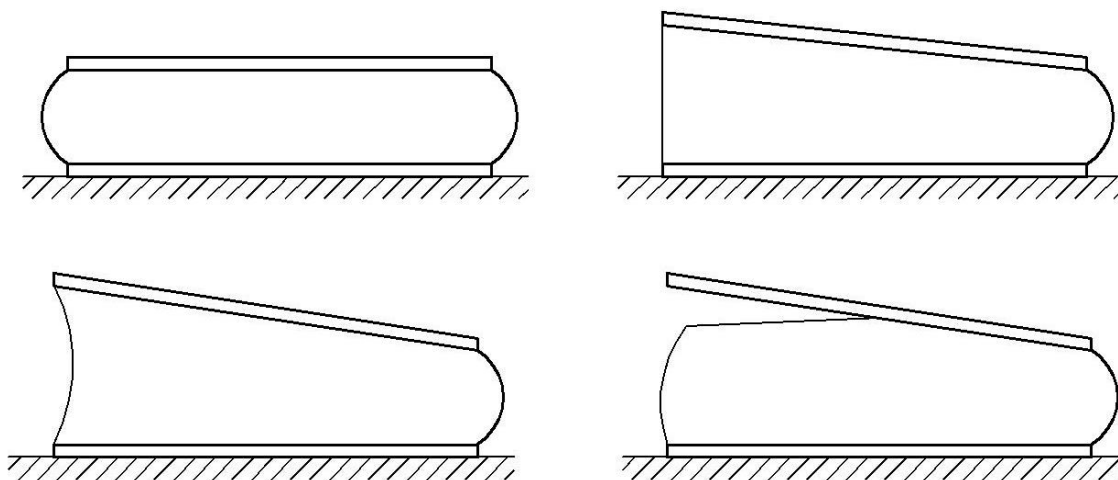
Obr. 22. Pružina bez výztuh a s výztuhou, zatížení tlakem.



Obr. 23. Pružina bez výztuh a s výztuhou, zatížení posunutím.

Účinkem pootočení ve svislé rovině se horní plocha nakloní, po deformaci má tloušťka elastomeru proměnnou velikost. Při různých poměrech tloušťky vrstvy, úhlu pootočení a velikosti svislého tlaku mohou nastat tyto případy a jim odpovídající deformace: [4]

- celá plocha elastomeru je tlačena
- celá plocha je tlačena, napětí na vnější hraně je rovno nule
- část plochy je tlačena, část tažena, možné pouze u přilepeného ložiska,
- část plochy je tlačena, část je bez napětí (rozevřená spára).



Obr. 24. Různé případy deformace elastomerového ložiska.

Při návrhu a osazování elastomerových ložisek je nutné pro bezporuchovou funkci dodržovat několik zásad: [4]

- ložisko se musí osazovat na vodorovnou plochu,
- úložná plocha (horní i dolní) musí být při osazování suchu, rovná, drsná, zbavená nečistot, prachu a mastnot,
- úložná plocha - horní i dolní - musí být rovnoběžné.
- Na jedné podpoře smí být použita pouze ložiska stejné půdorysné plochy a stejné výšky, na různých podpěrách mohou být použita ložiska jiných typů, příp. i jiných druhů (betonová, ocelová, kombinovaná). Vrstvení ložisek pro získání větší výšky je nepřijatelné.
- Světlá výška - vzdálenost mezi povrchem úložného prahu a spodní plochy nosné konstrukce musí být (pro možnost případné výměny ložisek) minimálně 150 mm. Protože výšky ložisek jsou menší, je nutné na povrchu úložného prahu vytvořit podložiskový blok; při jeho výšce do 50 mm nemusí být vyztužen, při výšce větší než 50 mm je nutné jej vyztužit.

Elastomerová ložiska mají proti tradičním ložiskům četné výhody. Hlavní výhodou z hlediska statického je umožnění posunu a pootočení ve všech směrech, což se příznivě projevuje hlavně u mostů širokých a půdorysně zakřivených. Ložiska mají schopnost tlumit dynamické účinky způsobené provozem na mostě, takže do podpěr se přenáší jen nepatrná jejich část. To je výhodné zvláště při uložení konstrukce na štíhlé podpěry. S útlumem chvění souvisí též snížení hlučnosti ocelových mostů. Z hlediska provádění je velkou výhodou snadné osazování těchto ložisek, které mají vzhledem k ložiskům tradičním nepatrnou hmotnost. Elastomerová ložiska nemusí (a nesmí) být mazána a kromě čištění nevyžadují žádné udržovací náklady. V neposlední řadě nízká konstrukční výška ložisek zlepšuje celkový estetický vzhled mostu. [4]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

8 ZADÁNÍ

Cílem diplomové práce je provést numerickou analýzu používaného elastomerového ložiska, navrhnout nový tvar ložiska a provést numerickou analýzu nového tvaru.

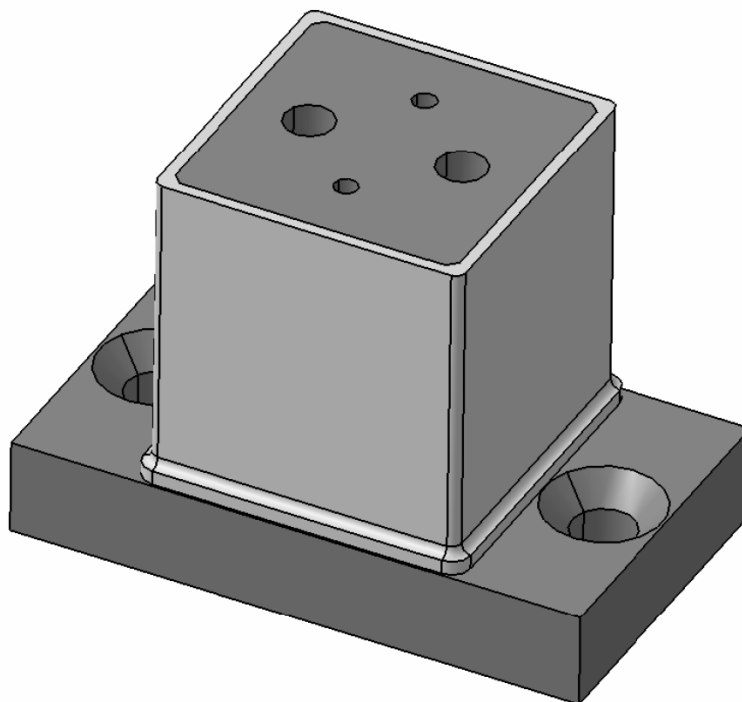
Numerické analýza byla provedena pomocí softwaru:

- pro zhotovení modelu CatiaV5R18.
- pro nastavení analýzy MSC.Patran 2010.
- pro výpočet MSC.Marc.
- pro zobrazení výsledků analýz MSC.Patran 2010.

Zatížení ložiska:

Ložisko je zatěžováno šikmou silou o velikosti vertikální složky $F_v = 120\,000\text{N}$ a horizontální složky $F_h = 7\,500\text{N}$ směřující ve směru posunutí.

Dále na ložisko působí posunutí horní spojovací desky do strany o velikosti $p = 30\text{ mm}$.

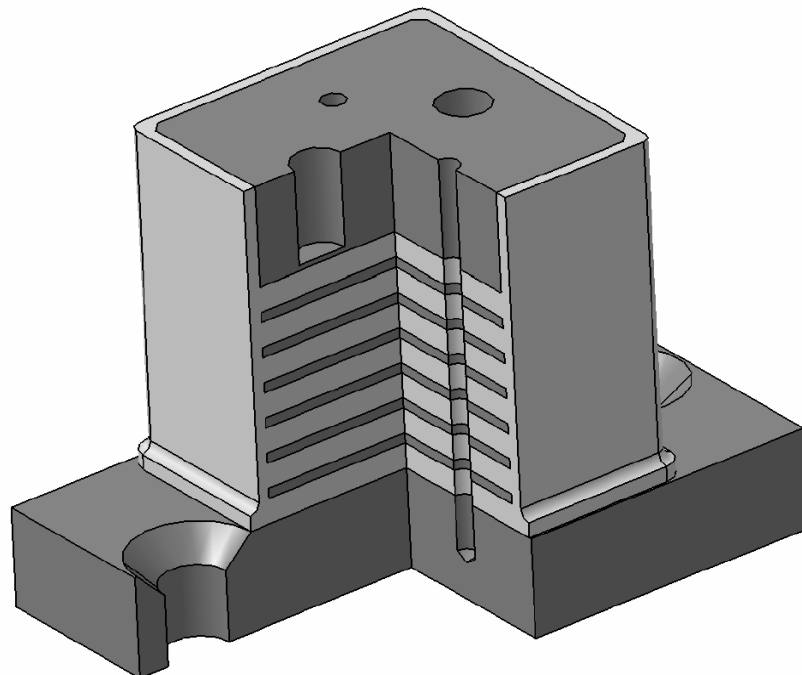


Obr. 25. Elastomerového ložisko.

9 KONSTRUKCE PŮVODNÍHO LOŽISKA

Původní ložisko se skládá pryžokovové části která má čtvercový půdorys o rozměrech 65 mm x 65 mm a výšce 67 mm. Pryžokovová část se skládá s horní spojovací desky a šesti výztuh o tloušťce 2 mm které jsou uloženy horizontálně nad sebou a mají mezi sebou stejnou vzdálenost 5 mm. Horní kovová deska slouží jako spojovací deska, v níž jsou dva otvory se závitem pro spojovací šrouby. Desky jsou zavulkanizovány v pryži, která výztuhy a spojovací desku obklopuje. Tím se docílí také k ochraně výztuh proti korozi. Výztuhy rozdělují ložisko na sedm elastomerových vrstev. Pomocí výztuh se dosáhne větší tuhosti ve svislém směru.

Dále je celý pryžokovový blok navulkanizován na ocelovou dosedací desku která má otvory pro uchycení šroubů a kterými je uchycena na konstrukci. Po celé délce pryžokovového bloku jsou dva svislé otvory které nemají konstrukční účel ale vzniknou po technologii kterou je pryžový blok vyráběn. Svislé otvory zůstanou po vytažení centrovacích tyčí.



Obr. 26. Původní tvar elastomerového ložiska.

10 NÁVRH NOVÉHO TVARU

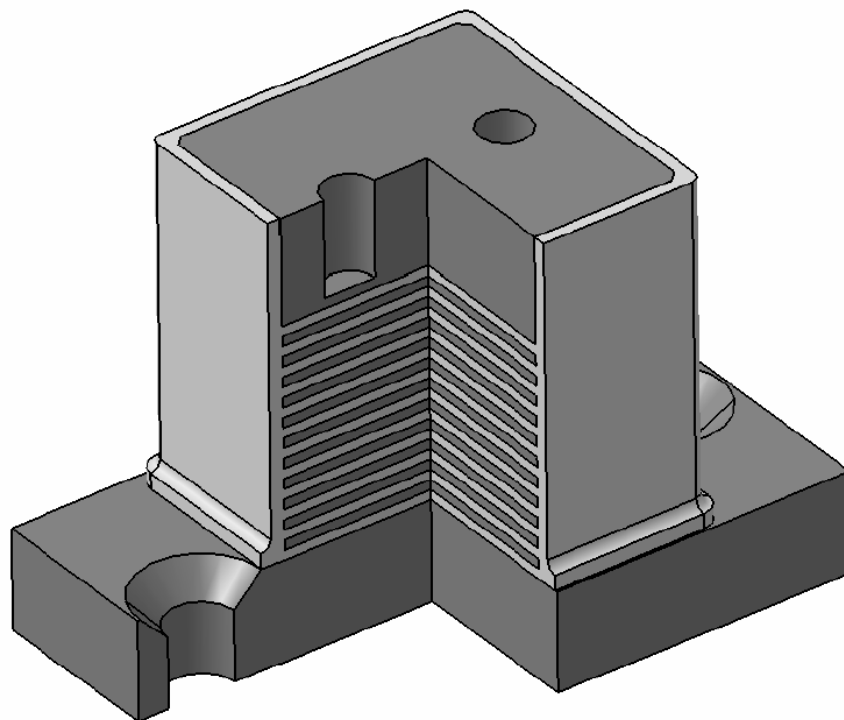
Podle výsledků analýz jsem navrhl úpravu původního ložiska.

10.1.1 Návrh 1: Ložisko bez děr 6

Toto ložisko se od původního liší tím, že nemá otvory v pryžokovovém bloku. Číslo 6 značí počet výztuh. Tímto tvarem byl zkoumán vliv otvorů v pryžokovovém bloku na velikost deformace a napětí v pryži.

10.1.2 Návrh 2: Ložisko bez děr 11

Toto ložisko se od původního liší tím, že nemá otvory v pryžokovovém bloku. Dále má větší počet výztuh a to 11. Mezi výztuhy o tloušťce 2 mm je 2 mm tloušťka pryže. Tento model byl použit pro zjištění vlivu počtu výztuh na velikosti napětí a deformace.



Obr. 27. Úprava tvaru 2.

10.1.3 Návrh 3: Ložisko bez děr 6 s rádiusem

Tento tvar je totožný s návrhem č. 1 s tím rozdílem, že má všechny hrany kovových prvků v pryži zaoblené. Touto úpravou jsem sledoval vliv ostré a zaoblené hrany na napětí v pryži.

10.1.4 Návrh 4: Ložisko original 6 s výplní

Tento návrh se od původního ložiska liší tím, že otvory vzniklé po centrovacích tyčích vyplníme pryží.

11 NASTAVENÍ ANALÝZY

Analýza byla provedena pomocí softwaru, který pracuje s metodou konečných prvků anglicky finite elements method zkratka FEM. Vytvořený model se nahradí konečnoprvkovou sítí která se skládá s jednotlivých elementů a uzlů. V analýzách byly použity tyto elementy. Pro 3D model čtyřstěn který má 4 uzlové body ve vrcholech a 6 uzlových bodů v polovinách hrany elementu. Označení pro tento element v programu je Tet 10. Pro 2D model byly použity obdélníkové elementy které mají čtyři uzlové body ve vrcholech elementu v programu označené jako Quad 4. Dále se na vytvořené síti určí okrajové podmínky stupně volnosti, uchycení, síla a posunutí. Průběh analýzy je takový, že při výpočtu se postupně zvětšují zatížení.

U některých výpočtů analýza neproběhla do konce, ale zastavila se na určité hodnotě zatížení. Je to z důvodu velké deformace elementů, při které jsou výsledky nepřesné a objevují se chyby v konečnoprvkové síti.

Ve výsledcích analýz jsem sledoval deformaci a napětí pryže.

11.1 Zhotovení 3D modelu

Dle výkresu byl vytvořen v programu Catia V5R18 model původního ložiska.

Do programu MSC.Patran 2010 byl importován model ve formátu STEP a poté upraven, aby vyhovoval dané analýze.

Při importování modelu bylo nastaveno, že 1 jednotka v programu MSC.Patran bude 1 mm ve skutečnosti. Zadávaná síla bude v N , modul pružnosti MPa a tudíž výsledky budou taky v MPa .

11.2 Materiálové charakteristiky

	Modul pružnosti [MPa]	Poissonova konstanta [-]
ocel	210 000	0,3
pryž	3	0,499

11.3 Analýza zatížení ložiska kombinací síly a posunutí

Při této analýze se sledovali velikosti napětí a deformace v pryži při plném zatížení ložiska. Zatížení se skládá se šikmé síly o velikosti vertikální složky $F_v = 120\,000\text{N}$ a horizontální složky $F_h = 7\,500\text{N}$ směřující ve směru posunutí.

Dále na ložisko působí horizontální posunutí horní spojovací desky do strany o velikosti $p = 30\text{ mm}$.

11.3.1 Zadání okrajových podmínek

Byla analyzována polovina modelu, tak že druhá polovina byla nahrazena okrajovou podmínkou symetrie XZ a to zamezením posunutí ve směru Y . Dosedací deska byla uvažována za dokonale tuhou a byla nahrazena pevnou plochou.

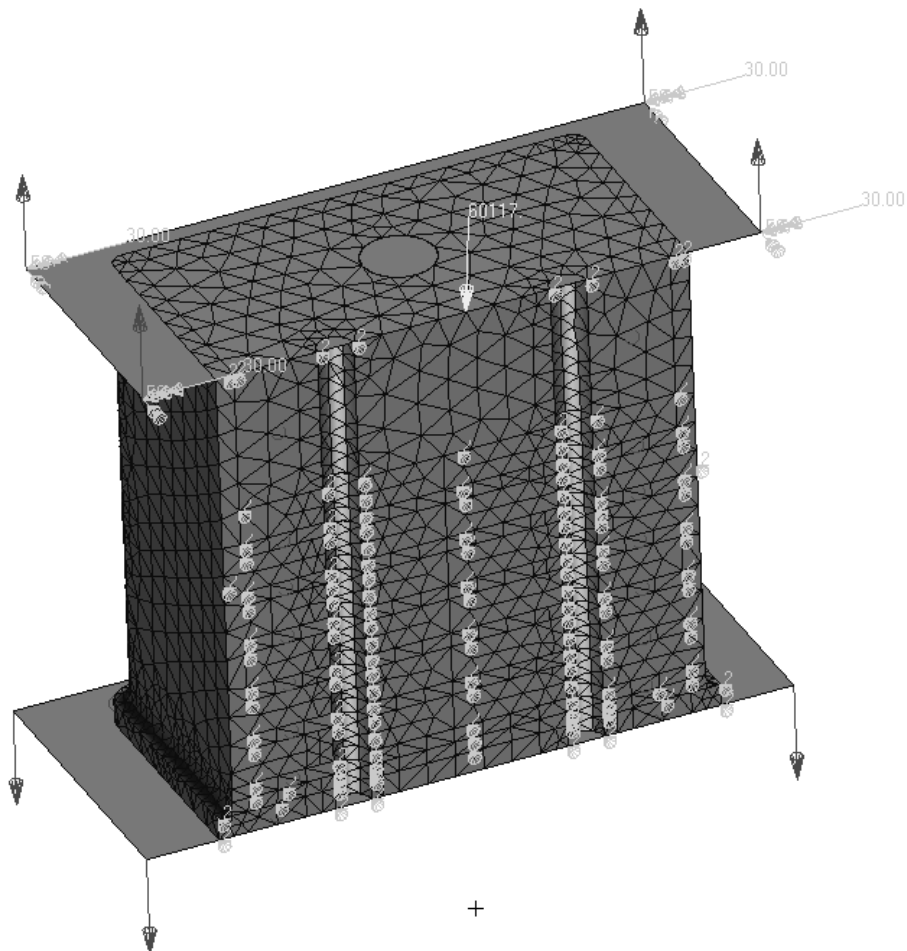
Tato zjednodušení pomohla vytvořit přesnější FEM síť. Jelikož při analýze jsme limitováni maximálním počtem elementů vzhledem k paměti počítače a celkové doby analýzy.

