

Numerická analýza zkoušky opotřebení elastomeru

Bc. Tomáš Hlavačka

Diplomová práce
2010/2011



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. Tomáš HLAVAČKA**
Osobní číslo: **T09686**
Studijní program: **N 3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Konstrukce technologických zařízení**

Téma práce: **Numerická analýza zkoušky opotřebení elastomeru**

Zásady pro vypracování:

- Vypracujte literární přehled
- Zvolte vhodnou metodiku analýzy
- Proveďte numerickou analýzu zkoušky opotřebení
- Vyhodnoťte výsledky analýzy

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

Dle doporučení vedoucího DP

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Jakub Javořík, Ph.D.

Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce:

14. února 2011

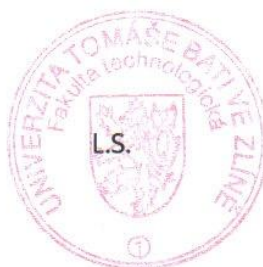
Termín odevzdání diplomové práce:

13. května 2011

Ve Zlíně dne 6. ledna 2011



doc. Ing. Petr Hlaváček, CSc.
děkan



doc. Ing. Miroslav Maňas, CSc.
ředitel ústavu

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

.....

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 přihlédne k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

ABSTRAKT

Cílem této diplomové práce je numerická analýza zkoušky opotřebení elastomeru. Teoretická část je zaměřena na výrobu elastomerů. Dále na vlastnosti hyperelastických materiálů, popis hyperelastických modelů a měření jejich konstant.

V praktické části je popis nastavení analýzy. Vyhodnocení výsledků analýz a vyhodnocení vlivu koeficientu tření na napětí.

Klíčová slova: Hyperelasticita, MSC. Marc, MSC. Patran, hyperelastické modely, kontakt, metoda konečných prvků

ABSTRACT

The aim of this thesis is a numerical analysis of the wear test of elastomer. The theoretical part focuses on the production of elastomers. Further, the properties of hyperelastic materials, description hyperelastic models and measurements of their constants.

The practical part is a description of the analysis settings. Evaluation of the analytical results and evaluate the the impact of stress on the coefficient of friction.

Keywords: Hyperelasticity, MSC. Marc, MSC. Patran, hyperelastic models, contact, finite element method

Chtěl bych poděkovat svému vedoucímu diplomové práce ing. Jakubu Javoříkovi Ph.D., za poskytnutí cenných rad a vedení během psaní diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat ing. Davidu Maňasovi Ph.D. za poskytnutí materiálů, týkajících se zkoušky opotřebení elastomeru.

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

OBSAH

ÚVOD	11
I TEORETICKÁ ČÁST	12
1 ELASTOMERY	13
1.1 HISTORIE.....	13
1.2 PŘÍRODNÍ KAUČUK	14
1.3 SYNTETICKÝ KAUČUK	15
1.4 PŘÍSAKY V KAUČUKOVÉ SMĚSI.....	16
1.4.1 Plniva.....	16
1.4.2 Antioxidanty.....	16
1.4.3 Změkčovadla	17
1.4.4 Vulkanizační činidla.....	17
1.4.5 Urychlovače vulkanizace	17
1.4.6 Retardéry vulkanizace	17
1.4.7 Nadouvadla	17
2 VLASTNOSTI ELASTOMERŮ	18
3 ELASTICITA ELASTOMERŮ	20
3.1 MALÁ DEFORMACE – HOOKŮV ZÁKON V OBJEMOVÉM STAVU (STLAČITELNOST).....	20
3.2 HUSTOTA DEFORMAČNÍ ENERGIE – MALÉ DEFORMACE.....	22
4 HYPERELASTICITA ELASTOMERŮ	24
5 HYPERELASTICKÉ MODELY	26
5.1 FENOMENOLOGICKÉ MODELY.....	27
5.1.1 Polynomický model	27
5.1.2 Yeoh	27
5.1.3 Mooney-Rivlin	28
5.1.4 Ogden	29
5.2 MECHANICKÉ MODELY	29
5.2.1 Neo-Hookean	29
5.2.2 Arruda-Boyce.....	30
5.3 KOMBINACE FENOMENOLOGICKÉHO A MECHANICKÉHO MODELU	30
5.3.1 Gent	30
6 STANOVENÍ MATERIÁLOVÝCH KONSTANT PRO HYPERELASTICKÉ MODELY	31
6.1 ZKOUŠKA JEDNOOSÝM TAHEM	31
6.2 ZKOUŠKA DVOUOSÝM TAHEM	32
6.3 ZKOUŠKA ČISTÝM SMYKEM.....	34
7 RYCHLÝ TEST OPOTŘEBENÍ	35
7.1 TESTOVACÍ ZAŘÍZENÍ PRO RYCHLÝ TEST OPOTŘEBENÍ.....	35
7.2 ROZMĚRY ZKUŠEBNÍHO TĚLESA	36
7.3 PODMÍNKY EXPERIMENTU	37
II PRAKTICKÁ ČÁST	38
8 STANOVENÍ CÍLŮ DIPLOMOVÉ PRÁCE	39

9	ANALÝZA KONEČNÝCH PRVKŮ (FEA)	40
9.1	MSC PATRAN.....	40
10	METODA KONEČNÝCH PRVKŮ (FEM)	41
10.1	ŘEŠENÉ OBLASTI	41
10.1.1	Statické.....	41
10.1.2	Dynamické	41
11	VYTVOŘENÍ ANALÝZY FEM MODELU	42
12	PREPROCESSOR	43
12.1	GEOMETRICKÝ MODEL	43
12.2	MATERIÁLOVÉ MODEL Y	43
12.3	GEOMETRICKÉ VLASTNOSTI	43
12.4	TVORBA SÍTĚ	43
12.5	OKRAJOVÉ PODMÍNKY	44
13	VÝPOČET (SOLVER)	45
14	POSTPROCESSOR	47
15	NASTAVENÍ 2D ANALÝZY	48
15.1	ÚPRAVA GEOMETRIE BŘITU	48
15.2	GEOMETRIE 2D MODELU	48
15.3	MATERIÁLOVÉ VLASTNOSTI 2D MODELU	49
15.4	OKRAJOVÉ PODMÍNKY 2D MODELU	50
15.5	VYSÍTOVÁNÍ 2D MODELU	52
16	NASTAVENÍ 3D ANALÝZY	54
16.1	GEOMETRIE 3D MODELU	54
16.2	MATERIÁLOVÉ VLASTNOSTI 3D MODELU	55
16.3	OKRAJOVÉ PODMÍNKY 3D MODELU	55
16.4	VYSÍTOVÁNÍ 3D MODELU	57
17	2D ANALÝZA – VARIANTA 1	59
17.1	2D ANALÝZA BEZ KOEFICIENTU TŘENÍ– VARIANTA 1	59
17.2	2D ANALÝZA KOEFICIENT SMYKOVÉHO TŘENÍ 0,05– VARIANTA 1	60
17.3	2D ANALÝZA KOEFICIENT SMYKOVÉHO TŘENÍ 0,1– VARIANTA 1	60
17.4	2D ANALÝZA KOEFICIENT SMYKOVÉHO TŘENÍ 0,15 – VARIANTA 1.....	61
17.5	2D ANALÝZA KOEFICIENT SMYKOVÉHO TŘENÍ 0,2 – VARIANTA 1.....	61
17.6	2D ANALÝZA KOEFICIENT SMYKOVÉHO TŘENÍ 0,25 – VARIANTA 1.....	62
17.7	2D ANALÝZA KOEFICIENT SMYKOVÉHO TŘENÍ 0,3 – VARIANTA 1.....	62
17.8	2D ANALÝZA KOEFICIENT SMYKOVÉHO TŘENÍ 0,35 – VARIANTA 1.....	63
17.9	2D ANALÝZA KOEFICIENT SMYKOVÉHO TŘENÍ 0,4 – VARIANTA 1.....	63
18	VYHODNOCENÍ 2D ANALÝZY – VARIANTA 1	64
19	2D ANALÝZA – VARIANTA 2	66

19.1	2D ANALÝZA BEZ TŘENÍ – VARIANTA 2	66
19.2	2D ANALÝZA KOEFICIENT SMYKOVÉHO TŘENÍ 0,05 – VARIANTA 2.....	67
19.3	2D ANALÝZA KOEFICIENT SMYKOVÉHO TŘENÍ 0,1 – VARIANTA 2.....	68
19.4	2D ANALÝZA KOEFICIENT SMYKOVÉHO TŘENÍ 0,15 – VARIANTA 2.....	69
19.5	2D ANALÝZA KOEFICIENT SMYKOVÉHO TŘENÍ 0,2 – VARIANTA 2.....	70
19.6	2D ANALÝZA KOEFICIENT SMYKOVÉHO TŘENÍ 0,25 – VARIANTA 2.....	71
19.7	2D ANALÝZA KOEFICIENT SMYKOVÉHO TŘENÍ 0,3 – VARIANTA 2.....	72
19.8	2D ANALÝZA KOEFICIENT SMYKOVÉHO TŘENÍ 0,35 – VARIANTA 2.....	73
19.9	2D ANALÝZA KOEFICIENT SMYKOVÉHO TŘENÍ 0,4 – VARIANTA 2.....	74
20	VYHODNOCENÍ 2D ANALÝZY – VARIANTA 2.....	76
21	VYHODNOCENÍ 3D ANALÝZY	78
22	VYHODNOCENÍ ANALÝZ	80
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	82
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	83
	SEZNAM OBRÁZKŮ	84
	SEZNAM TABULEK.....	86

ÚVOD

Elastomery vznikají vulkanizací kaučukové směsi. Vulkanizace je děj, při kterém za působení tepla vznikají v kaučukové směsi pevné chemické vazby mezi jednotlivými řetězovými molekulami za pomoci vulkanizačních činidel. Základem kaučukové směsi je kaučuk, který může být buď přírodní, nebo syntetický. Přírodní kaučuk se získává z kaučukovníků. Dalšími složkami kaučukové směsi mohou být: plniva, vulkanizační činidla, urychlovače vulkanizace, antioxidanty, antiozonanty, změkčovadla, nadouvadla a pigmenty.