Dále byla vytvořena plocha, která dosedá na horní plochu ložiska. Tato plocha byla nadefinována jako pevná a bylo na ní zadáno zatížení a posunutí. Všechny součásti jsou k sobě spojeny nadefinováním kontaktu *Glue* (lepidlo). Kontakt se vytvořil nadefinováním součástí jako *Deformable* a vytvořených ploch jako *Rigid*. Spojení se vytvoří pak přes „*Contact Table*“. Síla byla zadána tak aby působila na pevnou horní plochu.

11.3.2 Vytvoření FEM sítě

délka strany elementu: 4

druh elementu: Tet10



Obr. 28. Síť a okrajové podmínky pro zatížení šikmou silou a posunutím.

11.4 Analýza zatížení ložiska svislou silou

Při této analýze se sledovalo velikost napětí a deformace v pryži při zatížení svislou silou o velikosti $F = 120\,000\text{N}$. Byla sledována také hodnota velikosti tuhosti ložisek ve svislém směru.

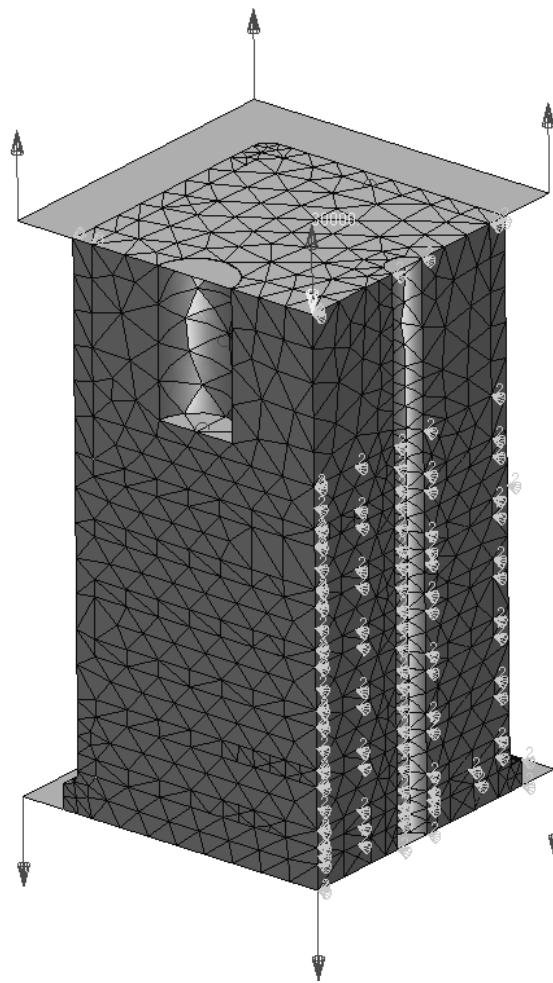
11.4.1 Zadání okrajových podmínek

Ložisko je ve dvou kolmých rovinách symetrické, takže při zatížení svislé síly stačilo, uvažovat symetrickou čtvrtinu modelu. Zbytek modelu byl nahrazen okrajovými podmínkami symetrie a to uchycením ve směru Z pro plochu symetrie XY a uchycením ve směru Y pro plochu symetrie XZ . Dosedací deska byla uvažována za dokonale tuhou a byla nahrazena pevnou plochou. Dále byla vytvořena pevná horní plocha, ve které byla zadána síla. Všechny součásti jsou k sobě spojeny nadefinováním kontaktu *Glue* (lepidlo).

11.4.2 Vytvoření FEM sítě

délka strany elementu: 4

druh elementu: Tet10



Obr. 29. Síť a okrajové podmínky pro zatížení svislou silou.

11.5 Analýza zatížení ložiska posunutím

V této analýze se sledoval vliv pouhého bočního posunutí ložiska na velikost deformace a napětí v pryži. Velikost posunutí je 30 mm.

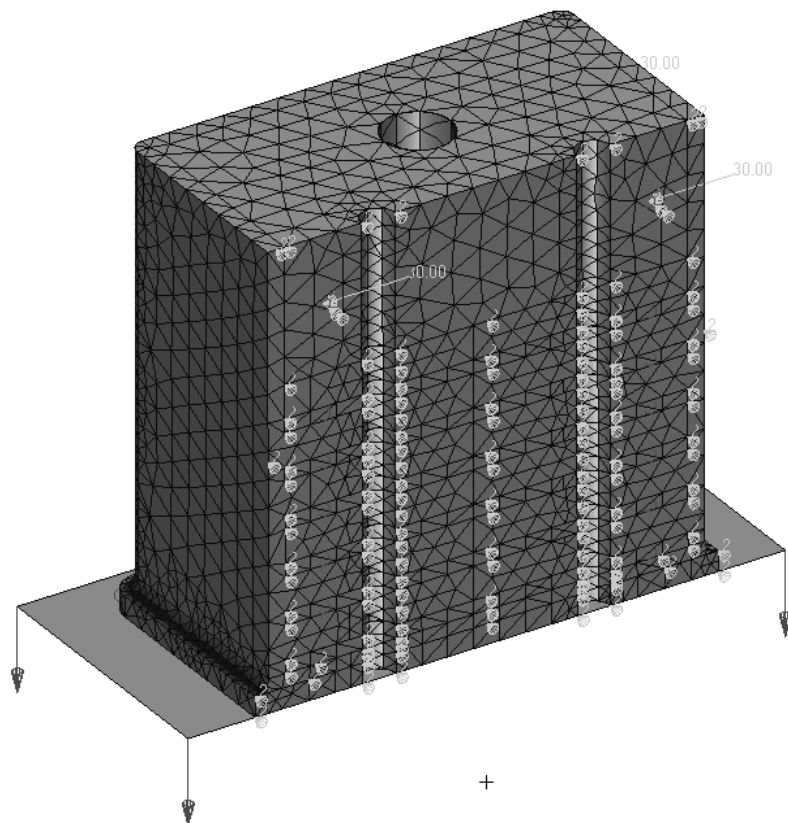
11.5.1 Zadání okrajových podmínek

Byla analyzována polovina modelu, tak že druhá polovina byla nahrazena okrajovou podmínkou symetrie XZ a to zamezením posunutí ve směru Y . Dosedací deska byla uvažována za dokonale tuhou a byla nahrazena pevnou plochou. Na horní upínací desku bylo zadáno posunutí v horizontálním směru a zamezení natočení aby spojovací deska byla rovnoběžně se základnou po celou dobu posunování. Všechny součásti jsou k sobě spojeny nadefinovaním kontaktu *Glue* (lepidlo).

11.5.2 Vytvoření FEM sítě

délka strany elementu: 4

druh elementu: Tet10



Obr. 30. Síť a okrajové podmínky pro zatížení posunutím.

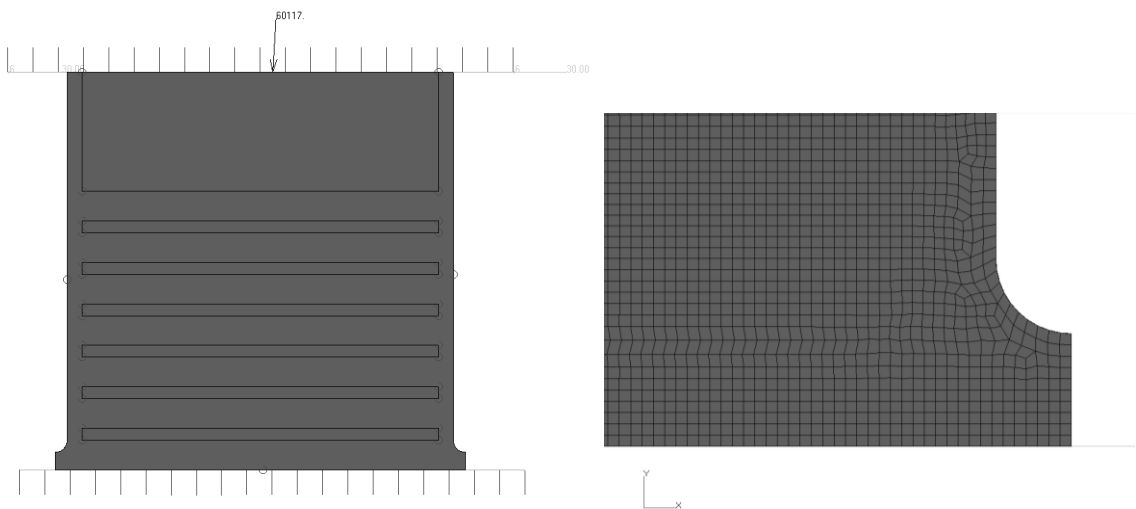
11.6 2D analýza

Dále byla použita 2D analýza a to pomocí „2D solid“. Ložisko nahradily plochy o definované tloušťce a materiálových vlastností. Horní plocha, přes kterou působí síla a plocha nahrazující základnu byla nahrazena přímkou. Okrajové podmínky byly zvoleny totožně s ohledem na 2D rozměr. Tento model je ve skutečnosti profil ložiska vytažený o definované tloušťce a to znamená, že pryž neobklopuje blok po celém jeho obvodu. Tato zjednodušení pomohla model nahradit hustější konečnoprvkovou sítí a daly nám užitečné výsledky, které byly srovnány s výsledky 3D analýzy.

11.6.1 Vytvoření FEM sítě

délka strany elementu: 0,3

druh elementu: Quad 4

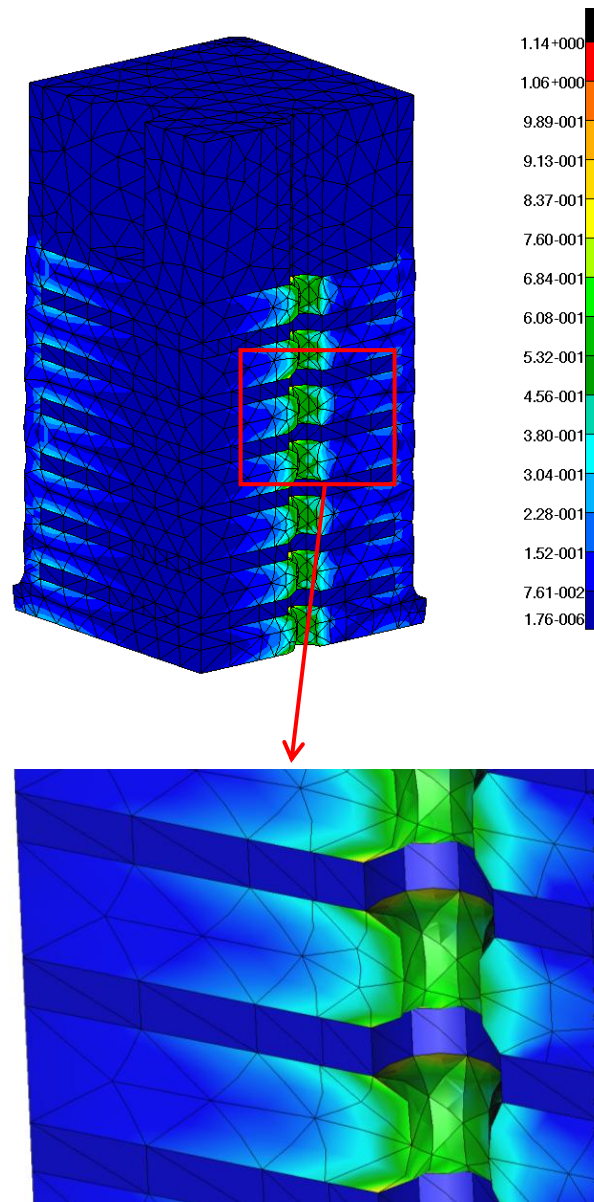


Obr. 31. Síť a okrajové podmínky pro 2D analýzu.

12 ANALÝZY ZATÍŽENÍ LOŽISKA SVISLOU SILOU

12.1 Analýza původního tvaru ložiska

Ve výsledcích je ložisko označeno jako: Ložisko original 6.

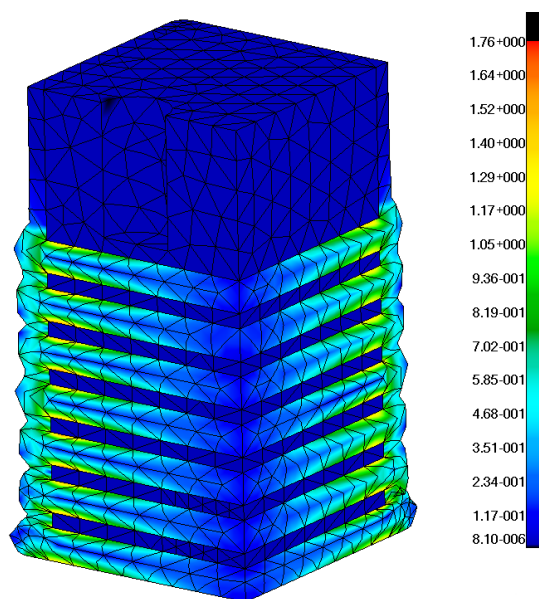


Obr. 32. Poměrná deformace původního tvaru.

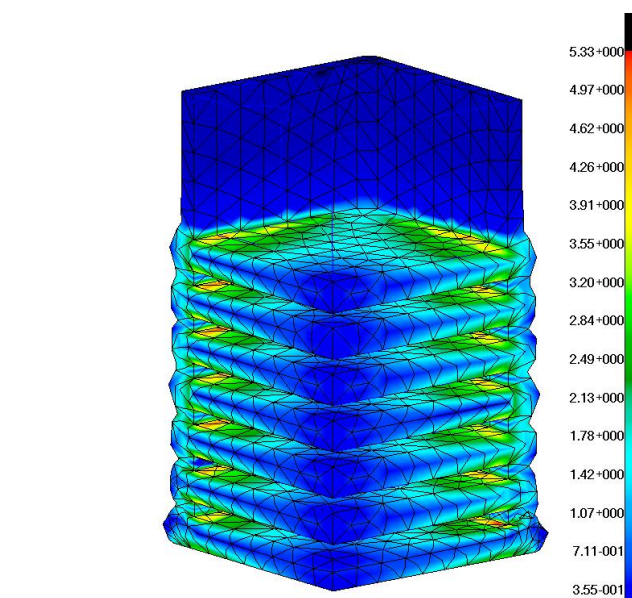
Z výsledků vyplývá že otvory v pryžokovovém bloku způsobují koncentraci napětí a to na obvodu děr na rozhraní materiálů pryž – kov. V těchto místech bude vznikat trhání pryže od kovové výztuhy. Z výsledků deformační analýzy zatížení svislou silou se také ukázalo že v místech otvorů vzniká v pryži značné vyboulení. Tyto jevy budou mít vliv na snížení únosnosti a životnosti elastomerového ložiska.

12.2 Analýza upraveného tvaru ložiska 1

Ve výsledcích je ložisko označeno jako: Ložisko bez děr 6.

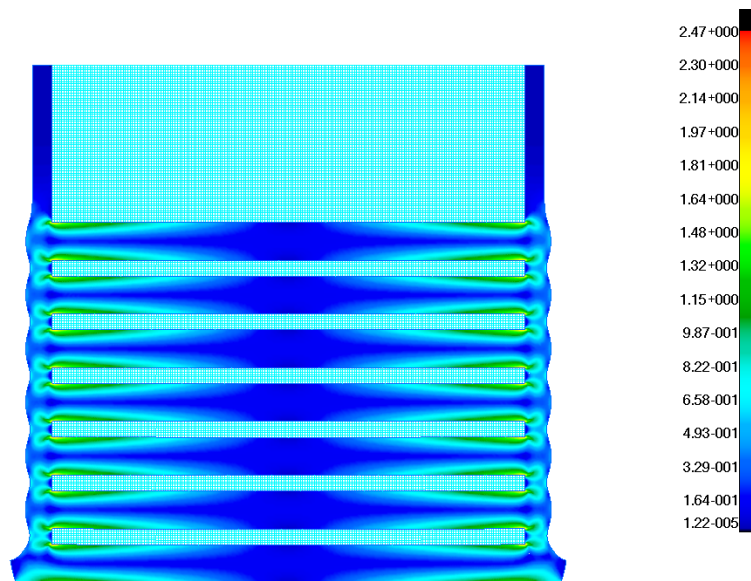


Obr. 33. Poměrná deformace návrhu 1.



Obr. 34. Von Misesovo napětí návrhu 1.