Elastomery patří mezi konstrukční materiály, které nacházejí široké uplatnění v mnoha odvětvích průmyslu, zejména při výrobě pneumatik. A proto je důležité dobře znát vlastnosti elastomeru z hlediska životnosti a spolehlivosti. Jedna ze zkoušek, která nám udává míru opotřebení elastomerního výrobku je rychlý test opotřebení.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 ELASTOMERY

Obecně lze elastomery považovat za vysoce kondenzované plyny, protože většina dílčích monomerů se vyskytuje v plynném skupenství. Při polymeraci se vytvářejí dlouhé řetězce molekul. Podle jejich molekulové struktury se dělí na amorfní, semikrystalická anebo krystalická. Elastomery jsou typické amorfní polymery s náhodným uspořádáním molekul. Krystalické polymery jsou tvrdé a křehké. Semikrystalické polymery vykazují pružné deformace, tok i plastické deformace. [1]

1.1 Historie

První zmínky o kaučuku se datují do období 15. století, kdy při objevení Ameriky, pozorovali námořníci domorodce, při hře s pružnou koulí. Američtí Indiáni k výrobě těchto míčů používali vyschlou tekutinu, vytékající z poraněných stromů, které nazývali “Hheve” (odtud dnes využívaný latinský název “Hevea”).

Kaučuk se poté začal používat na výrobu obuvi a nepromokavého plátna, ale vlastnosti těchto kaučukových výrobků nebyly uspokojivé. Jelikož v letních měsících tyto výrobky měkly a stávaly se lepivými a v zimních měsících křehly a tvrdly. Tyto nedostatky kaučukových výrobků byly vyřešeny objevem vulkanizace. Do Evropy se přírodní kaučuk dostává kolem roku 1736. K jeho využití dochází v roce 1791, při výrobě nepromokavých plachet a pytlů na přepravu pošty. V USA se snažil Charles Goodyears s Nathanielem Haywardem o zlepšení kvality kaučukových výrobků pomocí impregnace v roztoku síry. Vypracovali postup modifikace kaučuku založený na solarizačním procesu, který si nechal Hayward v roce 1839 patentovat. Ovšem zápach výrobků a tvrdnutí v chladném počasí tento patent prakticky znehodnotily.

Goodyear pokračoval ve výzkumu a ještě tentýž rok zjistil, že v roztavené síře se kaučuk nerozpouští, ale naopak stává se odolným proti účinkům tepla, chladu a rozpouštědel. Došel tedy k závěru, že síra chemicky reaguje s kaučukem, což brzy na to experimentálně prokázal. V roce 1844 si tento svůj objev nechal patentovat.

V roce 1842 ve Velké Británii ukázal William Brockendon Thomasu Hancockovi několik Goodyearových výrobků. Hancock zjistil, že páchnou po síře a nezávisle na Goodyearovu výzkumu také on přišel na to, že lze vlastnosti kaučuku změnit zahříváním v roztavené síře. Svůj objev si nechal patentovat v roce 1843. [2]

1.2 Přírodní kaučuk

Přírodní kaučuk se získává ze stromů kaučukovníku, zejména druhu *Hevea brasiliensis*. Kaučukovníky rostou a přibližně od roku 1900 se i uměle pěstují na plantážích v tropických pásmech Jižní Ameriky, jihovýchodní Asie i Afriky. Po naříznutí kůry stromu vytéká bílá, mlékovitá kapalina zvaná latex, která obsahuje 30 - 40% koloidních částic kaučuku (koloidní částicí se myslí látky, které nejsou schopny krystalizace). Z jediného stromu lze získat 5 - 25 kg kaučuku. [3]

Latex je po čepování ze stromů poměrně nestabilní. Vodní fáze, která je zředěným roztokem proteinů, solí, cukrů a jiných látek je ideální prostředí pro růst bakterií. Tyto bakterie pak svou činností porušují stabilitu latexu. Pro stabilizaci latexu se využívá amoniak. V zemích, které vyrábějí přírodní kaučuk, se vyváží 10 – 20% jako latex koncentrovaný odstředěním nebo usazením pro přímé zpracování na latexové výrobky. Zbytek se zpracuje na surový kaučuk. [4]

Před vlastní přípravou směsi se zpracovává tzv. lámáním. Příliš dlouhé řetězce se při něm štěpí účinkem vzdušného kyslíku v místě dvojných vazeb. Kaučuk se vysráží např. kyselinou mravenčí, vypere vodou a suší, buď jen teplým vzduchem (bílá krepa) nebo dýmem (hnědá krepa, jinak též uzený kaučuk). S rozvojem automobilového průmyslu je spojena rostoucí spotřeba kaučuku na výrobu pneumatik. To přimělo chemiky k hledání odpovídající náhrady za přírodní kaučuk. I když se dnes vyrábí desítky druhů různých syntetických kaučuků, přírodní kaučuk se používá stále, protože dodává směsím požadované vlastnosti. [3]

Z chemického hlediska jde o *cis*-1,4-polyisopren. Přírodní kaučuk má všeobecné použití. Nejběžnějším a pro vysoké požadavky vhodným druhem je uzený kaučuk. Použitelný je prakticky ve všech případech s výjimkou směsí čistě bílých. Používá se např. k výrobě duší, pneumatik, pryžových nití, ochranných masek.

Dalším druhem je bílá krepa, která se používá pro pryž čistě bílou nebo ve světlých tónech a pro pryž transparentní. Vzhledem k vyšší ceně se bílá krepa používá méně než uzený kaučuk. Je vhodná na výrobu nevulkanizujících lepidel, protože se dobře rozpouští a dává větší pevnosti spojů. [4]

1.3 Syntetický kaučuk

Polydieny jsou tvořeny homopolymery i kopolymery konjugovaných dienů. Polymery a kopolymery dienů jsou měkké, elastické materiály, které vzhledem k vysokému obsahu dvojných vazeb špatně odolávají účinkům světla, kyslíku, ozonu a tepla. Typických vlastností syntetických kaučuků, jako jsou pevnost v tahu, vratnost deformace při protažení, nepropustnost, odolnost proti oděru a stárnutí, se dosáhne teprve vhodným zpracováním, jež se nazývá vulkanizace.

Butadien-styrenový kaučuk (SBR) je univerzální kaučuk, který představuje asi 60% světové výroby syntetických kaučuků. Používá se pro běhouny pneumatik a pro tzv. technickou pryž.

Polybutadienové kaučuky (BR) se vyrábí především stereoregulární roztokovou polymerací pomocí Ziegler-Nattových katalyzátorů, kdy vznikají produkty s vysokým podílem 1,4butadienových jednotek. Polybutadieny s vysokým podílem cis-1,4-butadienových jednotek se vyznačují vysokou odolností proti oděru, vzniku trhlin a také vyšší odrazovou pružností, než přírodní kaučuk. Mimo to dobře snášejí plniva. Aplikují se hlavně v průmyslu výroby pneumatik.

Butadien-akrylonitrilový kaučuk (NBR) a jiné typy nitrilových kaučuků se vyrábějí radikálovou kopolymerací butadienu s 18 až 49% akrylonitrilu, nejčastěji však v rozmezí 28 až 33% AN. Se vzrůstajícím obsahem AN stoupá Tg a tvrdost, klesá elasticita a bobtnavost v pohonných látkách a olejích. Hlavní oblasti použití jsou benzínové hadice, těsnění, klínové řemeny, dopravní pásy, válce pro tiskařský, textilní a papírenský průmysl.

Polyisopren (IR), přírodní kaučuk (NR – natural rubber) je téměř stoprocentní cis-1,4-polyisopren. Syntetický polyisoprenový kaučuk (IR – isoprene rubber) je stereospecifický, roztokově polymerovaný cis-1,4-polyisopren, jehož struktura a vlastnosti jsou natolik podobné kaučuku přírodnímu, že je lze ve většině aplikací zaměnit. NR i IR krystalizují tažením za pracovních teplot, což vede k vysokým pevnostem v tahu. Tuto vlastnost nemají SBR, BR ani NBR, jejichž pevnost v tahu lze zlepšit aktivními sazemí.

Silikony $(\text{OSiOR}_1\text{R}_2)_n$ zahrnují obvykle všechny organokřemičité sloučeniny, největší význam mají polymery, jejichž křemíkové atomy jsou spojeny atomy kyslíku a zbylé valence jsou vázány na uhlovodíkové zbytky – tzv. polyorganosiloxany. Na rozdíl od uhlíkatých makromolekul se tedy vazby mezi atomy křemíku v polymerním řetězci uskutečnu-

jí prostřednictvím kyslíkových můstků, R je radikál nejčastěji methylový $-\text{CH}_3$, nebo fenylový $-\text{C}_6\text{H}_5$. Podle průměrné molekulové hmotnosti (délky řetězce) mohou být silikonové polymery připraveny v různé konzistenci jako silikonové oleje a tmely, silikonové kaučuky a silikonové pryskyřice. Silikony se obecně vyznačují výbornou tepelnou odolností, malou závislostí fyzikálních veličin na teplotě, hydrofobním charakterem a nesnášenlivostí s většinou jiných polymerů, výbornými elektroizolačními a povrchovými vlastnostmi (nízké povrchové napětí). Jsou chemicky i fyziologicky indiferentními materiály. [5]

1.4 Přísady v kaučukové směsi

1.4.1 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 výrobku. Při volbě plniva vycházíme z uvedených záměrů a z dalších technických požadavků. Základní vlastnosti směsi se upravují plněním, tj. přidávkem většího množství nejčastěji práškových přísad. Tím se mění prakticky všechny vlastnosti: hustota, tvrdost, modul, elasticita, tažnost, strukturní pevnost, dále zpracovatelnost, ale především cena pryže, neboť plniva se používají především ke snížení její ceny. S plněním klesá plasticita a směs se hůře hněte. Podle fyzikálního významu jsou plniva dělena na:

- *aktivní (ztužovadla)*: přechodně zlepšují pevnost, (př. saze MPC, HAF, Silika),
- *pasivní*: pevnost zhoršují, (př. saze MT, kaolín, křída). [6]

1.4.2 Antioxidanty

I po vulkanizaci zůstávají v zesíťovaném polymeru dvojně vazby, které jsou napadány kyslíkem a ozonem. Obsah ozonu ve vzduchu sice není velký, ale je mnohem agresivnější než kyslík. Vznikají nestabilní peroxidy nebo ozonidy, které se radikálově štěpí a tak dochází k narušení struktury - stárnutí pryže. Tento proces výrazně zpomalují látky zvané antioxidanty a antiozonanty.

1.4.3 Změkčovadla

Změkčovadla zvyšují plasticitu a usnadňují tak mechanické zpracování. Používají se různé minerální oleje.

1.4.4 Vulkanizační činidla

Používá se například prášková síra. Obsah síry ve výsledném výrobku se pohybuje mezi 1 - 3 %. Čím více síry, tím je pryž tvrdší. Zkouší se i jiná vulkanizační činidla - organické peroxidy a vulkanizační pryskyřice.

1.4.5 Urychlovače vulkanizace

Jsou látky, které zkracují dobu vulkanizace z hodin na minuty, snižují vulkanizační tep-lotu a zpomalují stárnutí. Tyto látky obsahují v molekule dusík a síru. Jejich účinek je různě velký. Účinnost urychlovačů zvyšuje tzv. aktivátor, což je oxid zinečnatý. Do směsi se přidává malé množství kyseliny stearové, která s ním vytváří stearan zinečnatý. Vstupní suroviny (zvláště ZnO) se kontrolují na přítomnost těžkých kovů (Cu, Mn, Cr, Fe), které působí jako tzv. kaučukové jedy. Vytvářely by v kaučucích různé sloučeniny, které by narušovaly řetězce makromolekul. [3]

1.4.6 Retardéry vulkanizace

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.

1.4.7 Nadouvadla

Pro výrobu lehčené pryže se používá různých druhů nadouvadel, což jsou látky, které se při vyšších teplotách v průběhu vulkanizace se 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 aktivátory rozkladu nadouvadla. Kaučukové směsi musí mít vysokou plasticitu a určitý průběh vulkanizace, aby nadouvání proběhlo v požadovaném rozsahu. [6]

2 VLASTNOSTI ELASTOMERŮ

Vlastnosti elastomerů můžeme rozdělit do dvou základních skupin. Tou první jsou vlastnosti fyzikální (mechanická odolnost) a druhou skupinou vlastnosti chemické (chemická odolnost).

Fyzikální vlastnosti konstrukčních materiálů v praxi charakterizují zejména vlastnosti jako je pružnost, plasticita, pevnost, tvrdost a houževnatost. Ovšem fyzikálních vlastností materiálu, které může konstruktér vyhodnocovat je mnohem více. Např. pružnost se dále popisuje modulem pružnosti v tahu nebo tlaku, modulem ve smyku, objemovým modulem pružnosti a koeficientem příčné kontrakce (Poissonovo číslo). U zkoušek fyzikálních vlastností materiálu je důležitá opakovatelnost zkoušky. Proto se tyto zkoušky provádí podle normalizovaného postupu na pracovišti vybaveným normou stanoveným zařízením. [1]

Ve vlastnostech elastomerního materiálu a dalších konstrukčních materiálů, jsou velké odlišnosti. Nejvýraznějšími odlišnostmi je že, mechanické, chemické a dynamické vlastnosti mají velké rozptyly číselných hodnot. Omezená použitelnost vlivem úzkého teplotního intervalu a vliv času na všechny její vlastnosti. I přes tyto nevýhody mají elastomery řadu předností, díky nimž mají elastomery jako konstrukční materiál široké uplatnění. Mezi tyto přednosti patří zejména vysoká elasticita (hyperelasticita). Schopnost snášet opakovaně značnou deformaci bez poškození. Tlumící účinek (přeměna mechanické energie v tepelnou). Díky velké chemické stabilitě, lze využít na ochranu materiálů, které podléhají korozi. Elastomery jsou velmi dobrými elektroizolanty, nepropustnost pro plyny a tekutiny. Skladbou směsi lze v široké škále měnit uvedené vlastnosti elastomeru.

Ze základů kinematické teorie pružnosti vyplývá, že základní vlastností elastomerů je elasticita. Ta se u elastomerů projevuje tak, že je lze poměrně malou silou deformovat v tahu, tlaku, ohybu, krutu apod. a to v daleko větším rozsahu než jiné konstrukční materiály. Po uvolnění deformační síly získává elastomerní těleso opět svůj původní tvar a rozměry. Podle kinetické teorie pružnosti jsou v elastomerním materiálu, na nějž nepůsobí deformační síly řetězové makromolekuly v neuspořádaném, zkrouceném stavu. Při působení vnější síly se řetězce napřimují, rozvinují a dochází k jejich orientaci ve směru namáhání, což zapříčiní vznik vnitřních sil v materiálu. Tyto vnitřní síly souvisí s tím, že dlouhé řetězce se snaží vrátit do původního stavu, stavu s větší entropií. Pro tuto teorii je nutný

předpoklad, že řetězce jsou upořádány do stavu jenž jim umožňuje, aby byla možná deformace a jejich články se mohly otáčet.

Charakter elastomerů je dán uspořádáním řetězců makromolekul a jejich vzájemnými reakcemi v průběhu deformace. Vznikem primárních vazeb mezi makromolekulami, které se vytváří při vulkanizaci, lze dále modifikovat vlastnosti elastomeru. Také existují mezi-molekulární sekundární vazebné síly, které jsou závislé na teplotě.

Pro elastomery je důležitý tvar distribuční křivky molekulových hmot. Čím širší je distribuce molekulových hmot, tím méně je plasticita elastomeru ovlivnitelná teplotou. Vlivem nízkomolekulární frakce je ovlivněn celý vulkanizační proces, jelikož nízkomolekulární frakce pomalu vulkanizují. Zatímco vysokomolekulární frakce jsou houževnaté a zhoršují zpracovatelnost v operacích před vulkanizací.

Vulkanizace je fyzikálně-chemický proces, při němž dochází k přeměně látky, která má převážně plastický charakter na látku elastického charakteru, za působení tepla a tlaku po určitý časový interval. Po vulkanizaci si látka zachovává svůj tvar, který nelze dále jinak měnit než opracováním. Během vulkanizace se vždy musí dodržovat předem stanovené podmínky, jinak by to znamenalo, změnu ve vlastnostech vzniklého výrobku. Kvůli špatné vodivosti elastomerní směsi neprobíhá vulkanizace v celém objemu, zejména u silnostěnných výrobků. Proto jsou vlastnosti elastomeru určeny složením směsi, vulkanizačními podmínkami, ale také tvarem a rozměry výrobku.

Podle základních vlastností dochází k orientačnímu roztřídění elastomerů, mezi tyto vlastnosti patří tvrdost, pevnost, tažnost, elasticita, strukturní pevnost a hustota. Tyto údaje jsou však nedostačující pro posouzení vhodnosti elastomeru z hlediska konstrukční použití. Musíme vycházet z funkce výrobku a dalších vlastností, které jsou požadovány na výrobku, jako je odolnost proti prostředí, odolnost proti dynamickému namáhání, elektrické vlastnosti a řadu dalších.