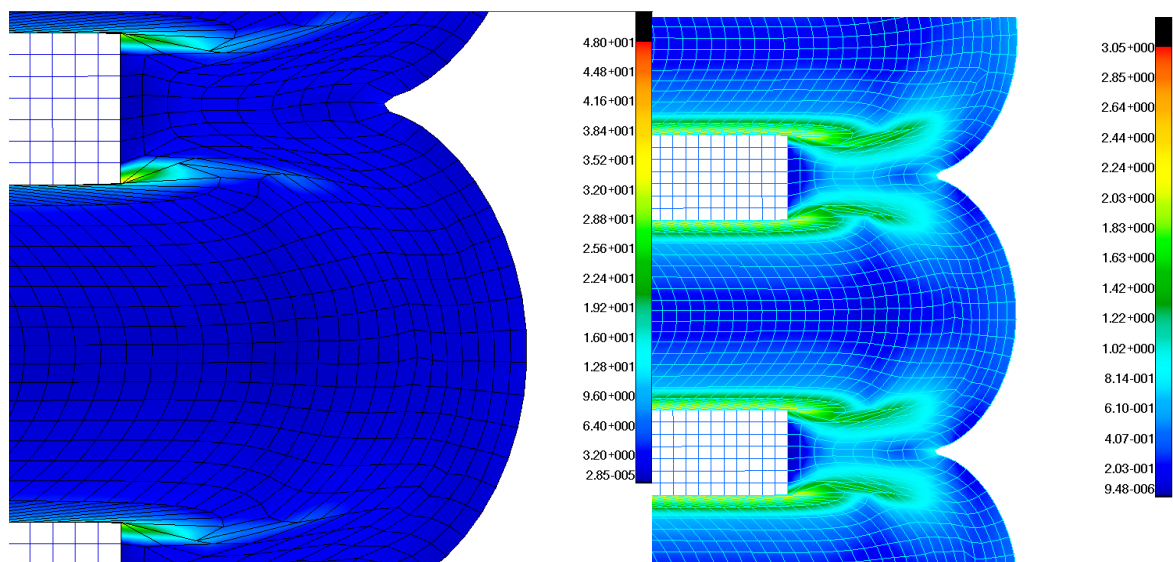
Největší deformace a napětí pryže se objevuje na hranách ocelových výztuh. Největší napětí se objevuje tam kde vzdálenost okraje výztuhy do středu je nejmenší. Proto podle rozložení napětí na povrchu výztuh lze usoudit že z hlediska efektivnějšího využití materiálu je vhodnější válcový tvar ložiska.



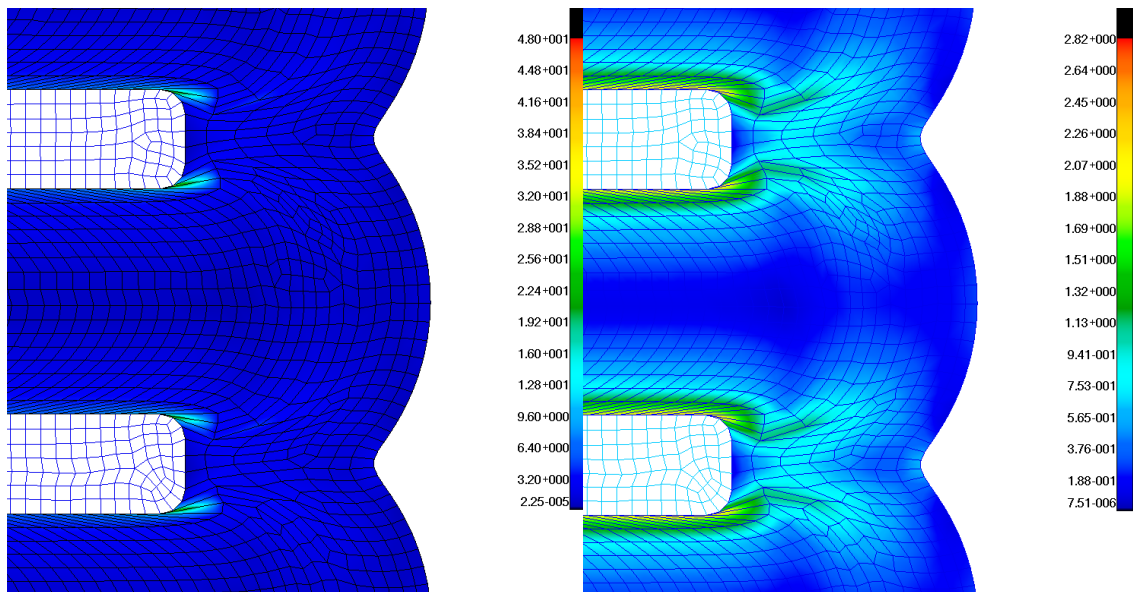
Obr. 35. Von Misesovo napětí při malém zatížení.

12.3 Analýza vlivu zaoblení hran výztuh na napětí v pryži

V této analýze bylo zkoumáno vliv ostré hrany a zaoblení kovových prvků v pryžokovovém bloku na velikost napětí a deformace.

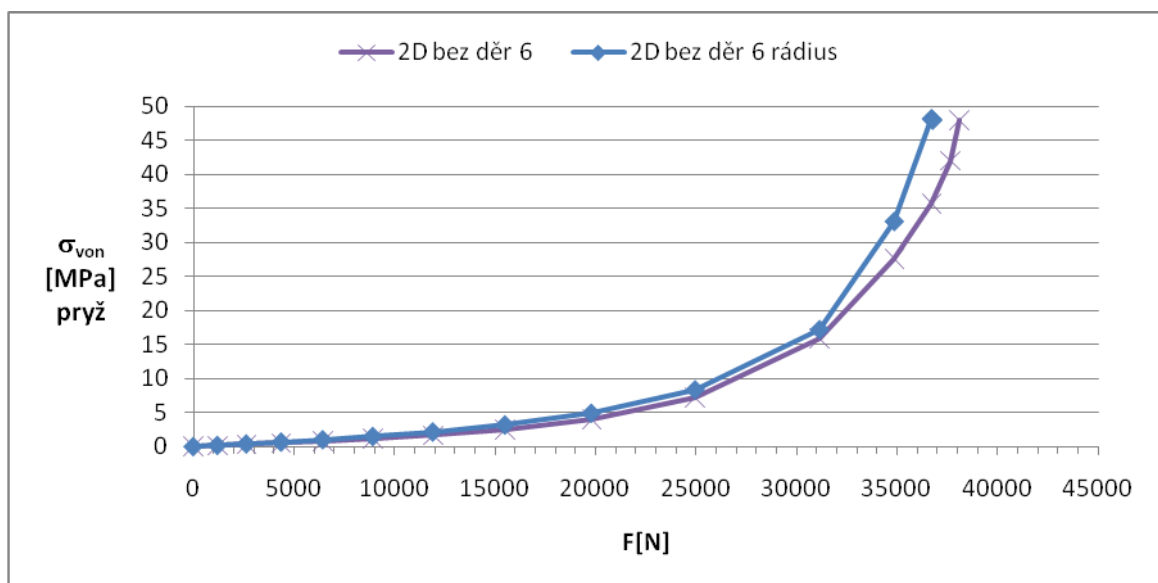


Obr. 36. Von Misesovo napětí (levý obrázek) a poměrná deformace (pravý obrázek) kolem ostré hrany.



Obr. 37. Von Misesovo napětí (levý obrázek) a poměrná deformace (pravý obrázek) kolem zaoblení.

Z výsledků analýz byl sestaven graf závislosti napětí v pryži při postupném zatěžování ložiska.



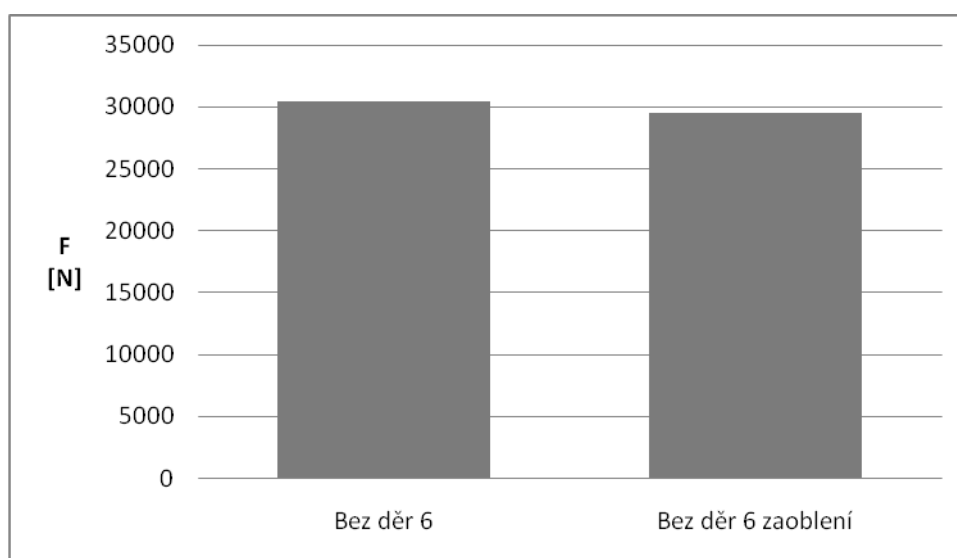
Obr. 38. Grafický průběh Von Misesova napětí pryže při ostrých a zaoblených hran.

Byla sestavena tabulka, kde bylo zvoleno porovnávací napětí v pryži a z grafu vyčteno zatížení ložiska.

Tab. 4. Srovnání výsledků analýzy vlivu ostré a zaoblené hrany.

Model ložiska	Porovnávací napětí v pryži σ_{von} [MPa]	Velikost zatížení F [N]
Bez děr 6	15	30500
Bez děr 6 zaoblení	15	29500

Z výsledků byl sestaven sloupcový srovnávací graf.

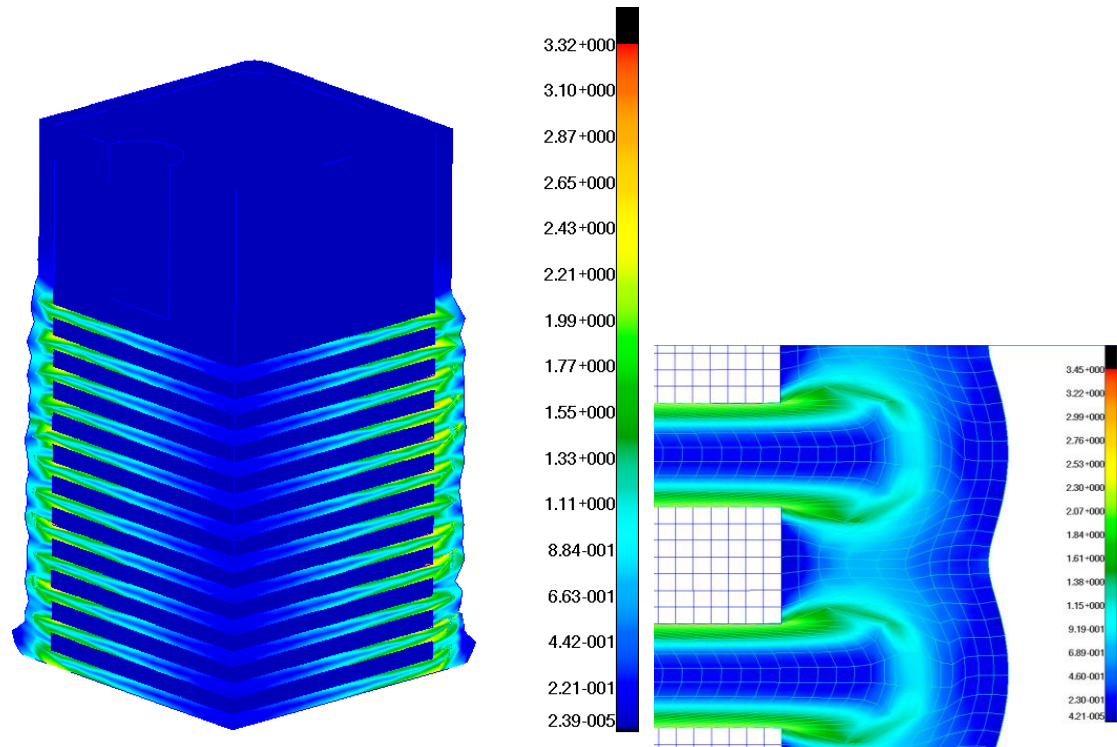


Obr. 39. Grafické srovnání vlivu zaoblené a ostré hrany.

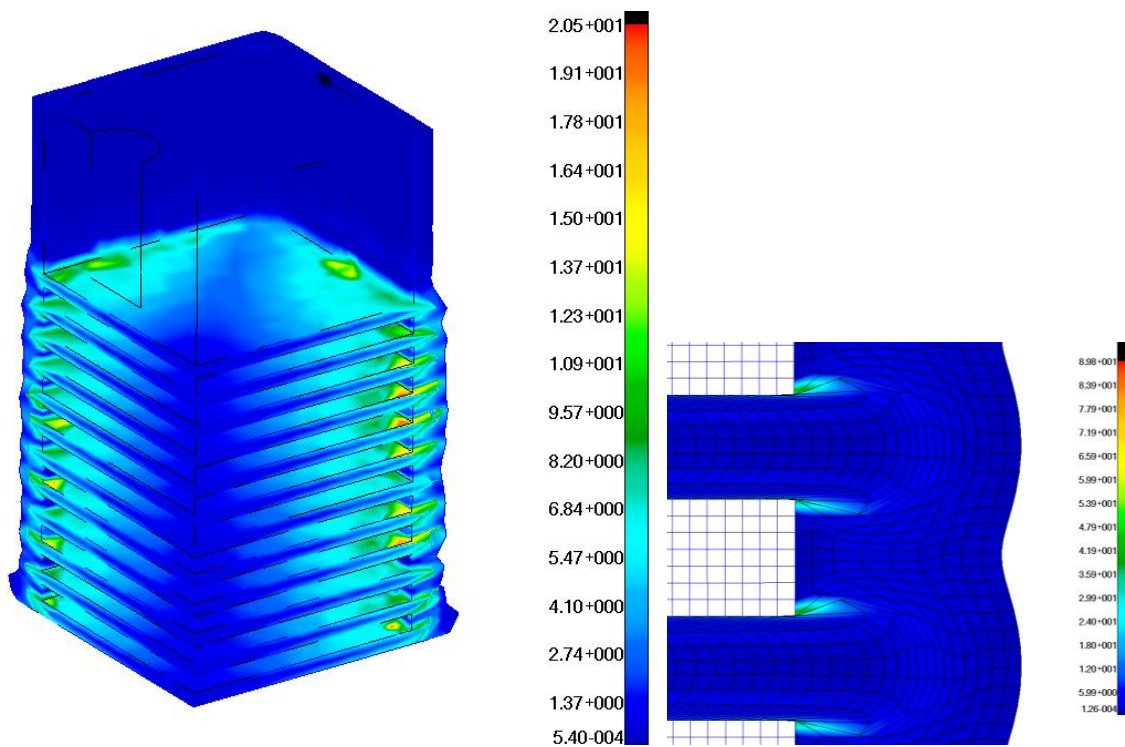
Z analýzy vlivu zaoblení hran výztuh na deformaci a napětí pryže vyplývá že ostrá nebo zaoblená hrana nemá podstatný vliv na velikosti napětí v okolí hrany výztuh. Zřejmě proto že koncentrace napětí na okrajích výztuh není způsobena ostrou hranou ale způsobem deformace pryže. Při zatížení pryž jakoby „vytéká“ do stran s tím že je pevně spojena s ocelovou výztuhou. To způsobuje zvětšující se vyboulení elementu směrem od středu ložiska. Na okraji výztuhy je vyboulení největší a na hranách výztuh největší deformace a napětí.

12.4 Analýza upraveného ložiska 2

Ve výsledcích je ložisko označeno jako: Ložisko bez děr 11.



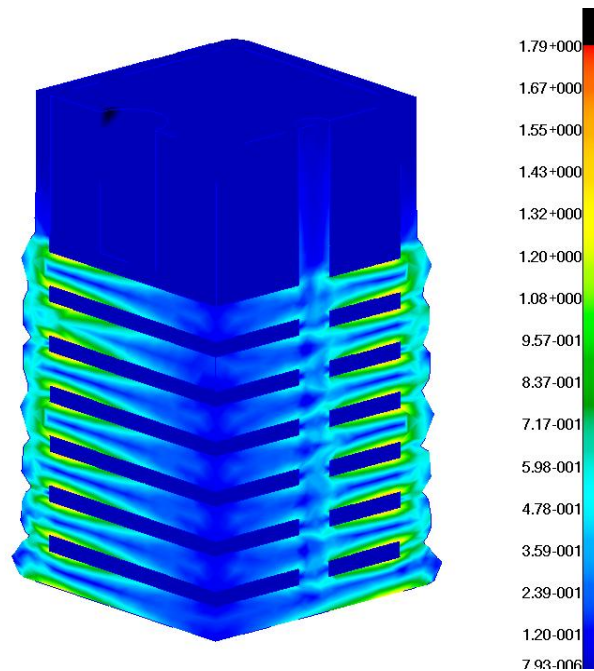
Obr. 40. Poměrná deformace návrhu 2.



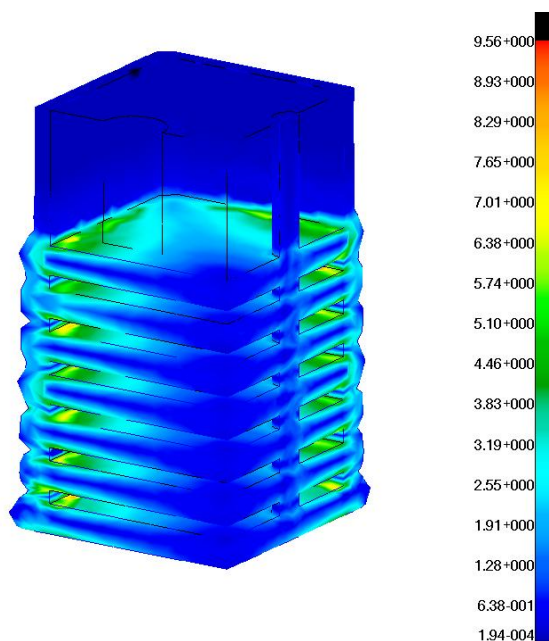
Obr. 41. Von Misesovo napětí pryže návrhu 2.