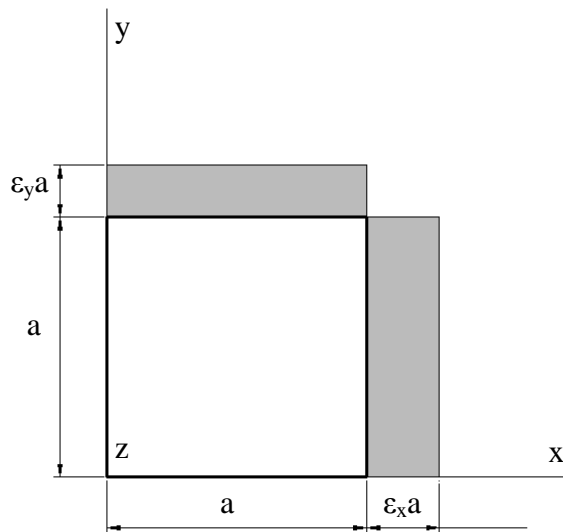
Pro výběr elastomeru je nutno posoudit vhodnost elastomeru pro funkční podmínky konstrukčního prvku. Proto je nutno stanovit další vlastnosti jako je odolnost prostředí, v němž bude konstrukční prvek pracovat. Mezi ně patří zejména chemické vlivy prostředí, teplotní zatížení, elektrické vlastnosti, způsob jeho zatížení apod. Při konkrétním použití je však možné často vysledovat hlavní vlastnost, nebo hlavní vlastnosti namáhání prvku, z toho pak se musí vycházet pro výběr vhodného složení směsi. Nezanedbatelným kritériem je také zvolený-stanovený technologický způsob výroby. [7]

3 ELASTICITA ELASTOMERŮ

3.1 Malá deformace – Hookův zákon v objemovém stavu (stlačitelnost)

Působením prostorové napjatosti na obecnou elementární krychlovou část materiálu se změní její tvar i objem (viz obr. 1.). Pokud se objem elementu před deformací rovnal $dV=a^3$, pak jeho změna objemu po malé deformaci je přibližně:

$$\Delta dV = a^2 \varepsilon_x a + a^2 \varepsilon_y a + a^2 \varepsilon_z a = a^3 (\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z) \quad (1)$$



Obr. 1 Změna objemu elementární krychlové části [8]

Poměrná změna objemu v daném místě tělesa je pak

$$e = \frac{\Delta dV}{dV} = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z \quad (2)$$

Rozšířením rovnice elasticity dvouosé napjatosti na prostorovou napjatost získáme pro normálové složky tento tvar:

$$\varepsilon_i = \frac{1}{E} (\sigma_i - \nu \sigma_j - \nu \sigma_k) \quad (3)$$

Kombinací rovnic (2) a (3) zjistíme, že platí vztah:

$$\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z = \frac{E \cdot e}{(1 - 2\nu)} = konst \quad (4)$$

Je-li částice materiálu namáhána napjatostí tzv. hydrostatického typu, kdy $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = -p$, budou příslušné deformace $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_3 = -\varepsilon$ podle (3). [8]

$$\varepsilon = \frac{p}{E}(1 - 2\nu) \quad (5)$$

Potom poměrná změna objemu – stlačení je tak zřejmé:

$$e = 3\varepsilon = \frac{3p(1 - 2\nu)}{E} \quad (6)$$

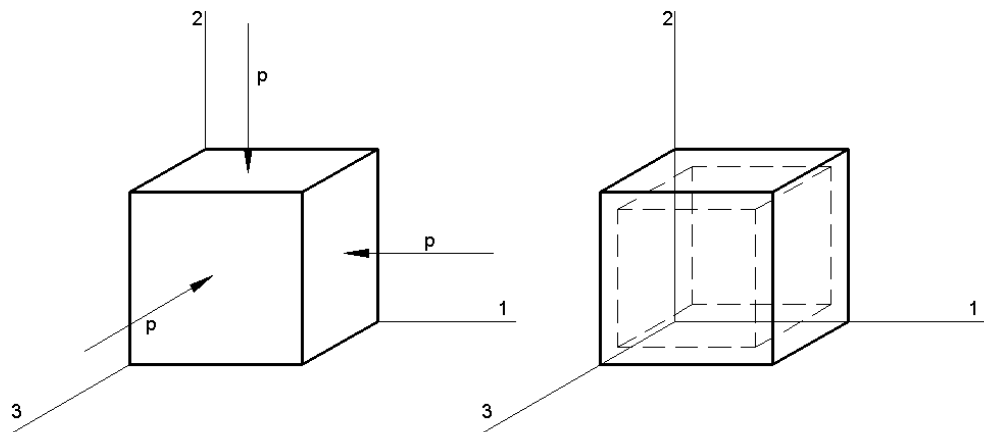
Tento vztah lze také zapsat v tomto tvaru:

$$p = K \cdot e \quad (7)$$

Kdy konstanta K má tvar:

$$K = \frac{E}{3(1 - 2\nu)} \quad (8)$$

Konstantu K nazýváme objemovým modulem pružnosti (bulk modulus).



Obr. 2 Zatížení částice materiálu všestranným tlakem [8]

Elastomerní materiály mají Poissonův poměr blízký hodnotě 0,5. Při hodnotě $\nu=0,5$ by však teoreticky objemový modul pružnosti vzrůstal nade všechny meze (materiál by byl nestlačitelný). Prakticky se hodnoty objemového modulu pružnosti pohybují řádově v tisících, zatím co hodnoty modulu pružnosti pouze v jednotkách. To znamená, že při analýze napjatosti a deformace elastomerech výrobků lze zanedbat relativně velmi malé hodnoty objemových deformací vůči deformacím představujícím změnu tvaru a považovat elastomerní materiál za nestlačitelný. Díky tomuto předpokladu lze značně zjednodušit, deformačně napěťové analýzy elastomerních výrobků v oblasti konečných deformací. [8]

3.2 Hustota deformační energie – malé deformace

Vztáhneme-li energii prostorové napjatosti U na jednotku objemu, získáme:

$$W = \frac{dU}{dV} \quad (9)$$

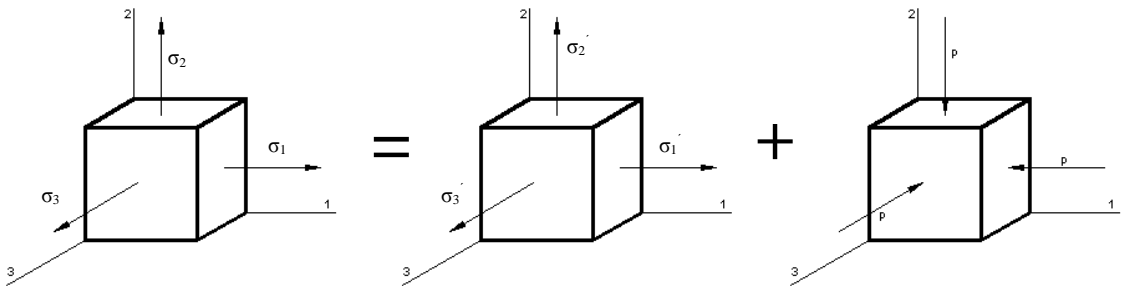
Potom hovoříme o veličině W jako o hustotě deformační energie. Kterou můžeme zapsat takto:

$$W = \frac{1}{2}(\sigma_1 \varepsilon_1 + \sigma_2 \varepsilon_2 + \sigma_3 \varepsilon_3) \quad (10)$$

Dosadíme-li za složky deformace rovnice elasticity, získáme následující vztah:

$$W = \frac{1}{2E}[\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\nu(\sigma_1 \sigma_2 + \sigma_2 \sigma_3 + \sigma_3 \sigma_1)] \quad (11)$$

Pokud se rozdělí obecná prostorová napjatost pro přehlednost hodnotami hlavních napětí, na dvě dílčí části viz obr. 3. Kde napětí σ_i' způsobují pouze změnu tvaru elementární krychle a napětí $\sigma_i'' = p$ způsobují pouze změnu objemu.



Obr. 3 Rozdělení prostorové napjatosti [8]

Tu část napjatosti, která způsobuje pouze změnu tvaru, nazýváme distorzní část napjatosti. Druhou částí napjatosti je objemová část napjatosti. Pro distorzní část napjatosti je tedy poměrná změna objemu rovna nule. Z rovnice (2) pak vyplývá:

$$\sigma_1' + \sigma_2' + \sigma_3' = 0 \quad (12)$$

takže součet je tedy:

$$\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 = \sigma_1'' + \sigma_2'' + \sigma_3'' = 3p \quad (13)$$

z toho vztahu pak vyplývá velikost objemové části napjatosti

$$p = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} \quad (14)$$

Hustota deformační energie objemové části napjatosti je podle rovnice (11) a s použitím rovnice (14).

$$W'' = \frac{1-2\nu}{6E} (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)^2 \quad (15)$$

Hustota deformační energie distorzní části napjatosti pak obdržíme jako rozdíl

$$W' = W - W'' \quad (16)$$

Za použití rovnice (15) a (11) získáme měrnou energii distorzní části napjatosti v tomto tvaru:

$$W' = \frac{1+4\nu}{3E} [\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - (\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_1\sigma_3)] \quad (17)$$

Von Misesova hypotéza srovnává napjatost na základě hodnoty hustoty deformační energie části napjatosti, potřebné na změnu tvaru (tj. distorzní napjatosti). Měrná energie distorzní části napjatosti, vyjádřené hlavními napětími je dána vztahem (17).