12.5 Analýza původního tvaru s výplní

Otvory vzniklé po centrovacích tyčích vzniknou technologií výroby a mají velmi negativní vliv na koncentraci napětí a celkovou únosnost ložiska. Bylo navrženo vzniklé otvory vyplnit materiálem a to pryží o stejných vlastnostech jaký je již použit u tohoto ložiska. Výplň je pevně spojena s okolní pryží a s kovovými výztuhy.



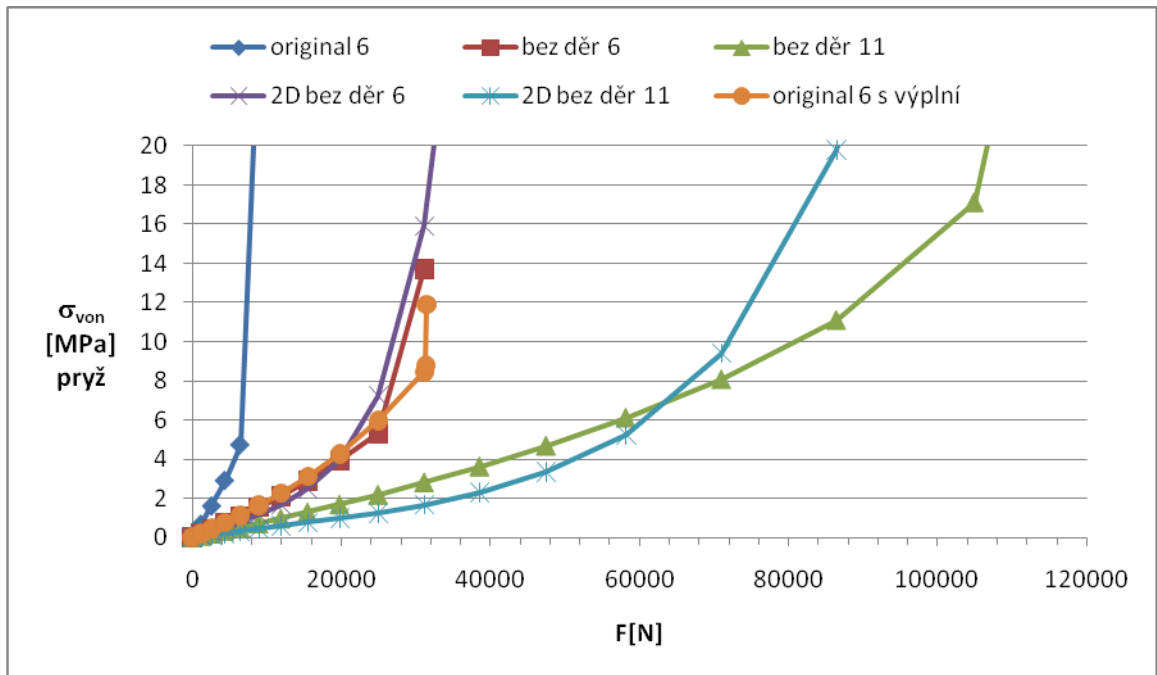
Obr. 42. Poměrná deformace návrhu s výplní.



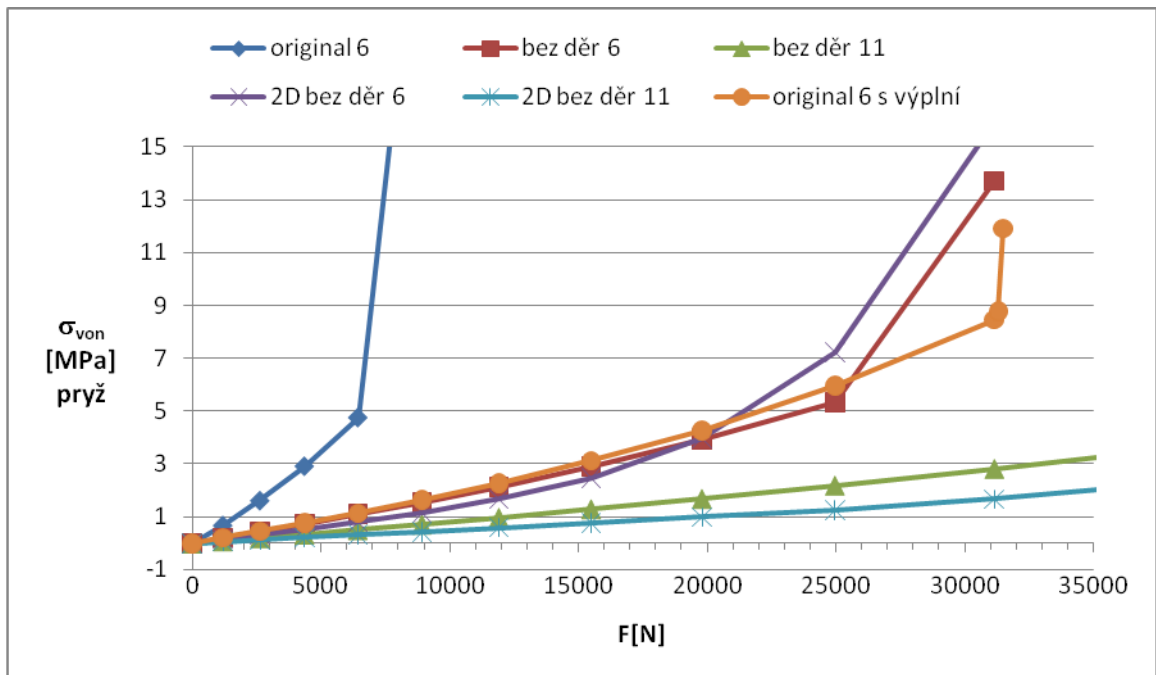
Obr. 43. Von Misesovo napětí pryže návrhu s výplní.

12.6 Srovnání výsledků analýz

Z výsledků analýzy byl sestaven graf závislosti napětí v pryži na postupném zatěžování ložiska.



Obr. 44. Grafický průběh Von Misesova napětí pryže při zatížení svislou silou.



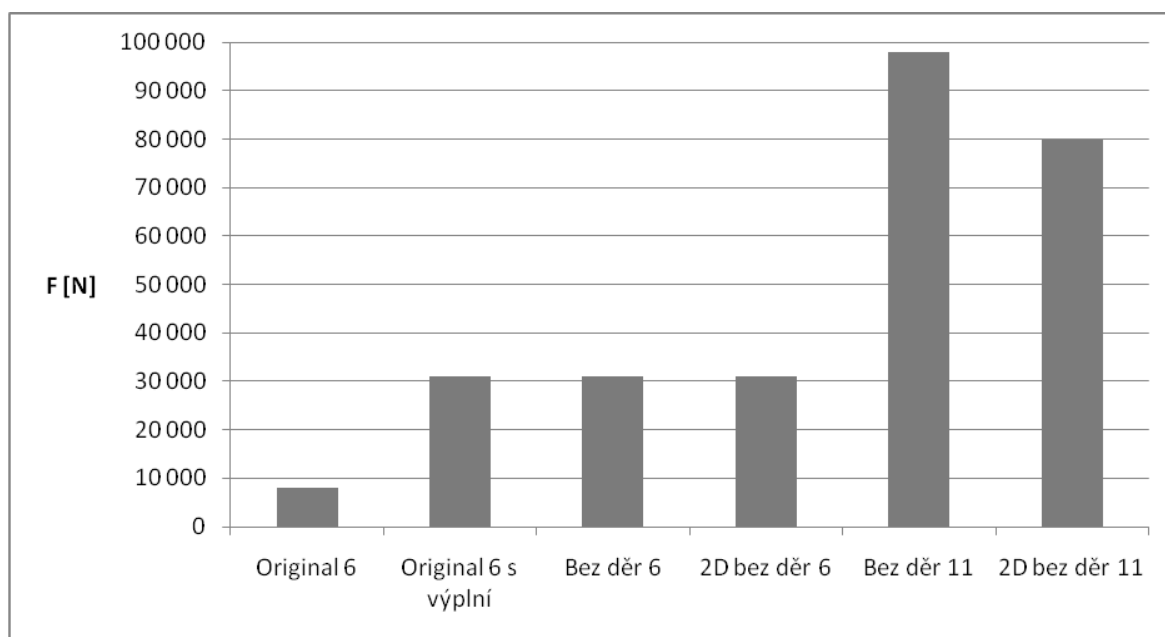
Obr. 45. Grafický průběh Von Misesova napětí pryže při zatížení svislou silou, detail.

Byla sestavena tabulka, kde bylo zvoleno porovnávací napětí v pryži, z grafu vyčteno zatížení ložiska a poté spočítáno poměrné zvýšení únosnosti oproti původnímu tvaru ložiska.

Tab. 5. Srovnání výsledků analýzy při zatížení svislou silou.

Model ložiska	Porovnávací napětí v pryži σ_{von} [MPa]	Velikost zatížení F [N]	Poměrné zvýšení únosnosti [-]
Original 6	15	8 000	1
Original 6 s výplní	15	31 000	3,88
Bez děr 6	15	31 000	3,88
2D bez děr 6	15	31 000	3,88
Bez děr 11	15	98 000	12,25
2D bez děr 11	15	80 000	10

Z výsledků byl sestaven sloupcový srovnávací graf.



Obr. 46. Grafické srovnání výsledků při zatížení svislou silou.

Ložisko bylo zatíženo svislou silou při čemž se sledovala deformace a napětí v pryži. Z výsledků analýz vyplývá že původní tvar ložiska má při tomto zatížení nejmenší únosnost. Je to způsobeno otvory které jsou v pryžokovovém bloku a které způsobují koncentraci napětí. Původní ložisko je v grafu označeno jako *Original 6*.

Úpravou tvaru původního ložiska a to odstraněním děr se únosnost zvětšila 3,88 krát. Z výsledku vyplývá že otvory velmi snižují únosnost ložiska. Úpravené ložisko je označeno názvem *Bez děr 6*. Dále z grafu můžeme vyčíst že výsledek 3D a 2D analýzy ložiska *Bez děr 6* se shodují.

Výsledky analýzy původního ložiska, kde jsou otvory vyplněny pryží, byly porovnány s výsledky původního ložiska *Original 6* a s ložiskem *Bez děr 6*. Z výsledků vyplývá že při vyplnění otvorů pryží se únosnost ložiska výrazně zvětšila. Je to proto že výplň zabraňuje vyboulení pryže v okolí děr. Dále můžeme z grafu vyčíst že vyplněním děr se velikost napětí v pryži blíží hodnotě napětí ložiska *Bez děr 6*. Z toho lze usoudit že tato úprava ložiska je z hlediska velikosti napětí dostatečná.

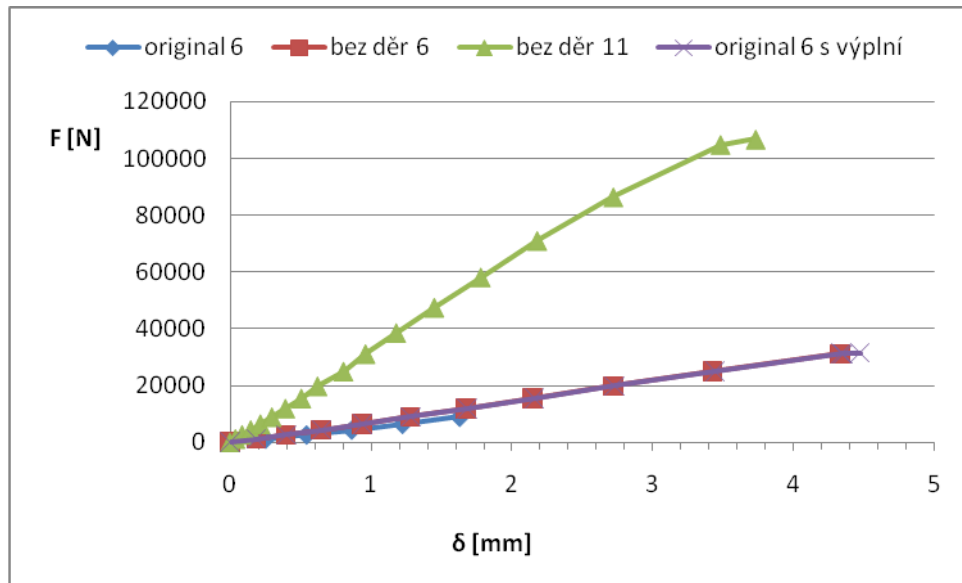
Další úpravou tvaru ložiska bylo přidání výztuh a to z počtu šesti na jedenáct, toto ložisko je označeno jako *Bez děr 11*. Z výsledků vyplývá že odstraněním děr a přidáním výztuh se únosnost ložiska zvětší. Dále ale můžeme z grafu vyčíst že 2D a 3D analýzy ložiska *Bez děr 11* se rozcházejí. To může být způsobeno nepřesností výsledků 2D analýzy kde 2D model přesně neodpovídá 3D modelu.

Zvýsledků analýz byla sestavena charakteristika elastomerového ložiska při zatížení svislou silou. Charakteristika popisuje chování ložiska při zatěžování a je to závislost zatížení ložiska na posunutí. Z těchto výsledků můžeme také určit tuhost ložiska. Tuhost ložisek při zatížení svislou silou se určí pomocí vztahu:

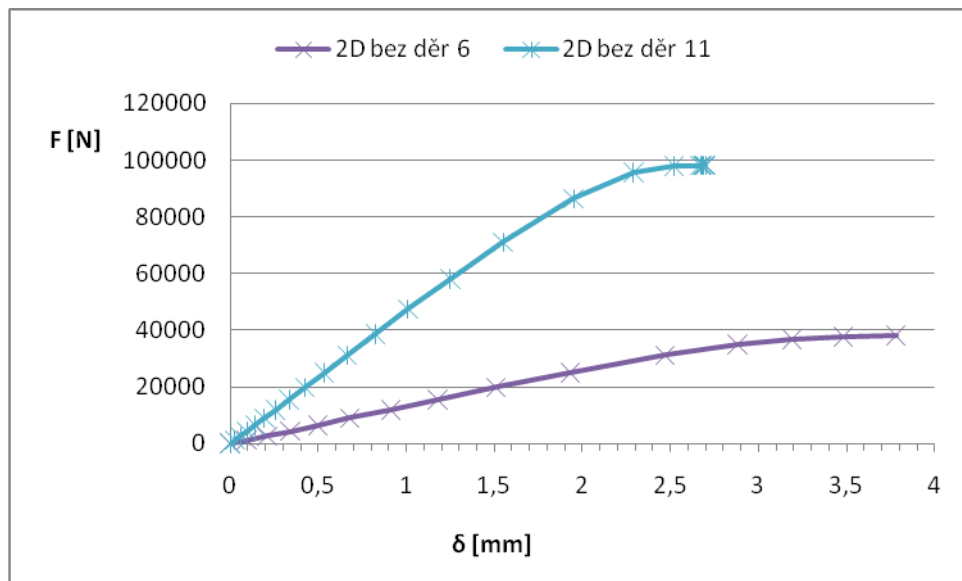
$$k = \frac{F}{\delta}$$

kde k [N/mm] je konstanta značící tuhost, F [N] je síla působící kolmo na ložisko a δ [mm] je velikost posunutí.

Z výsledků analýzy byl sestaven graf závislosti zatížení na posunutí ložiska.



Obr. 47. Charakteristiky ložisek při zatížení svislou silou 3D analýz.



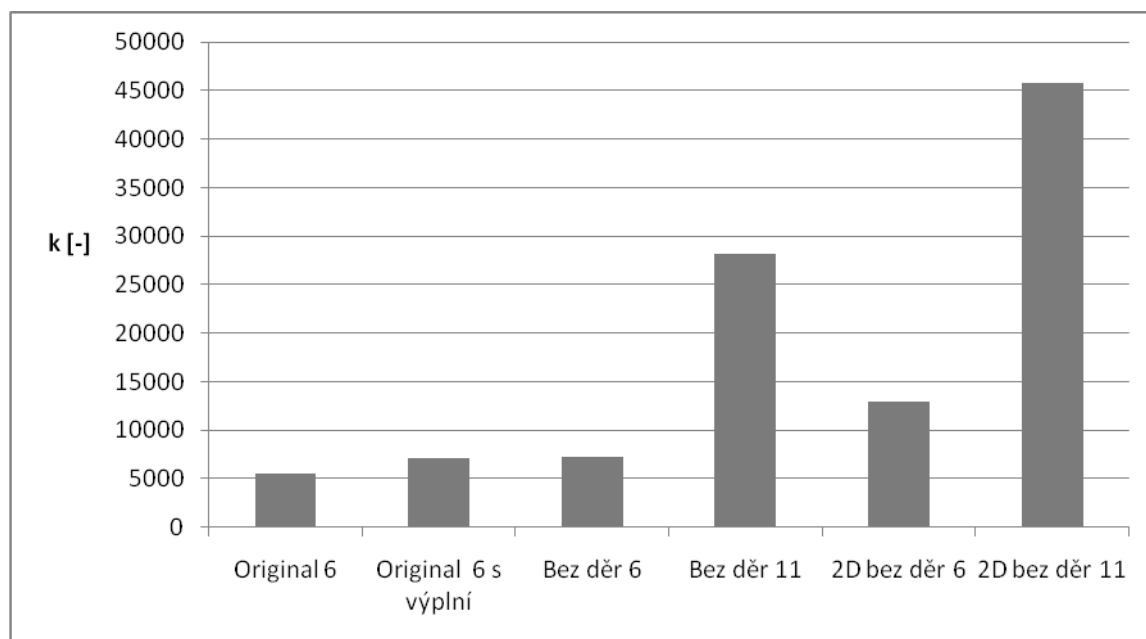
Obr. 48. Charakteristiky ložisek při zatížení svislou silou 2D analýz.