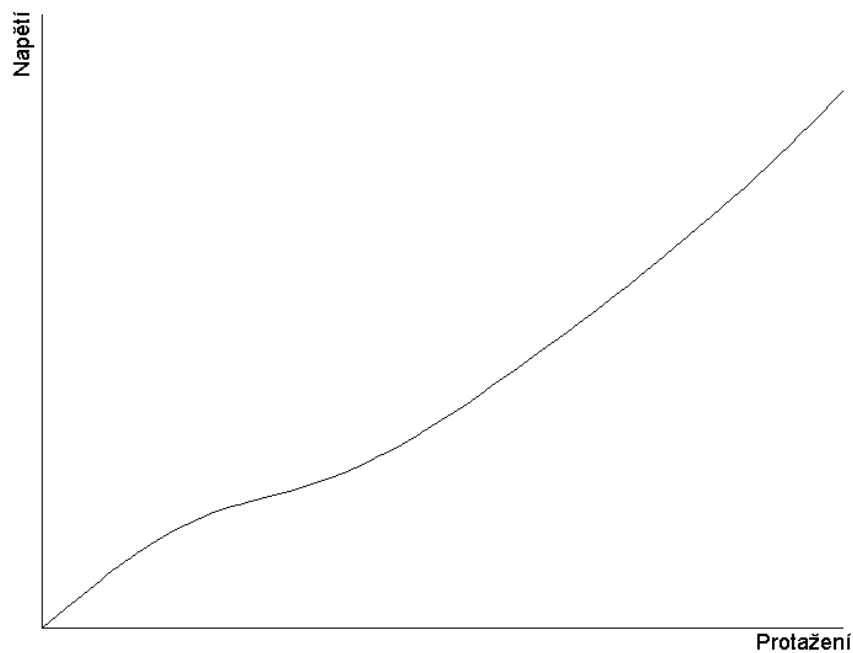
Hledáme-li pro obecnou prostorovou napjatost srovnávací jednoosou napjatost σ_s , která bude mít shodnou velikost W' , $W_I' = W$ [8]

$$\sigma_s = [\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - (\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_1\sigma_3)]^{\frac{1}{2}} \quad (18)$$

4 HYPERELASTICITA ELASTOMERŮ

Elastomery mají některé charakteristické rysy, kterými se výrazně odlišují od většiny ostatních materiálů (ideálně elastických). Souhrn těchto vlastností je často nazýván jako hyperelastická a tyto materiály jsou pak považovány za hyperelastické. Hlavními znaky hyperelasticity jsou:

- Dosažitelné elastické (vratné) deformace jsou veliké, mnohonásobně vyšší než u ideálně elastických látek. Tažnost (protažení při přetržení) dosahuje několika set procent původní délky.
- Závislost napětí na deformaci je silně nelineární. Tvar této závislosti má zpravidla charakteristický esovitý průběh (obr. 4).
- Materiál se deformuje již účinkem malých sil. Poměr napětí a deformace v oblasti malých deformací je asi desettisíckrát menší než u ideálně elastických látek
- Objemová tuhost většiny elastomeru je velmi vysoká. Objemový modul pružnosti dosahuje hodnot řádově stovek až tisíců MPa, a při úvaze malého poměru napětí ku deformaci se pak Poissonův poměr blíží hodnotě 0,5 (v závislosti na obsahu plniv). Lze většinu těchto materiálů považovat za objemově nestlačitelné. [9]



Obr. 4 Závislost napětí a deformace při zatěžování elastomerů

Elastomery dále charakterizuje časová závislost deformace. Deformační chování elastomerů má současně elastický i viskózní charakter. Tato chování nazýváme jako viskoelastické chování. Z důvodů že závislost deformace na napětí není lineární a že dochází k velkým deformacím ($> 2\%$), vyplývá, že nejsou splněny podmínky pro použití Hookova zákona. I přesto lze tento vztah použít s určitou přesností v případech, kdy nedochází k velkým deformacím zatěžovaného prvku. V případě že dochází k větším deformacím zatěžujícího prvku a chtěli bychom přesnější výsledky, musíme použít nelineární popis závislosti deformace na napětí. [9]

5 HYPERELASTICKÉ MODELY

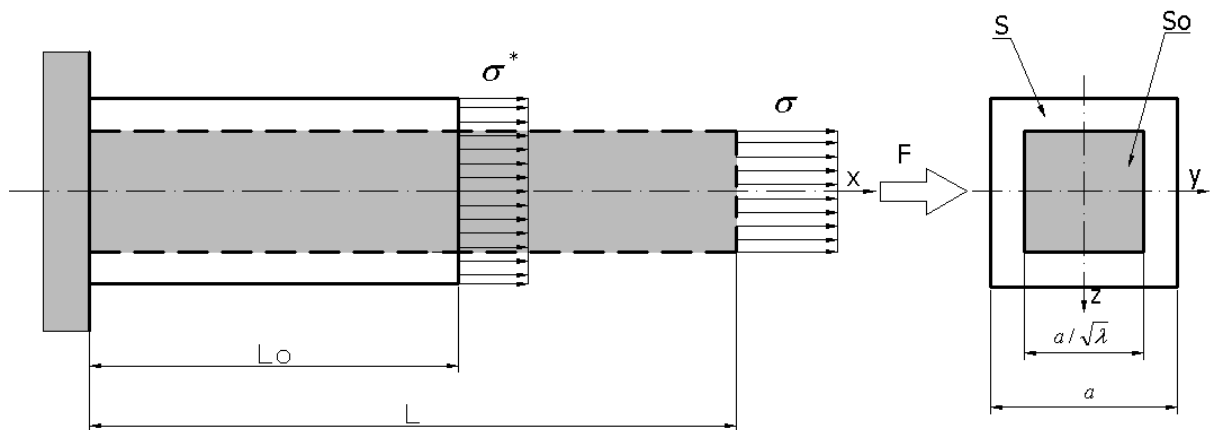
Intenzivní vývoj nelineárních hyperelastických materiálových modelu probíhá od 2. poloviny 20. století. Tyto modely, jsou založeny na definici vztahu pro hustotu deformační energie W a jsou nezávislé na rychlosti a historii deformace. V posledních letech jsou však publikovány práce zabývající se modelováním zahrnujícím i tyto efekty. Dnes používané hyperelastické modely obecně formulují vztah pro hustotu deformační energie ve tvaru:

$$W = W(I_1, I_2, I_3 \{M\}) \quad \text{nebo} \quad W = W(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3 \{M\}) \quad (19)$$

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

Protažení λ_i je poměrem deformované délky l_i ve směru osy i k původní délce l_{oi} . (obr. 5)

$$\lambda_i = \frac{l_i}{l_{oi}} \quad (20)$$



Obr. 5 Elastomer při zkoušce jednoosým tahem [9]

Deformační invarianty I_i jsou definovány vztahy:

$$\begin{aligned} I_1 &= \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 \\ I_2 &= \lambda_1^2 \lambda_2^2 + \lambda_2^2 \lambda_3^2 + \lambda_3^2 \lambda_1^2 \\ I_3 &= \lambda_1^2 \lambda_2^2 \lambda_3^2 \end{aligned} \quad (21)$$

Kdy pro nestlačitelné materiály je invariant $I_3=1$ [9]

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

$$S_{ij} = 2 \frac{\partial W}{\partial C_{ij}} \quad (22)$$

S_{ij} jsou složky 2. Piola-kirchhoffova tenzoru napětí a C_{ij} jsou složky pravého Cauchy-Greenova deformačního tenzoru.

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

$$[C] = \begin{bmatrix} \lambda_1^2 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2^2 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_3^2 \end{bmatrix} \quad (23)$$

Jednotlivé modely se od sebe liší definicí funkce hustoty deformační energie W .

5.1 Fenomenologické modely

Tato skupina modelů byla navržena pouze na základě pozorování deformačně napěťového chování elastomeru na makroskopické úrovni, tak aby model co nejlépe přiblížil toto chování. Jejich materiálové konstanty často nemají konkrétní fyzikální význam.

5.1.1 Polynomický model

Tento model je založen na první a druhém invariantu Cauchy-Greenova tenzoru deformace. Kdy hustota deformační energie W je u tohoto modelu popsána takto:

$$W = \sum_{i+j=1}^N c_{ij} (I_1 - 3)^i (I_2 - 3)^j \quad (24)$$

kde c_{ij} jsou materiálové konstanty a za N se dosazují hodnoty od jedné do nekonečna, ale obvykle není hodnota N vyšší než 3. Tento vztah může být používán v případech, kdy hodnota deformace dosahuje až 300%.

5.1.2 Yeoh

Model je založen na pozorování Ronalda Rivlina. Je podobný polynomickému modelu, ale není zde zastoupen druhý deformační invariant. Kvůli tomu se obtížněji vyhodnocuje a poskytuje méně přesné výsledky. Je definován takto: [9]

$$W = \sum_{i+j=1}^N c_{i0} (I_1 - 3)^i \quad (25)$$

kde c_{i0} jsou materiálové konstanty a za N se dosazují hodnoty od jedné do nekonečna, ale obvykle není hodnota N vyšší než 3. Když je hodnota $N=1$ vztah je totožný s modelem Neo-Hookean. Pokud jsou v modelu zastoupeny všechny tři konstanty, dosahuje se dobrých výsledků pro deformace velkého rozsahu.

5.1.3 Mooney-Rivlin

Ve čtyřicátých letech 20. století Mooney navrhl model se dvěma parametry založenými na předpokladu lineárního vztahu mezi zatížením smykem během jednoduché smykové deformace. V 50. letech Rivlin modifikoval Mooneyho model, aby obdržel obecné vyjádření funkce deformační energie vyjádřené pomocí deformačních invariantů.

Dvou-parametrový model je jeden z nejvíce používaných modelů. Při hodnotě $N=1$ je stejný jako polynomický model.

$$W = c_{10}(I_1 - 3) + c_{01}(I_2 - 3) \quad (26)$$

kde c_{10} , c_{01} jsou materiálové konstanty.

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

$$W = c_{10}(I_1 - 3) + c_{01}(I_2 - 3) + c_{11}(I_1 - 3)(I_2 - 3) \quad (27)$$

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

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

$$W = c_{10}(I_1 - 3) + c_{01}(I_2 - 3) + c_{20}(I_1 - 3)^2 + c_{11}(I_1 - 3)(I_2 - 3) + c_{20}(I_1 - 3)^2 \quad (28)$$

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

Dále ještě existuje devíti-parametrový model, který je shodný s polynomickou formou pro $N=3$

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%. [9]

5.1.4 Ogden

Tento model byl vyvinut Ray W. Ogden v roce 1972. Ogdenův model, stejně jako ostatní hyperelastické modely předpokládá, že chování materiálu lze popsat pomocí hustoty deformační energie. [10] Ogden navrhl funkci vyjádřenou v hodnotách hlavních protažení. Tento model je dnes často využíván a poměrně dobře vystihuje chování elastomerů i při velkých deformacích.

$$W = \sum_{i=1}^N \frac{\mu_i}{\alpha_i} (\lambda_1^{\alpha_i} + \lambda_2^{\alpha_i} + \lambda_3^{\alpha_i} - 3) \quad (29)$$

kde μ_i a α_i jsou materiálové konstanty bez konkrétního fyzikálního významu. Za N se dosazují obecně hodnoty od jedné do nekonečna, ale obvykle mají hodnotu N vyšší než 3.

Pro $N=1$ a $\alpha_i=2$ se Ogden stává ekvivalentní k modelu Neo-Hookean. Pro $N=2$ a $\alpha_i=-2$ Ogden přechází na dvou-parametrový Mooney-Rivlinův model. Ogdenův model může být používán obecně pro deformace do 700%. [9]

5.2 Mechanické modely

Jsou založeny na mikromechanických modelech vnitřní struktury elastomeru. Materiálové konstanty v těchto modelech mají jednoznačný fyzikální význam.

5.2.1 Neo-Hookean

Tento model byl navrhnout Ronaldem Rivlinem v roce 1948. Neo-Hookean model nebere v úvahu uvolnění energie ve formě tepla vlivem disipace při namáhání materiálu a naprostá pružnost se předpokládá ve všech stadiích deformace. [10] Vychází z termodynamických principů a ze statistického přístupu k modelování vnitřní struktury elastomerů. Model není schopen věrohodně postihnout závěrečnou vyztužovací fázi napětově deformační odezvy elastomerů. Dále model vykazuje lineární chování při smykové deformaci.

$$W = \frac{\mu}{2} (I_1 - 3) \quad (30)$$

kde μ je počáteční smykový modul

$$\mu = nkT \quad (31)$$

kde n je počet polymerních řetězců v jednotkovém objemu, k je Boltzmannova konstanta a T je absolutní teplota. [9]

Model je použitelný pro deformaci do 40 % v jednoosém namáhání.

5.2.2 Arruda-Boyce

Tento model je založený na mikromechanice vnitřní struktury elastomerů. Muže být považován jako rozšíření modelu *Yeoh* pro $N = 5$, kde konstanty mají reálný význam.

$$W = \mu \sum_{i=1}^5 \frac{C_i}{\lambda_L^{2i-2}} (I_1^i - 3) \quad (32)$$

kde konstanty C_i jsou definovány jako:

$$C_1 = \frac{1}{2}, \quad C_2 = \frac{1}{20}, \quad C_3 = \frac{11}{1050}, \quad C_4 = \frac{19}{7000}, \quad C_5 = \frac{519}{673750}, \quad (33)$$

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*. Model je vhodný pro deformaci do 300 %. [9]

5.3 Kombinace Fenomelogického a mechanického modelu

5.3.1 Gent

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

$$W = -\frac{EI_m}{6} \ln\left(1 - \frac{I_1 - 3}{I_m}\right) \quad (34)$$

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*. Výhody modelu spočívají v jeho jednoduchosti (pouze dvě materiálové konstanty) a schopnosti postihnout závěrečnou vyztužovací fázi napětíové deformační odezvy. [9, 10]

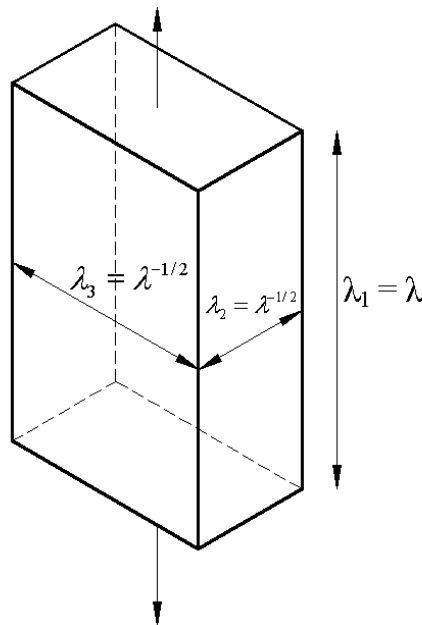
6 STANOVENÍ MATERIÁLOVÝCH KONSTANT PRO HYPERELASTICKÉ MODELY

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 módu namáhání. Pro tento způsob zatížení jsou nezbytné speciální přístroje a vybavení.

Abychom získali přesné parametry do hyperelastických modelů musíme materiál zkoušet v jednoosém tahu, dvouosém tahu a čistém smyku. Vzhledem k různorodosti elastomerů je nutné pro každou konkrétní analýzu přesně stanovit materiálové konstanty daného materiálu. Požadovaným výstupem z testu je vždy celá křivka závislosti napětí/deformace pro daný způsob zatěžování. [9]

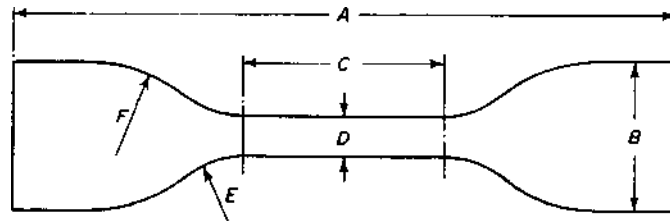
6.1 Zkouška jednoosým tahem

Jednoosý tah je definován poměrem protažení viz obr. 6. Přičemž tato deformace vyplývá z nestlačitelnosti materiálu ($\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 = 1$). Pokud má zkušební těleso tvar hranolu a jeho boční stěny nepůsobí tahová síla, pak $\sigma_1, \sigma_2 = 0$. [11]



Obr. 6 Princip jednoosého tahu

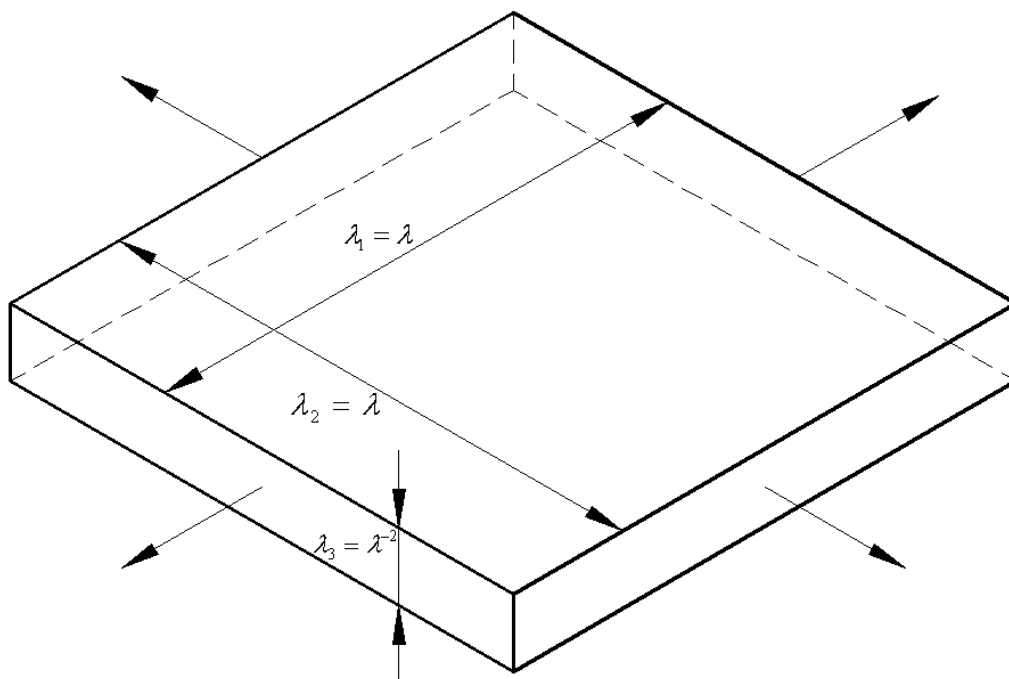
Nejdůležitějším požadavkem je, aby v zájmu dosažení stavu čistého tahového namáhání bylo zkušební těleso mnohem delší ve směru protažení než v šířce a tloušťce.