Byla sestavena tabulka, kde byla spočítána tuhost ložisek jednotlivých návrhů.

Tab. 6. Srovnání tuhosti ložisek při zatížení svislou silou.

Model ložiska	Zatížení F [N]	Svislé posunutí δ [mm]	Tuhost k [-]	Poměrné zvýšení tuhosti [-]
Original 6	8930,4	1,631	5475	1
Original 6 s výplní	31489,2	4,47	7044	1,29
Bez děr 6	31150,8	4,329	7195	1,31
Bez děr 11	106917,6	3,8	28136	5,14
2D bez děr 6	24958,8	1,93	12932	2,36
2D bez děr 11	71035	1,55	45829	8,34

Z výsledků byl sestaven sloupcový srovnávací graf.



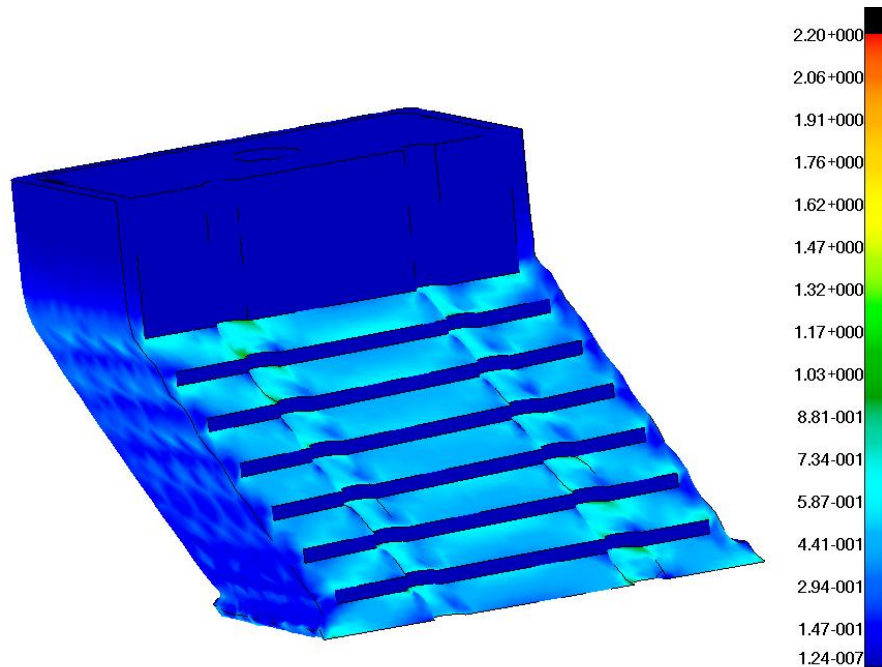
Obr. 49. Grafické srovnání tuhostí ložisek při zatížení svislou silou.

Z grafů charakteristik je zřejmé že závislost je převážně lineární. Pouze na konci se snižuje tuhost ložiska. Toto snížení je ale už v oblasti kdy zatížení je příliš velké a tudíž by se výrazně překročilo povolené napětí v pryži. Takže lze říci že charakteristika je v provozní oblasti lineární.

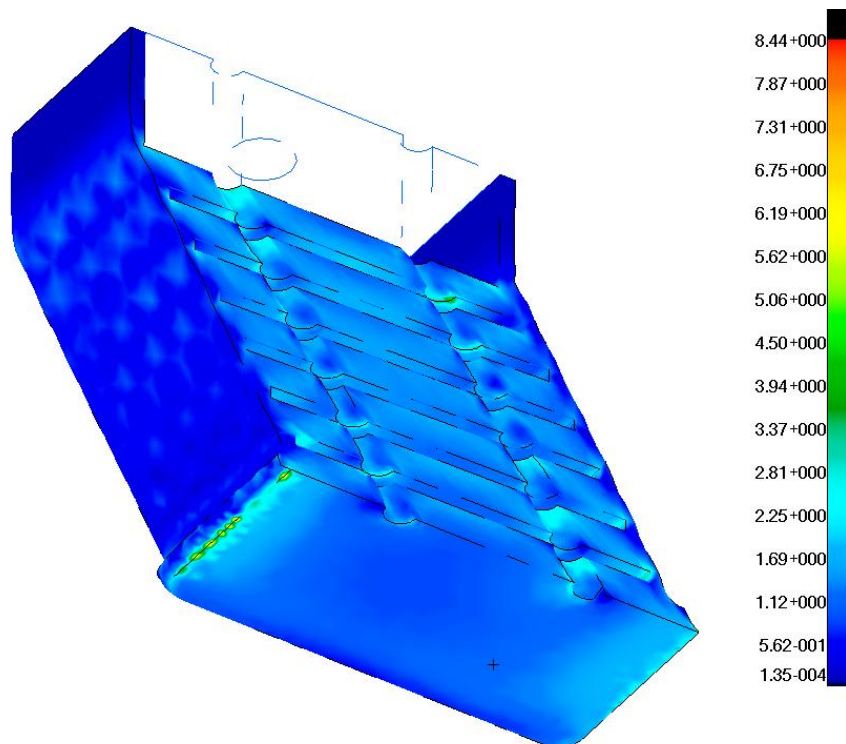
Z vynesných grafů charakteristik ložisek lze vyčíst že odstraněním děr u původního ložiska se charakteristika mírně změnila a to zvýšením tuhosti 1,31 krát. Z toho vyplývá že otvory snižují tuhost ložiska při zatížení svislou silou. Původní ložisko a ložisko kde jsme vyplnily otvory pryží mají téměř shodnou charakteristiku. Dále lze vyčíst že přidáním výztuh se tuhost ložiska při svislém zatížení zvýšila výrazně.

13 ANALÝZY ZATÍŽENÍ LOŽISKA POSUNUTÍM

13.1 Analýza původního tvaru ložiska

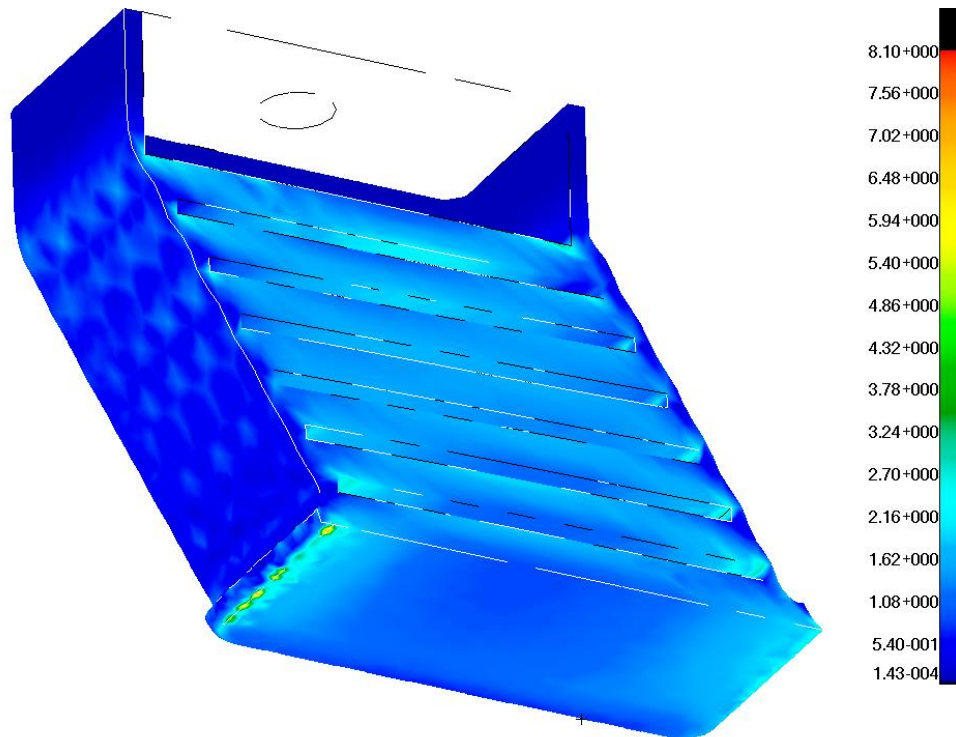


Obr. 50. Poměrná deformace původního ložiska.

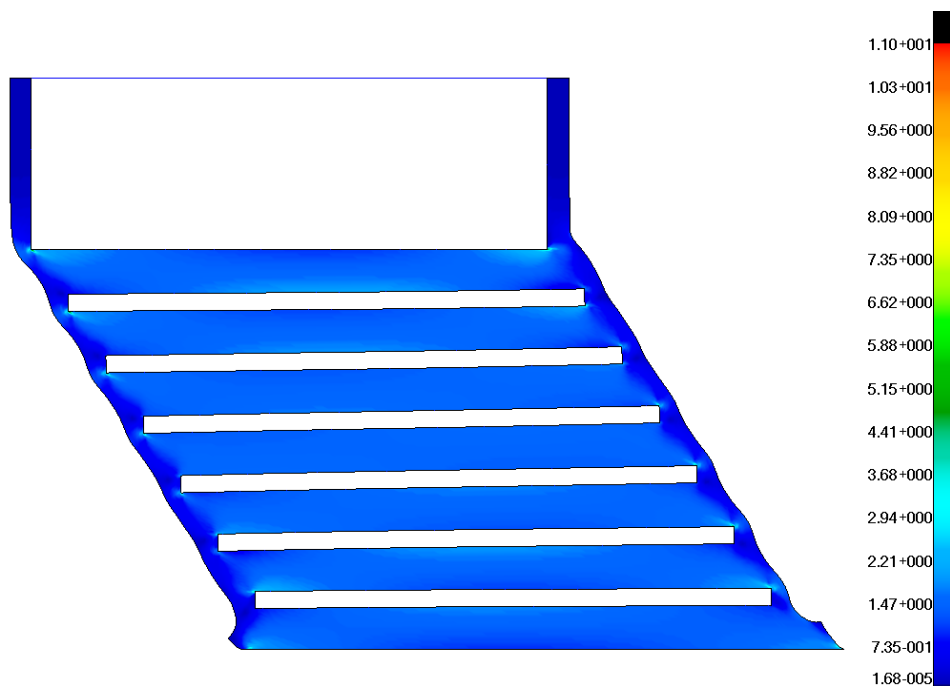


Obr. 51. Von Misesovo napětí pryže původního ložiska.

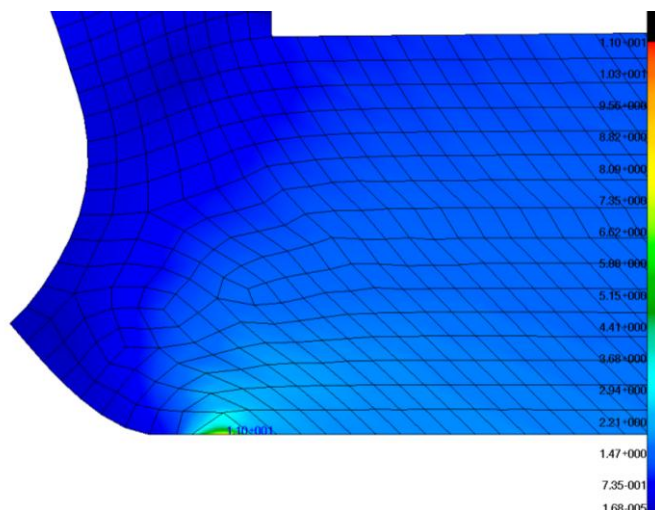
13.2 Analýza upraveného tvaru ložiska 1



Obr. 52. Von Misesovo napětí pryže návrhu 1.

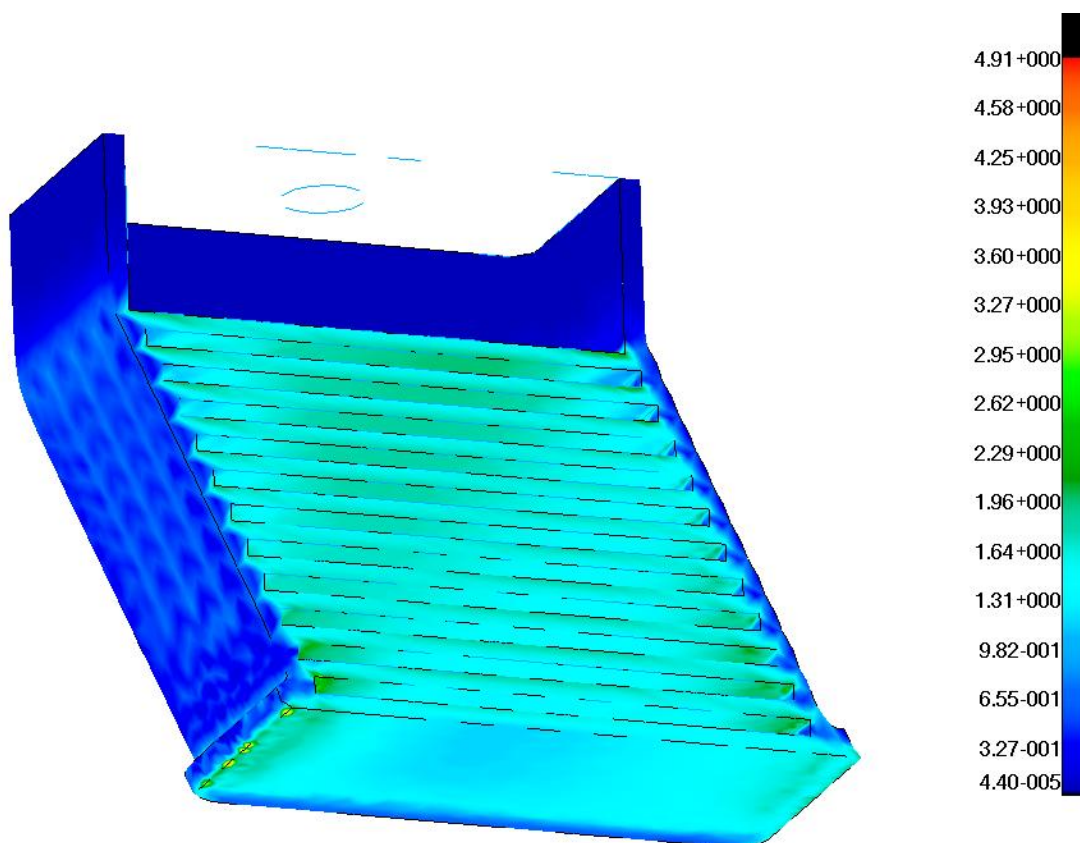


Obr. 53. Von Misesovo napětí pryže 2D analýzy návrhu 1.



Obr. 54. Von Misesovo napětí pryže 2D analýzy, detail.

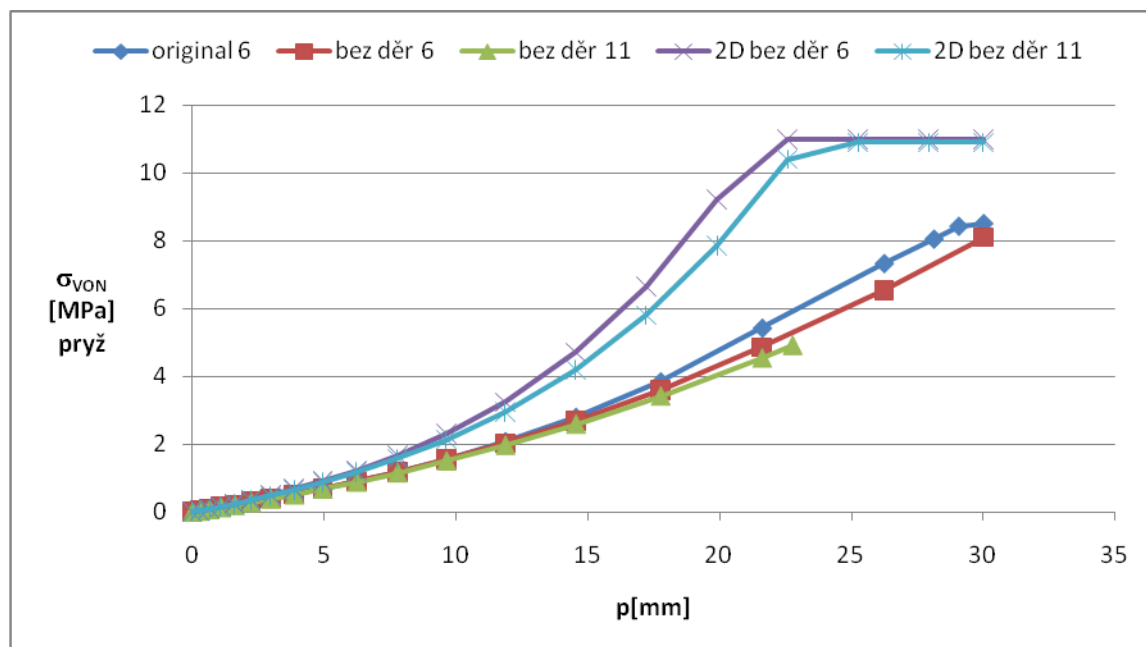
13.3 Analýza upraveného tvaru ložiska 2



Obr. 55. Von Misesovo napětí pryže návrhu 2.

13.4 Srovnání výsledků analýz

Z výsledků analýzy byl sestaven graf závislosti napětí v pryži na velikosti posunutí horní spojovací desky.