Obr. 7 Zkušební těleso pro jednoosý tah [12]

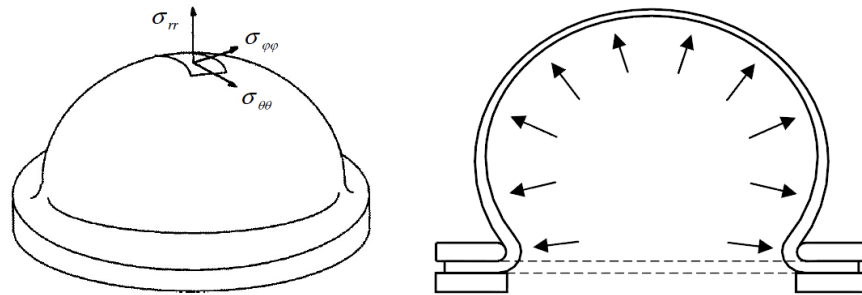
6.2 Zkouška dvouosým tahem

Vztah pro dvouosé napjatosti lze získat přímo ze vztahu pro jednoosou napjatost. V tomto případě jsou hodnoty poměrných protažení zobrazeny na obr. 8. Jelikož plochy, na kterých je napětí σ_3 , nejsou zatíženy tak je toto napětí rovno nule. [11]

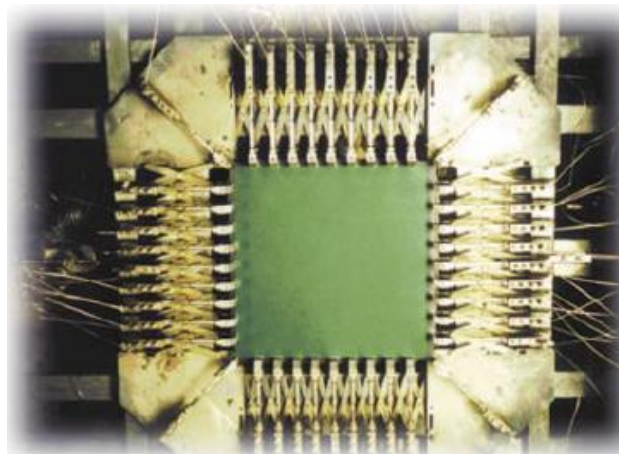


Obr. 8 Princip dvouosého tahu

Při dvouosém zatížení je nutno plochý vzorek materiálu napínat ve všech směrech jeho roviny. Tohoto stavu lze dosáhnout třemi způsoby. Prvním způsobem je vydutí plochého vzorku pomocí stlačeného vzduchu (obr. 9). Dvouosé deformace může být také dosaženo roztahováním čtvercového vzorku do dvou navzájem kolmých směrů (obr. 10).



Obr. 9 Metoda dvouosého tahu pomocí nafouknutí vzorku [9]



Obr. 10 Metoda dvouosého tahu pomocí tahu ve dvou kolmých osách [9]

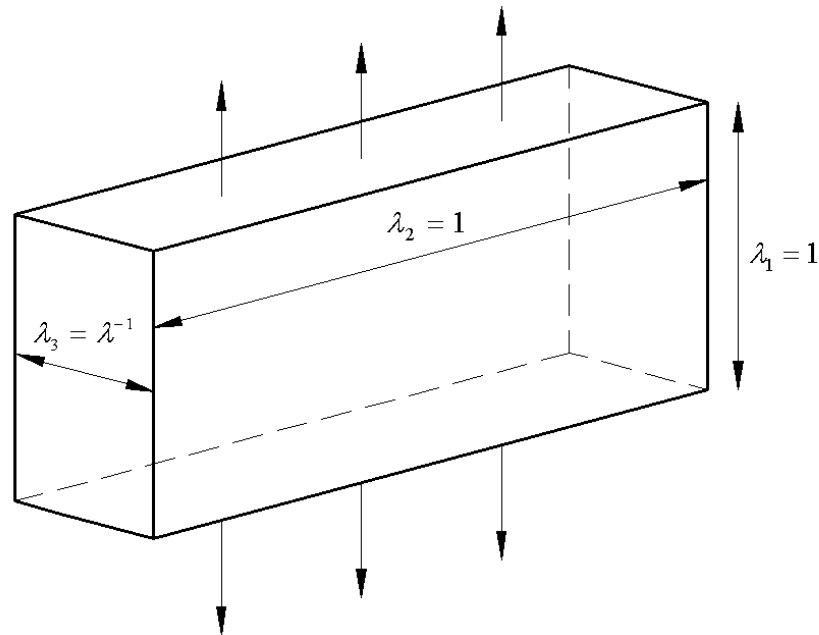
Poslední metodou jak docílit dvouosého tahu je roztahování kruhového vzorku radiálně ve směru od středu (obr. 11).



Obr. 11 Metoda dvouosého tahu pomocí radiálního tahu [9]

6.3 Zkouška čistým smykem

Další jednoduchý deformační stav je popsán jako „čistý smyk“ (obr. 12). Ten je definován jako napětí aplikované ve směru 1 s podmínkou, že v šířce ve směru 2 je bráněno deformaci ($\lambda_2 = 1$). To je důvod pro výraz „smyk“. Při smykové deformaci nedochází ve směru shodném s hlavní osou k žádnému prodloužení. Termín „čistý“ znamená, že nedochází k rotaci kolem hlavních os v průběhu deformování. [11]



Obr. 12 Čistý smyk

Testovací zařízení je velmi jednoduché, jelikož způsob měření napětí není složitý. Plochý pryžový vzorek je upnutý (popř. nalepený) na kovové čelisti (obr. 13) [12]



Obr. 13 Zkušební vzorek upnutý v čelistech [9]

7 RYCHLÝ TEST OPOTŘEBENÍ

Tento test je využíván pro směsi běhounů pneumatik, které se pohybují v těžkých terénních podmínkách. Kde ostré hrany kamínků a nerovnosti terénu mají za následek postupné vyřezávání (vytrhávání) částí běhounu. Lze to považovat za určitý mechanismus obrábění, který má určitou podobnost s frézováním. Tento mechanismus opotřebení běhounů pneumatik se nazývá Chip – chunk efekt.

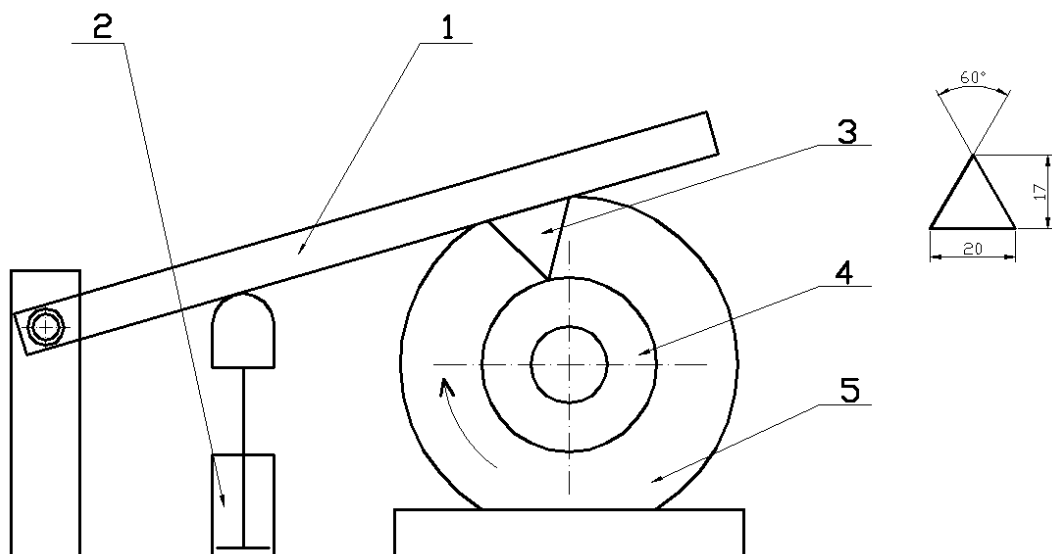
Zkoušky opotřebení pneumatik (běhounů) jsou časově i ekonomicky velmi náročné. Provádí se s hotovými pneumatikami na zkušebnách nebo přímo v terénu při zkušebních jízdách. Proto je snaha nalézt takovou metodu, při níž by bylo možné velmi rychle (v minutách) na malých vzorcích testovat opotřebení a tak navzájem porovnávat jednotlivé druhy směsí. Testovací zařízení na Chip – chunk opotřebení vynalezli J. R. Beatty a B. J. Miksch.