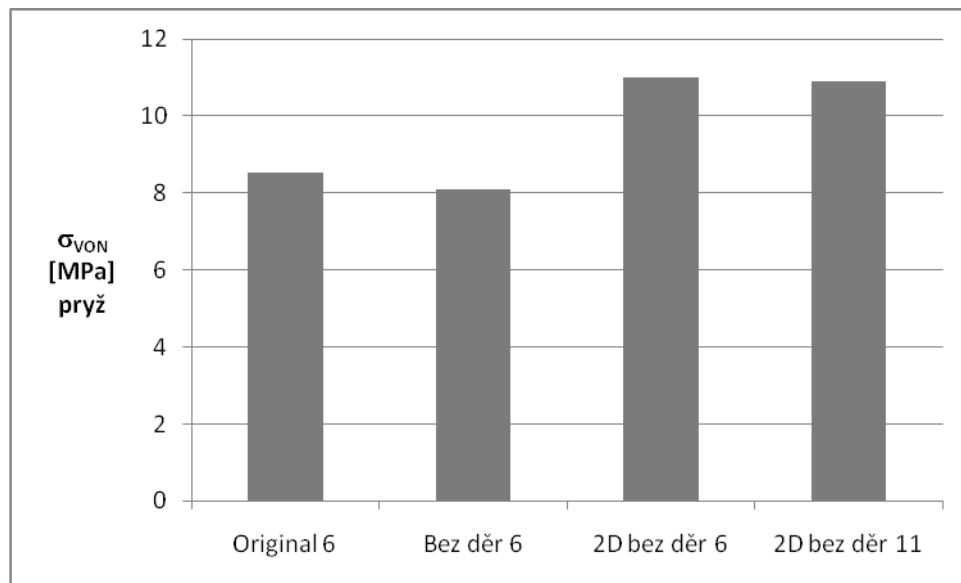
Obr. 56. Grafický průběh Von Misesova napětí pryže při zatížení posunutím.

Byla sestavena tabulka, kde se srovnává velikost napětí v pryži.

Tab. 7. Srovnání Von Misesova napětí pryže při zatížení posunutím.

Model ložiska	Posunutí p [mm]	napětí v pryži σ _{von} [MPa]	Poměrné srovnání napětí [-]
Original 6	30	8,52	1
Bez děr 6	30	8,1	0,95
Bez děr 11	22,8	4,91	-
2D bez děr 6	30	11	1,29
2D bez děr 11	30	10,9	1,28

Z výsledků byl sestaven srovnávací sloupcový graf velikosti napětí.

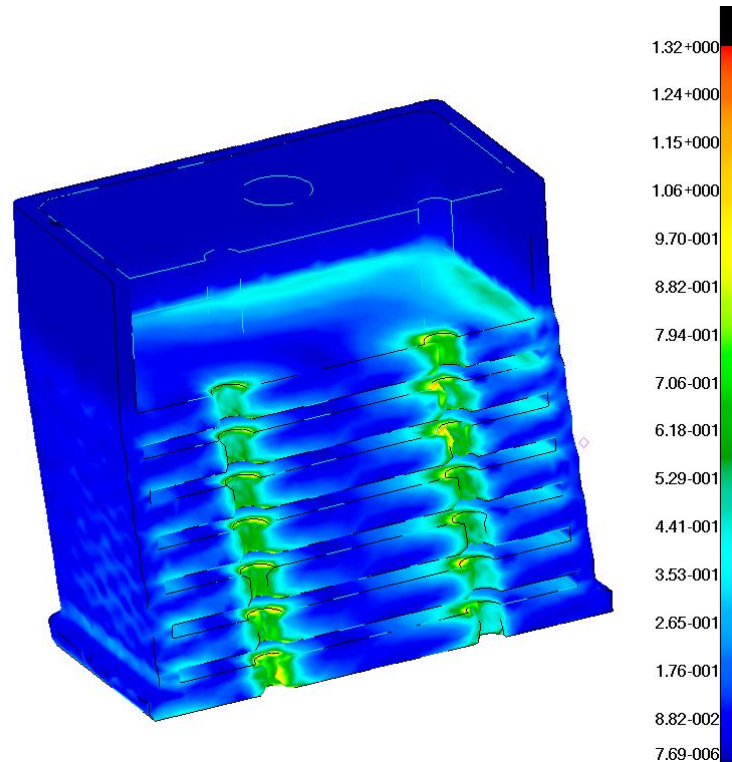


Obr. 57. Grafické srovnání Von Misesova napětí při bočním posunutím.

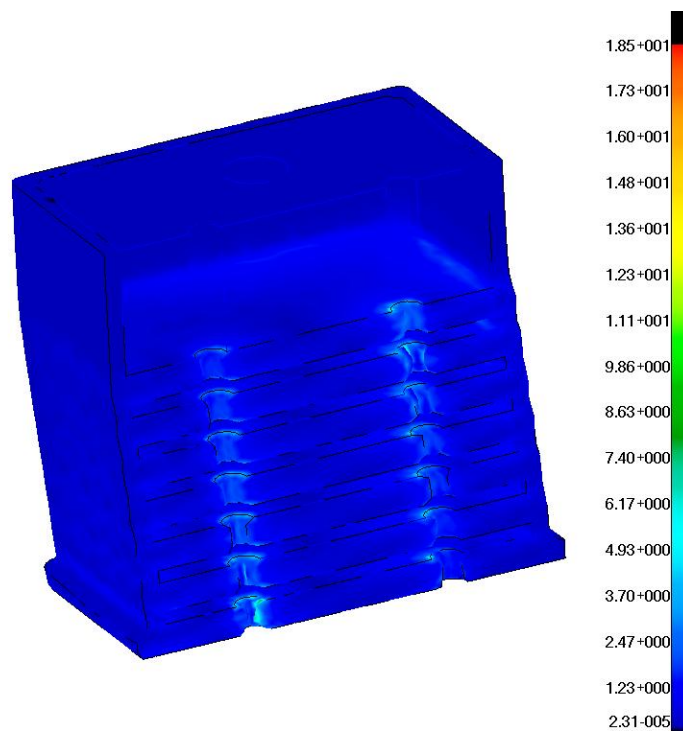
Jednotlivé modely byly zatíženy posunutím horní upínací desky o 30 mm. U analýzy ložiska *Bez děr 11* analýza skončila předčasně, proto nemáme výsledky při plném posunu ale jen u posunutí max o 22,8 mm. Z grafu ale můžeme vyčíst že velikost napětí se změnou tvaru jednotlivých modelů ložisek mění minimálně. Jsou pouze rozdíly mezi výsledky 2D a 3D analýzy. To může být způsobeno tím, že 2D model přesně neodpovídá skutečnému 3D modelu. Z výsledků také vyplývá že místo koncentrace napětí je stejné a to na kraji bloku v místě uchycení na ocelovou dosedací desku. V tomto místě se může objevit trhání pryže nebo separování pryže od ocelové dosedací desky.

14 ANALÝZY ZATÍŽENÍ LOŽISKA ŠIKMOU SILOU A POSUNUTÍM

14.1 Analýza původního tvaru ložiska

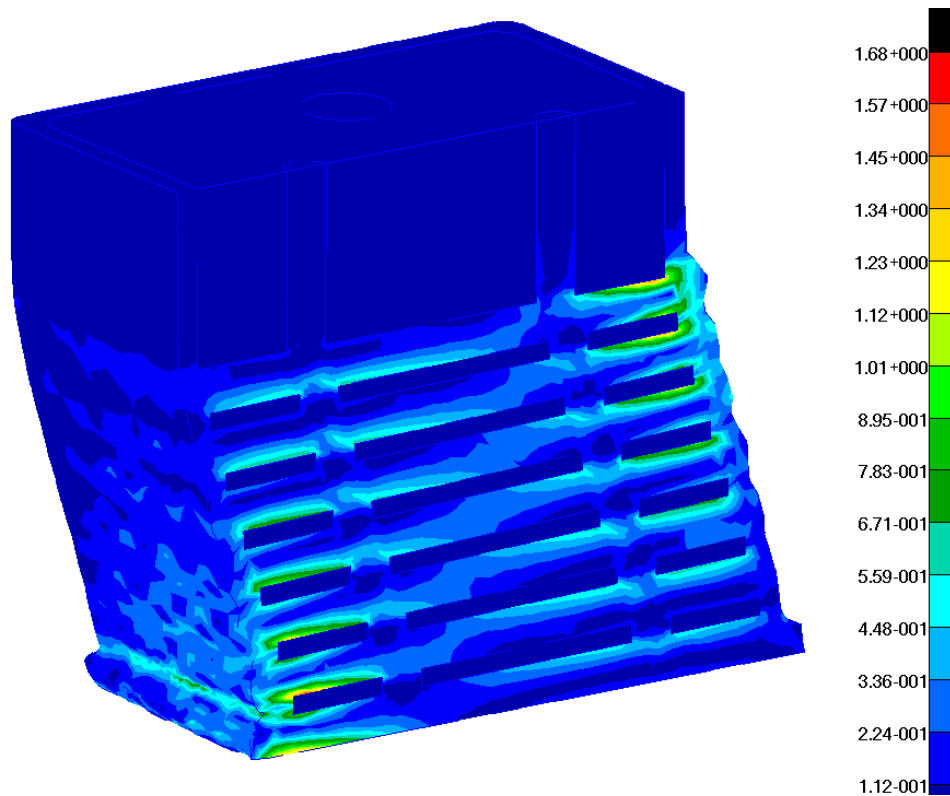


Obr. 58. Poměrná deformace pryže původního ložiska.

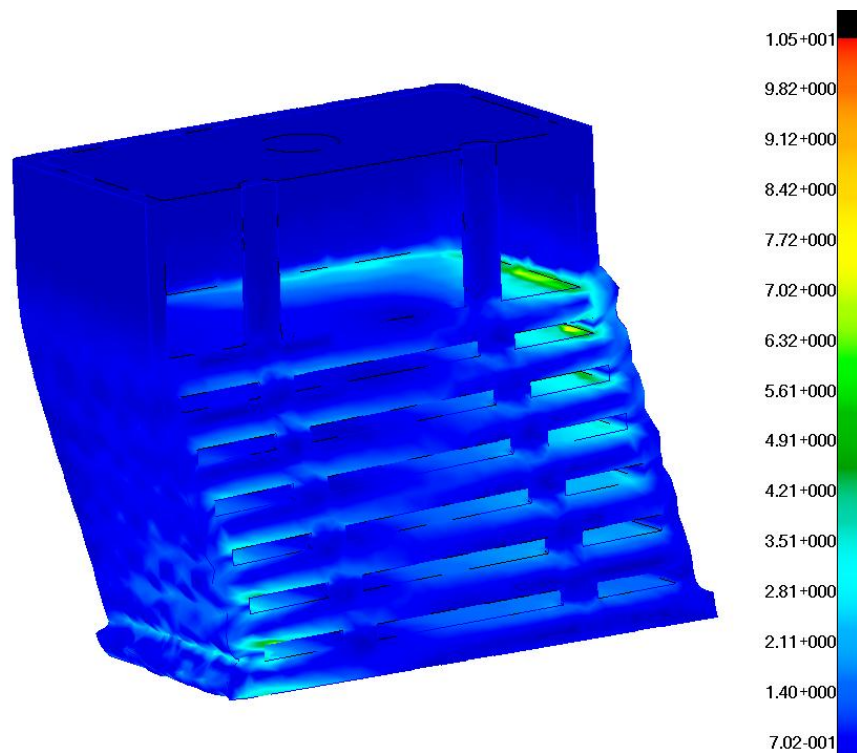


Obr. 59. Von Misesovo napětí pryže původního ložiska.

14.2 Analýza původního tvaru ložiska s výplní

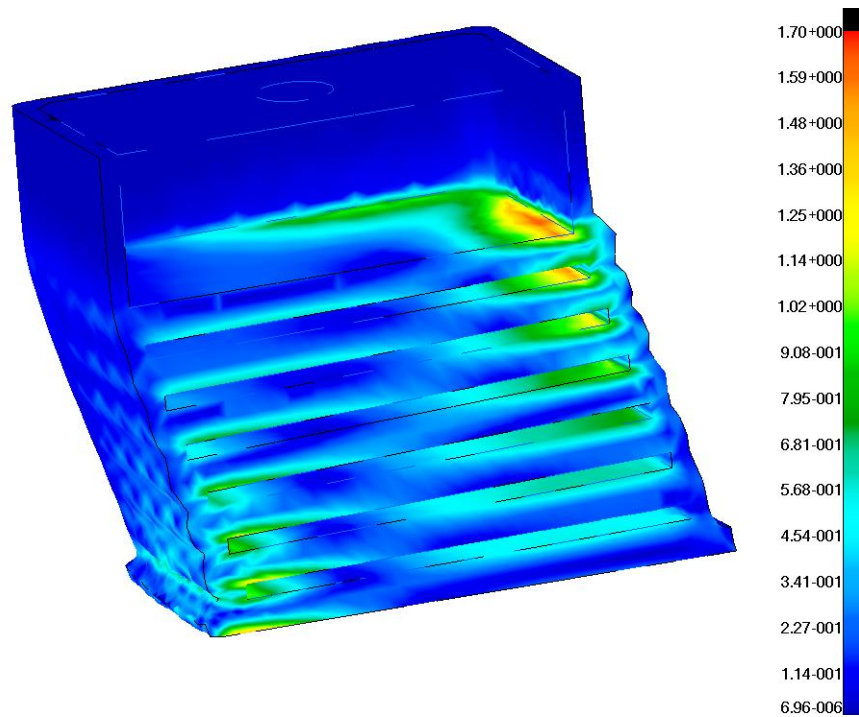


Obr. 60. Poměrná deformace návrhu s výplní.

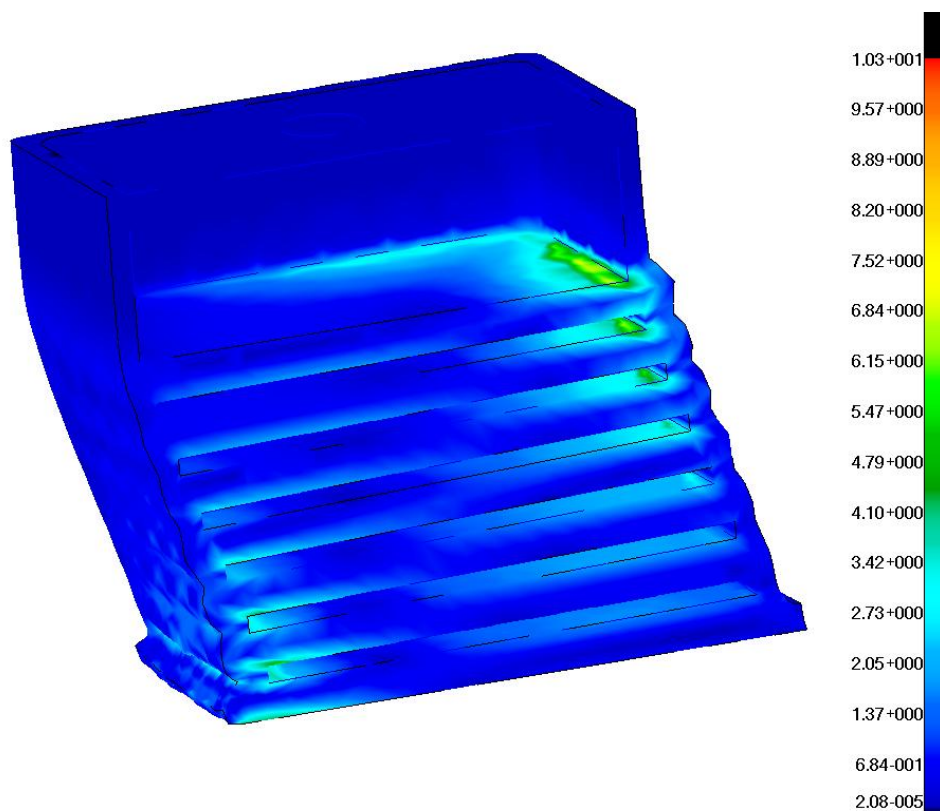


Obr. 61. Von Misesovo napětí pryže původního návrhu s výplní.

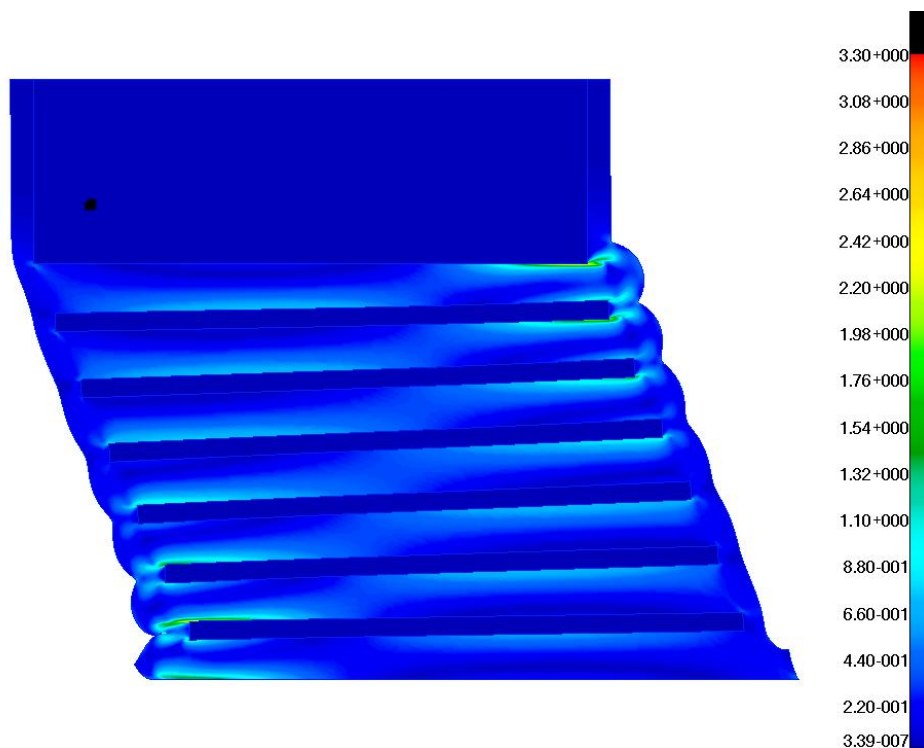
14.3 Analýza upraveného tvaru ložiska 1



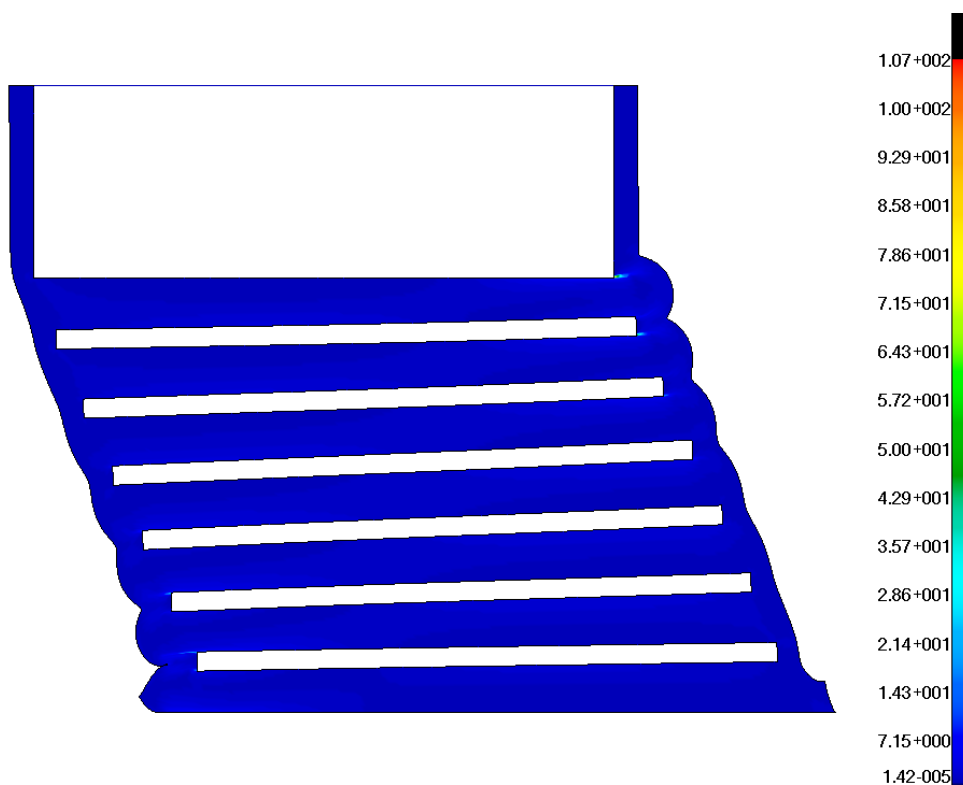
Obr. 62. Poměrná deformace pryže návrhu 1.



Obr. 63. Von Misesovo napětí pryže návrhu 1.

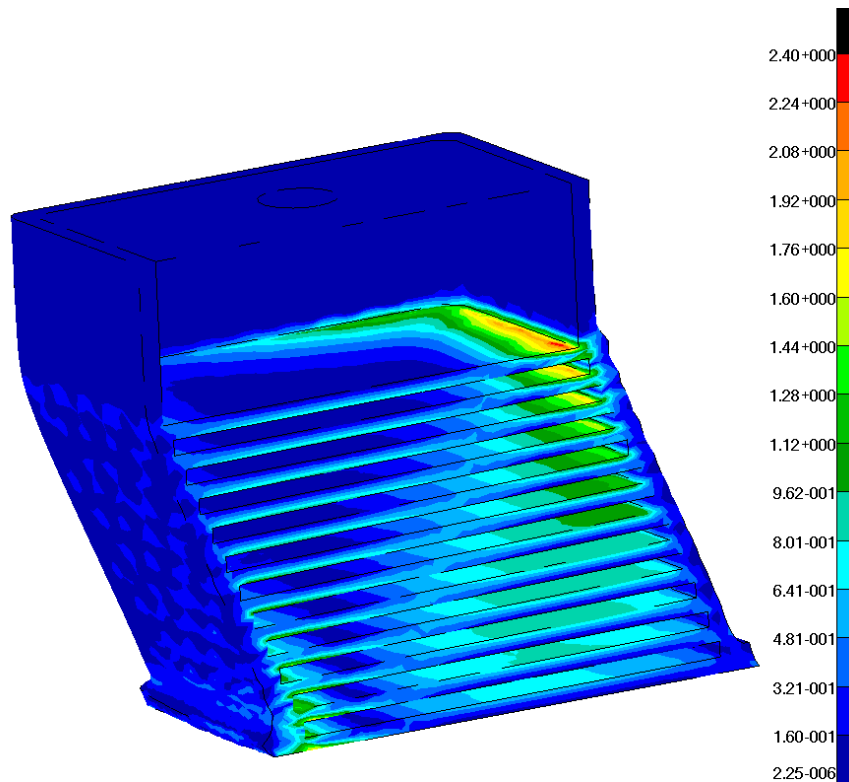


Obr. 64. Poměrná deformace 2D analýzy návrhu 1.

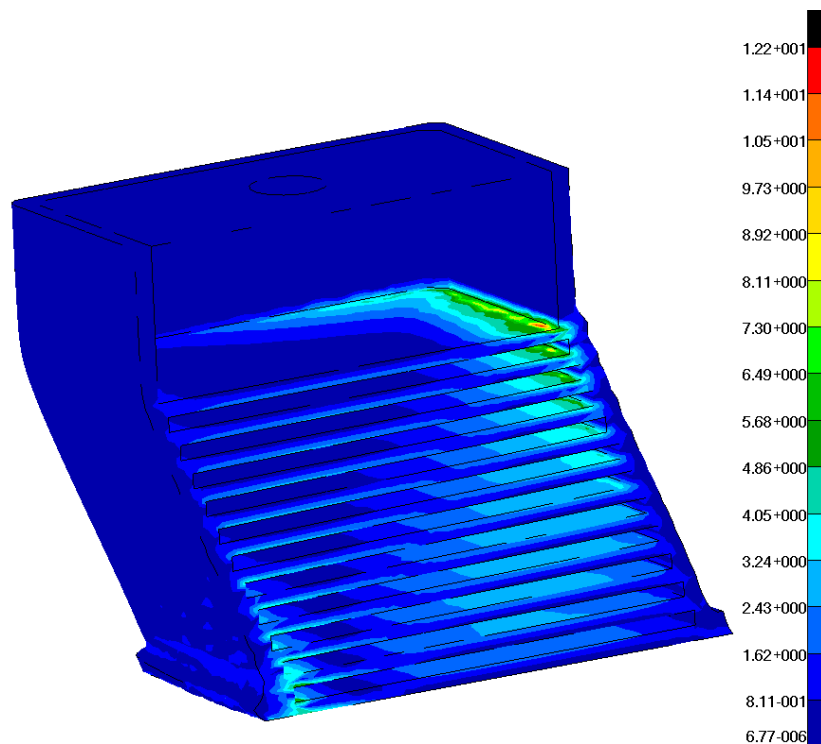


Obr. 65. Von Misesovo napětí pryže 2D analýzy návrhu 1.

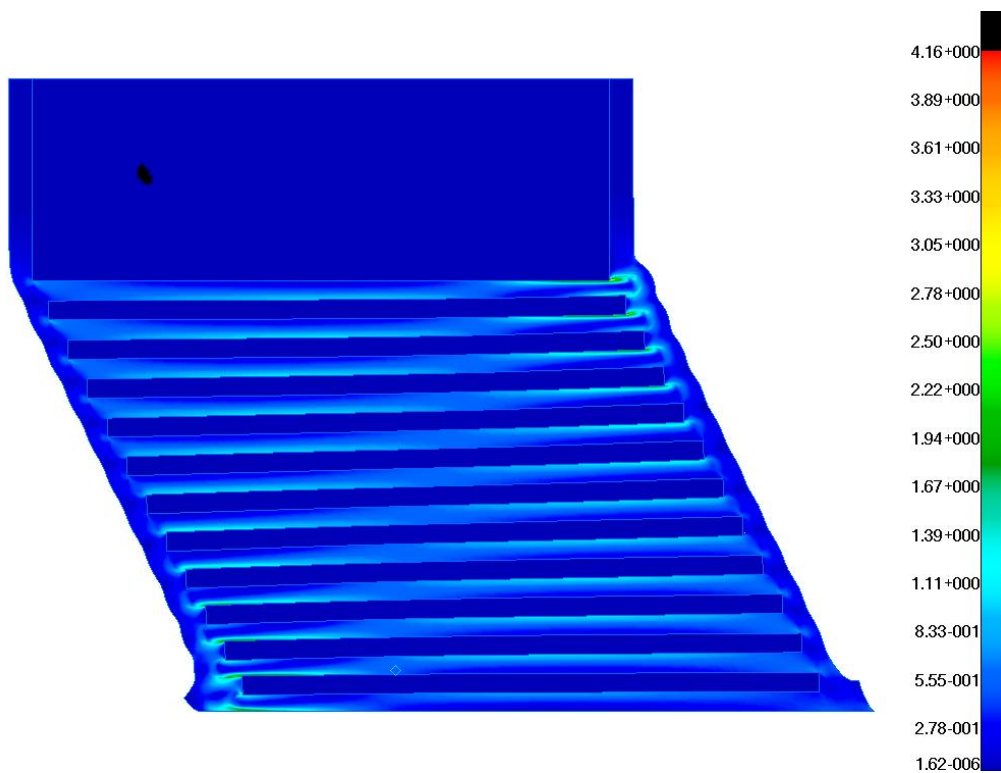
14.4 Analýza upraveného tvaru ložiska 2



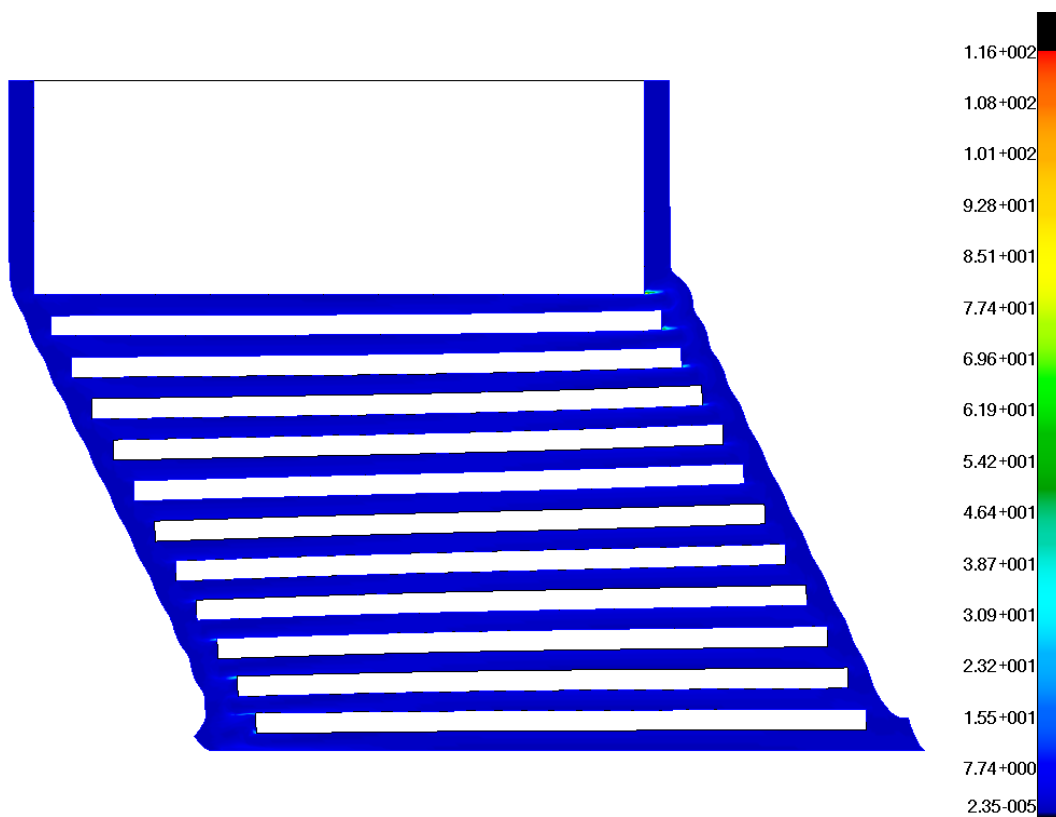
Obr. 66. Poměrná deformace pryže návrhu 2.



Obr. 67. Von Misesovo napětí pryže návrhu 2.

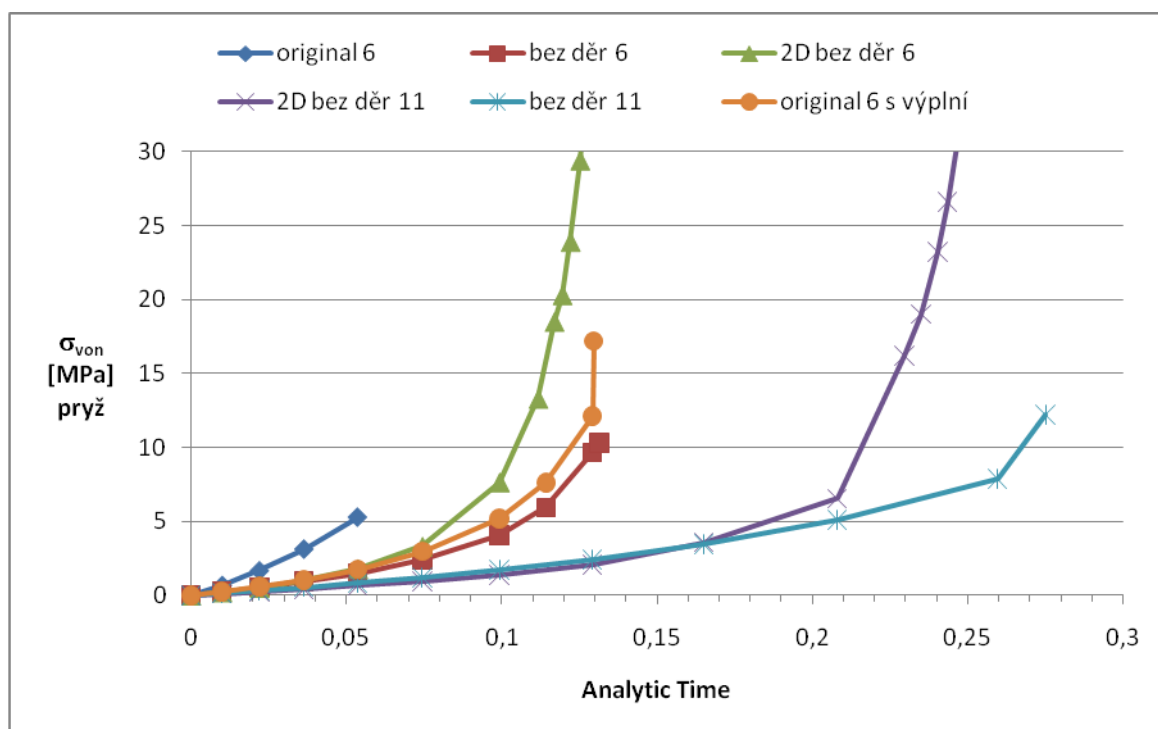


Obr. 68. Poměrná deformace 2D analýzy návrhu 2.



Obr. 69. Von Misesovo napětí pryže 2D analýzy návrhu 2.

Z výsledků analýzy byl sestaven graf závislosti napětí v pryži na postupném zatěžování ložiska.



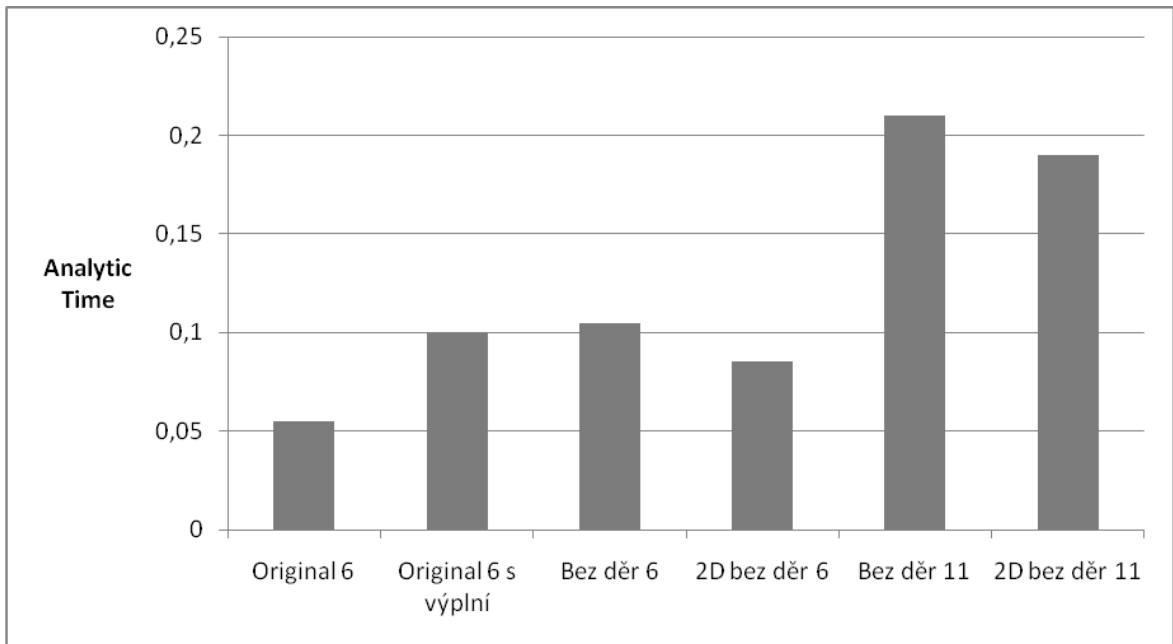
Obr. 70. Grafický průběh Von Misesova napětí pryže.

Byla sestavena tabulka, kde bylo zvoleno porovnávací napětí v pryži, z grafu vyčteno zatížení ložiska a poté spočítáno poměrné zvýšení únosnosti oproti původnímu tvaru ložiska.

Tab. 8. Srovnání Von Misesova napětí pryže při zatížení šikmou silou a posunutím.

Model ložiska	Porovnávací napětí v pryži σ_{von} [MPa]	Analytic Time [-]	Poměrné zvýšení únosnosti [-]
Original 6	5	0,055	1
Original 6 s výplní	5	0,1	1,818
Bez děr 6	5	0,105	1,909
2D bez děr 6	5	0,085	1,545
Bez děr 11	5	0,21	3,818
2D bez děr 11	5	0,19	3,455

Z výsledků byl sestaven sloupcový srovnávací graf.



Obr. 71. Grafické srovnání Von Misesova napětí pryže.

Ložisko bylo zatěžováno šikmou silou o velikosti vertikální složky $F_v = 120\,000\text{N}$ a horizontální složky $F_h = 7\,500\text{N}$ směřující ve směru posunutí. Dále na ložisko působí posunutí horní spojovací desky do strany o velikosti $p = 30\text{ mm}$.

V analýzách byla sledována deformace a napětí v pryži. Z výsledků vyplývá že při vyplnění otvorů pryží se únosnost ložiska výrazně zvětšila. Je to proto že výplň zabraňuje vyboulení pryže v okolí děr. Dále můžeme z grafu vyčíst že vyplněním děr se velikost napětí v pryži blíží hodnotě napětí ložiska *Bez děr 6*. Z toho lze usoudit že tato úprava ložiska je z hlediska velikosti napětí dostatečná.

Úpravou tvaru původního ložiska *Original 6* a to odstraněním děr se únosnost zvětšila 1,9 krát. Ložisko lišící se od původního tvaru pouze odstraněním děr je označeno jako *Bez děr 6*. Po-té přidáním výztuh z 6 na 11 se únosnost zvětšila 3,8 krát oproti původnímu tvaru, toto ložisko je označeno jako *Bez děr 11*.

ZÁVĚR

Cílem této práce bylo provést numerickou analýzu používaného ložiska, upravit tvar ložiska a zanalyzovat upravený tvar. První úpravou tvaru bylo odstranění děr v bloku ložiska, které v ložisku zůstaly po vytažení centrovacích tyčí. Další úpravou bylo přidání ocelových výztuh. Dále se zkoumal vliv zaoblení hran výztuh na napětí a vliv vyplnění otvorů pryží na únosnost.

Návrhy byly zatěžovány svislou silou, posunutí horní spojovací desky, a kombinací posunutí desky a působení šikmé síly. Pro zadanou sílu analýzy neproběhly do konce z důvodu velké deformace elementů. Z velikosti napětí lze ale říci že zadaná síla je značně větší než síla dovolená.

Z analýzy původního ložiska bylo zjištěno, že otvory v pryžokovovém bloku způsobují koncentraci napětí. Největší napětí je na okrajích děr u kovových výztuh, kde otvory vytvořily volný prostor pro vyboulení pryže. Proto byla navržena úprava a to vyplnění děr stejnou pryží jaká je u ložiska již použita. Dále byla provedena analýza ložiska bez těchto děr, kde se zkoumalo, jak velký vliv mají tyto otvory na velikost napětí v pryži. Tyto úpravy vyžadují změnu v technologii výroby a to přidání další operace, kterou se vyplní otvory pryží. Dále návrh bez děr vyžaduje komplexně zvolit jinou technologii výroby, kde nebude třeba centrovat výztuhy pomocí centrovacích tyčí. Z výsledků těchto analýz bylo zjištěno, že otvory snižují únosnost výrazně. Vyplněním děr pryží se napětí blíží napětím v ložisku bez děr. Z toho lze usoudit, že úprava ložiska vyplněním děr je dostatečná.

Podle rozložení napětí a deformace pryže při zatížení ložiska svislou silou se dá předpovědět, že by byl vhodnější válcový tvar ložiska. U válcového tvaru bude vzdálenost okraje výztuhy od středu ložiska stejná a také stejné napětí po celém obvodu ložiska. Dále nebude záležet, z jaké strany bude působit síla a posunutí, protože vlastnosti budou po celém obvodu stejné. Pro ověření této úvahy by bylo potřeba provést analýzu válcového tvaru ložiska.

Při zkoumání vlivu zaoblených hran kovových výztuh bylo zjištěno, že zaoblená hrana nemá podstatný vliv na velikost napětí na okrajích ocelových výztuh. Koncentrace napětí na okrajích výztuh není způsobena ostrou hranou ale charakterem deformace pryže.

Další úpravou bylo přidání výztuh do tělesa ložiska. Z analýz bylo zjištěno, že přidáním výztuh se zvýší únosnost ložiska, ale změní se charakteristika při zatížení svíslou silou a to tak že ložisko bude ve svíslém směru tužší. Zvýšení tuhosti se shoduje z teorií pryžokových pružin. Tento návrh má větší tuhost a únosnost pouze ve svíslém směru, při horizontálním zatížení má ložisko stejné vlastnosti jako původní. Z tohoto důvodu by měla síla působit kolmo na horní plochu. Při šikmé síle by horizontální složka této síly mohla způsobit značné posunutí a překročení dovoleného napětí v pryži.

Při analýzách posunutí horní spojovací desky v horizontálním směru bylo zjištěno, že koncentrace napětí u všech návrhů je na okraji spoje pryžokového bloku k dosedací desce ložiska.

Závěry z analýz lze shrnout do bodů:

- otvory v pryžokovovém bloku velmi snižují výslednou únosnost ložiska
- vyplněním děr v původním ložisku pryží se zvětší únosnost ložiska a blíží se únosnosti ložiska bez děr
- největší deformace a napětí pryže se objevují na hranách ocelových výztuh
- ostrá nebo zaoblená hrana nemá podstatný vliv na velikosti napětí v okolí hran výztuh
- přidáním výztuh se únosnost zvětšuje
- přidáním výztuh se tuhost ve svíslém směru zvětšuje
- při posunutí horní spojovací desky ložiska je největší koncentrace napětí ve spoji pryže s dosedací deskou

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] DUCHÁČEK, V. *Polymery – výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. 2.vyd. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2006. 280s. ISBN 80-7080-617-6.
- [2] ŠPAČEK, J. *Technologie gumárenská a plastikářská II*. Brno: VUT, 1986. 200 s. ISBN 414 – 33759.
- [3] ŠŮLA, Miroslav. *Pojení pryže s kovem*. Zlín : Česká společnost průmyslové chemie, místní pobočka Gumárenská skupina Zlín, 2007. 63 s. ISBN 978-80-02-01934-3.
- [4] PANÁČEK, Josef . *Betonové mosty I : Modul M03 Spodní stavba a příslušenství mostních objektů* [online]. Brno : Vysoké učení technické v Brně fakulta stavební, 2006 [cit. 2010-11-27]. Dostupné z WWW: <http://vyuka.spsslipnik.cz/NEMEC/Typologie/BL12-Betonove_mosty_I--M03-Spodni_stavba_a_prislusenstvi_mostnich_objektu.pdf>.
- [5] DVOŘÁK, Zdeněk; JAVOŘÍK, Jakub. *Konstrukce výrobků konstrukční materiály elastomerní a formy pro jejich výrobu* [online]. Zlín : Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně Fakulta technologická, 2009 [cit. 2010-12-17]. Dostupné z WWW: <http://www.ft.utb.cz/czech/uvi/czech/staff/dvorak/elektronickepodpory/pdf/T9K_SV_konstrukni_materialy_elastomerni.pdf>.
- [6] DVOŘÁK, Zdeněk. *Zpracovatelské procesy gumárenské : pro konstrukční směry* [online]. Zlín : Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně Fakulta technologická, 2009 [cit. 2010-12-17]. Dostupné z WWW: <http://www.ft.utb.cz/czech/uvi/czech/staff/dvorak/elektronickepodpory/pdf/T8ZP_G_zpracovatelske_procesy_gumarenske.pdf>.
- [7] STANTON, John F., et al. *NCHRP Report 596 : Rotation Limits for Elastomeric Bearings* [online]. Washington, D.C. : Transportation Research Board, 2008 [cit. 2010-11-21]. Dostupné z WWW: <http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/nchrp/nchrp_rpt_596.pdf>.
- [8] ŠUBA, Oldřich. *Dimenzování a navrhování výrobků z polymerů*. Zlín : Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2007. 105 s. ISBN 978-80-7318-431-5.

- [9] N. GENT, Alan. *Engineering with Rubber : How to Design Rubber Components*. 2nd Edition. Munich : Hanser Publishers, 2001. ISBN 1-56990-299-2.
- [9] MSC.SOFTWARE CORPORATION. *Nonlinear finite element analysis of elastomers*. [online]. MSC.Software Corporation. 2000. Dostupné na WWW: <http://www.mscsoftware.com/assets/103_elast_paper.pdf>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

FEM	finite element method.
MPK	metoda konečných prvků.
NR	přírodní kaučuk
IR	izoprenový kaučuk
SBR	butadienstyrenový kaučuk
BR	butadienový kaučuk
EPDM	ethylenpropylenový kaučuk
IIR	butylkaučuk
CR	chloroprenový kaučuk
NBR	butadienakrylonitrilový kaučuk
ACM	akrylátový kaučuk
OT	polysulfidový kaučuk
MQ	silikonový kaučuk
EPM	fluoroulíkový kaučuk
HSR	vysokostyrenový kaučuk
FC	fluorokaučuk
UV	ultrafialové záření
dsk	dílo na sto kaučuku
σ	napětí [MPa]
ε	poměrná deformace
W	deformační energie [$\text{J}\cdot\text{m}^{-3}$]
I_i	invariant tenzoru deformace
λ_i	poměrné protažení [%]
S_{ij}	tenzor napětí

C_{ij}	deformační tenzor
p	tlak [MPa]
n	počet polymerních řetězců
k	Boltzmanova konstanta [$J \cdot K^{-1}$]
T	absolutní teplota [K]
c_{ij}	materiálová konstanta
E	modul pružnosti [MPa]
K	objemový modul pružnosti [MPa]
F	síla [N]
k	tuhost pružiny [$N \cdot m^{-1}$]
δ	posunutí pružiny [m]
τ	smykové napětí [MPa]
G	modul pružnosti ve smyku [MPa]
γ	smykové přetvoření
S	plocha [m^2]
f	tvarový faktor
ϕ	tvarová funkce
ν	poissonova konstanta
σ_{von}	Von Misesovo srovnávací napětí [MPa]
p	posunutí horní spojovací desky dané okrajovou podmínkou [m]
F_y	vertikální složka síly [N]
F_h	horizontální složka síly [N]
x	výsledné posunutí horní spojovací desky [m]
Tet 10	3D element čtyřstěn s deseti uzlovými body
Quad 4	2D obdélníkový element se čtyřmi uzlovými body

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1. Základní rozdělení polymerů.....	13
Obr. 2. Závislost napětí a deformace při zatěžování elastomerů.....	37
Obr. 3. Jednoosý tah.	45
Obr. 4. dvouosý tah a čistý smyk.	45
Obr. 5. Metoda dvouosého tahu pomocí nafouknutí vzorku.	45
Obr. 6. Metoda dvouosého namáhání pomocí tahu ve dvou kolmých osách.	46
Obr. 7. Metoda dvouosého namáhání pomocí radiálního tahu.	46
Obr. 8. Charakteristika pružiny.....	47
Obr. 9. Uspořádání pružin vedle sebe.....	47
Obr. 10. Uspořádání pružin za sebou.....	48
Obr. 11. Efekt ohýbání.....	49
Obr. 12. Pružina namáhaná smykem.	50
Obr. 13. Konstrukční úprava smykové pružiny.	50
Obr. 14. Pružina namáhaná smykem, smykové napětí XY.[8].....	51
Obr. 15. Pružina namáhaná smykem, tahové napětí ve směru Y.[8].....	51
Obr. 16. Pružina namáhaná smykem, von misesovo napětí.[8].....	51
Obr. 17. Tlaková pružina.	52
Obr. 18. Pružina namáhaná tlakem, smykové napětí XY.[8].....	53
Obr. 19. Pružina namáhaná tlakem, von misesovo napětí.[8].....	53
Obr. 20. Pružina typu dlouhý pás.....	56
Obr. 21. Vícevrstvá pružina.	56
Obr. 22. Pružina bez výztuh a s výztuhou, zatížení tlakem.	58
Obr. 23. Pružina bez výztuh a s výztuhou, zatížení posunutím.	58
Obr. 24. Různé případy deformace elastomerového ložiska.	58
Obr. 25. Elastomerového ložisko.....	61
Obr. 26. Původní tvar elastomerového ložiska.	62
Obr. 27. Úprava tvaru 2.	63
Obr. 28. Síť a okrajové podmínky pro zatížení šikmou silou a posunutím.	67
Obr. 29. Síť a okrajové podmínky pro zatížení svislou silou.	68
Obr. 30. Síť a okrajové podmínky pro zatížení posunutím.....	69
Obr. 31. Síť a okrajové podmínky pro 2D analýzu.....	70

Obr. 32. Poměrná deformace původního tvaru.....	71
Obr. 33. Poměrná deformace návrhu 1.....	72
Obr. 34. Von Misesovo napětí návrhu 1.....	72
Obr. 35. Von Misesovo napětí při malém zatížení.....	73
Obr. 36. Von Misesovo napětí (levý obrázek) a poměrná deformace (pravý obrázek) kolem ostré hrany.....	73
Obr. 37. Von Misesovo napětí (levý obrázek) a poměrná deformace (pravý obrázek) kolem zaoblení.....	74
Obr. 38. Grafický průběh Von Misesova napětí pryže při ostrých a zaoblených hran.....	74
Obr. 39. Grafické srovnání vlivu zaoblené a ostré hrany.....	75
Obr. 40. Poměrná deformace návrhu 2.....	76
Obr. 41. Von Misesovo napětí pryže návrhu 2.....	76
Obr. 42. Poměrná deformace návrhu s výplní.....	77
Obr. 43. Von Misesovo napětí pryže návrhu s výplní.....	77
Obr. 44. Grafický průběh Von Misesova napětí pryže při zatížení svislou silou.....	78
Obr. 45. Grafický průběh Von Misesova napětí pryže při zatížení svislou silou, detail.....	78
Obr. 46. Grafické srovnání výsledků při zatížení svislou silou.....	79
Obr. 47. Charakteristiky ložisek při zatížení svislou silou 3D analýz.....	81
Obr. 48. Charakteristiky ložisek při zatížení svislou silou 2D analýz.....	81
Obr. 49. Grafické srovnání tuhostí ložisek při zatížení svislou silou.....	82
Obr. 50. Poměrná deformace původního ložiska.....	84
Obr. 51. Von Misesovo napětí pryže původního ložiska.....	84
Obr. 52. Von Misesovo napětí pryže návrhu 1.....	85
Obr. 53. Von Misesovo napětí pryže 2D analýzy návrhu 1.....	85
Obr. 54. Von Misesovo napětí pryže 2D analýzy, detail.....	86
Obr. 55. Von Misesovo napětí pryže návrhu 2.....	86
Obr. 56. Grafický průběh Von Misesova napětí pryže při zatížení posunutím.....	87
Obr. 57. Grafické srovnání Von Misesova napětí při bočním posunutím.....	88
Obr. 58. Poměrná deformace pryže původního ložiska.....	89
Obr. 59. Von Misesovo napětí pryže původního ložiska.....	89
Obr. 60. Poměrná deformace návrhu s výplní.....	90

Obr. 61. Von Misesovo napětí pryže původního návrhu s výplní.	90
Obr. 62. Poměrná deformace pryže návrhu 1.	91
Obr. 63. Von Misesovo napětí pryže návrhu 1.	91
Obr. 64. Poměrná deformace 2D analýzy návrhu 1.	92
Obr. 65. Von Misesovo napětí pryže 2D analýzy návrhu 1.	92
Obr. 66. Poměrná deformace pryže návrhu 2.	93
Obr. 67. Von Misesovo napětí pryže návrhu 2.	93
Obr. 68. Poměrná deformace 2D analýzy návrhu 2.	94
Obr. 69. Von Misesovo napětí pryže 2D analýzy návrhu 2.	94
Obr. 70. Grafický průběh Von Misesova napětí pryže.	95
Obr. 71. Grafické srovnání Von Misesova napětí pryže.	96

SEZNAM TABULEK

Tab. 1. Mezinárodní klasifikace kaučuků do základních skupin.....	15
Tab. 2. Zkratky a relativní spotřeba nejběžněji používaných kaučuků.	16
Tab. 3. Nejběžnější kaučuky a příklady použití.....	17
Tab. 4. Srovnání výsledků analýzy vlivu ostré a zaoblené hrany.	75
Tab. 5. Srovnání výsledků analýzy při zatížení svislou silou.	79
Tab. 6. Srovnání tuhosti ložisek při zatížení svislou silou.....	82
Tab. 7. Srovnání Von Misesova napětí pryže při zatížení posunutím.	87
Tab. 8. Srovnání Von Misesova napětí pryže při zatížení šikmou silou a posunutím.....	95

SEZNAM PŘÍLOH

PI Výkresová dokumentace

- výkresy jednotlivých ložisek

PII: DVD disk obsahující

- textovou část diplomové práce
- výkresy ložisek ve formátu .pdf
- 3D modely ložisek a výkresy v programu CATIA V5R18
- výsledky analýz v programu MSC.Patran 2010, MSC.Marc, ve formátu .t16
- grafy a tabulky v programu Excel ve formátu .xlsx
- 3D modely v programu MSC.Patran 2010 ve formátu .db