Obr. 14 Mimosilniční pneumatika [13]

7.1 Testovací zařízení pro rychlý test opotřebení

Na základě testovacího zařízení J. R. Beatty a B. J. Miksch, bylo navrženo nové testovací zařízení s možností změn parametrů testů, poskytující reálnou simulaci provozních podmínek. Jehož princip je znázorněn na obrázku 15. [13]



Obr. 15 Schéma testovacího zařízení pro rychlý test opotřeбенí [13]

1 – rameno, 2 – pneumatický válec, 3 – keramický břit, 4 – zkušební těleso, 5 – elektromotor

Rameno 1 otočné okolo čepu je zvedáno zvedacím ustrojím (píst pneumatického válce) 2. Po zvednutí padá rameno, na jehož konci je připevněn speciální keramický břit 3, na otáčející se zkušební těleso 4 poháněné elektromotorem 5. Při dopadu na rotující těleso břit postupně vysekává materiál a tvoří ve zkušebním tělese drážku. Velikost drážky zhotovená břitem za určitý čas je měřítkem opotřeбенí. Při návrhu musely být zohledněny následující požadavky:

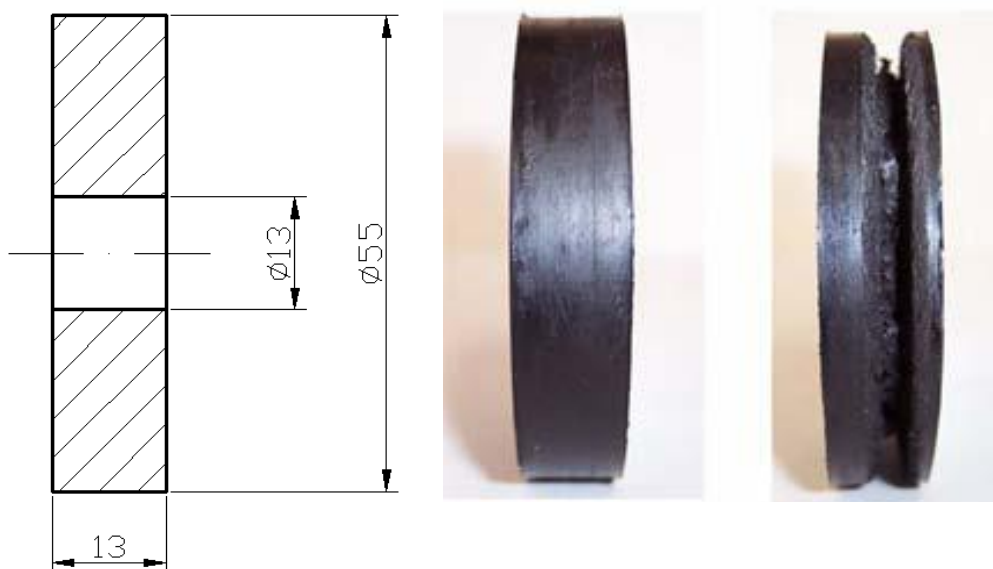
- Otáčky zkušebního tělesa musí být nastavitelné v širokém rozmezí.
- Proměnlivý zdvih ramene.
- Zabezpečit konstantní parametry břitu. Z toho důvodu byl odzkoušen keramický břit – upravená břitová destička pro řezné nástroje (typ TNGN 220608). Při úpravě byly zbrúšením vytvořeny tři řezné břity s úhlem 60°. Keramické břity vykazovaly vynikající odolnost proti opotřeбенí.

7.2 Rozměry zkušebního tělesa

Rozměry zkušebního tělesa jsou zobrazeny na obr. 3. Průměr zkušebního vzorku byl zvolen 55mm a šířka 13mm stejně, jako je tomu u zkušebních tělísek pro stanovení odrazové pružnosti Luepke.

V průběhu testu byla do zkušebního tělesa vytvořena (vykousána) keramickým nástrojem drážka. Po zkušenosti s obráběním jiných materiálů zejména kovů, ale i dřeva,

plastů aj., by se dalo očekávat, že tvar drážky bude pravidelný. Vzhledem k vlastnostem obráběné pryže, u které se výrazně projevil její elastický charakter, došlo k nerovnoměrnému vytrhávání materiálu v okamžiku dopadu břitu na rotující těleso. Z tohoto důvodu se vyhodnocování provedení gravimetricky. [13]



Obr. 16 Rozměry zkušební tělesa a zkušební těleso před a po zkoušce [13]

7.3 Podmínky experimentu

Zkoušky rychlého opotřebení byly prováděny na experimentálním zařízení při následujících podmínkách:

- otáčky zkušební tělesa 500 min⁻¹, 750 min⁻¹, 910 min⁻¹
- frekvence dopadu keramického břitu 1 Hz
- zdvih keramického břitu 60 mm
- teplota okolí 21 °C
- doba trvání experimentu 270s

Zkušební těleso je třeba upnout do čelistí stroje tak, aby nedocházelo k jeho prokluzování a bylo uvedeno do rotace. Poté byl uveden do chodu zdvihací mechanismus pro zvedání ramene s keramickým břitem. Od prvního kontaktu břitu se zkušebním tělesem je měřen čas. K měření se používá deset zkušebních těles zhotovených z jednotlivých směsí. Po ukončení experimentu se zjišťuje hmotnostní úbytek vážením na analytických vahách. Naměřené hodnoty jsou graficky zpracovány a vyhodnoceny. [13]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

8 STANOVENÍ CÍLŮ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Cílem této práce je numerická analýza zkoušky opotřebení elastomeru za pomoci programu MSC Patran a MSC Marc. Vytvoření 2D a 3D FEM modelu v programu MSC Patran, díky nimž lze popsat, jaké napětí vznikají ve zkušebním vzorku. Dále pak u 2D analýz vyhodnocení vlivu koeficient tření na napětí. Výsledky těchto 2D a 3D analýz budou zpracovány a mezi sebou porovnány.

9 ANALÝZA KONEČNÝCH PRVKŮ (FEA)

Programy FEA slouží k vytváření analýz pomocí metody konečných prvků. Tyto softwary se využívají v mnoha odvětvích průmyslu, ale také i medicíny. V průmyslu se FEA programy používají nejčastěji k analýzám eleastomerů, skla, keramiky a kompozitních látek. V lékařství jsou využívány v biomechanice a zubní chirurgii, kde slouží k analýzám zubních implantátů, umělých končetin a protéz. Další uplatnění nachází ve spotřebním průmyslu u analýz sportovního vybavení, návrhu bot či ochranných pomůcek.

Díky těmto programům jsou výrobky rychleji uváděny na trh. Výrobky mají optimální využití materiálu a nižší hmotnost, což také vede ke snížení nákladů. Kromě toho analýzy napomáhají snížit zmetkovitost ve výrobní fázi, jelikož většina nedostatků v konstrukci dílce bude odhalena již při konstrukci dílce.

9.1 MSC Patran

Patran je nejrozšířenější pre/post-processing software pro analýzu metodou konečných prvků (FEA), poskytující modelování geometrie, tvorbu sítě a nastavení analýzy pro MSC Nastran, Marc, Abaqus, LS-DYNA, ANSYS a Pam-Crash.

Má bohatou sadu nástrojů, které usnadňují tvorbu modelu pro lineární, nelineární, explicitní dynamiku a tepelné analýzy.

Poskytuje úplnou sadu nástrojů pro tvorbu geometrie modelu. Kromě toho umožňuje import geometrie z CAD softwaru Konečné modelovací nástroje pro tvorbu analýz a verifikace modelu, včetně vytváření sítě, automatické vysítování plochy a automatické vysítování těles čtyřbokými elementy. Sadu pro vytváření zatížení, okrajových podmínek a vlastností materiálu či elementu. Tyto funkce lze přiřadit přímo ke geometrii nebo k FEM modelu.

Patran lze dále využít jako postprocessor . Výpočet analýzy, který proběhl ve druhé fázi, poskytl výsledky v podobě čísel. Proto Patran umožňuje vizualizovat výsledky pomocí počítačové grafiky, animace a dalších nástrojů.

10 METODA KONEČNÝCH PRVKŮ (FEM)

Metoda konečných prvků je zobecnění Ritz-Galerkinovy variační metody, kdy daná oblast je rozdělena na konečný počet prvků, o nichž předpokládáme, že jsou navzájem spojeny v konečném počtu uzlových bodů na hranicích prvků. V mechanice pevných těles se nejčastěji využívá k popisu a řešení v tělese zatíženém vnějšími silami. Pokud známe vektory posunutí bodů tělesa, můžeme určit deformační a napět'ové pole. [14]

10.1 Řešené oblasti

Při analýze pevných těles se setkáváme s dvěma základními typy analýz.

10.1.1 Statické

Dochází k rovnováze vnitřních a vnějších sil působících na těleso a jsou nezávislé na čase.

$$\sum F = 0 \quad (35)$$

Lineární strukturální analýza (deformačně pevnostní)

Nelineární analýzy:

- Geometrická nelinearita (velká posunutí, velká natočení)
- Materiálová nelinearita (hyperplasticita, plasticita)
- Kontakt

Lomová mechanika

10.1.2 Dynamické

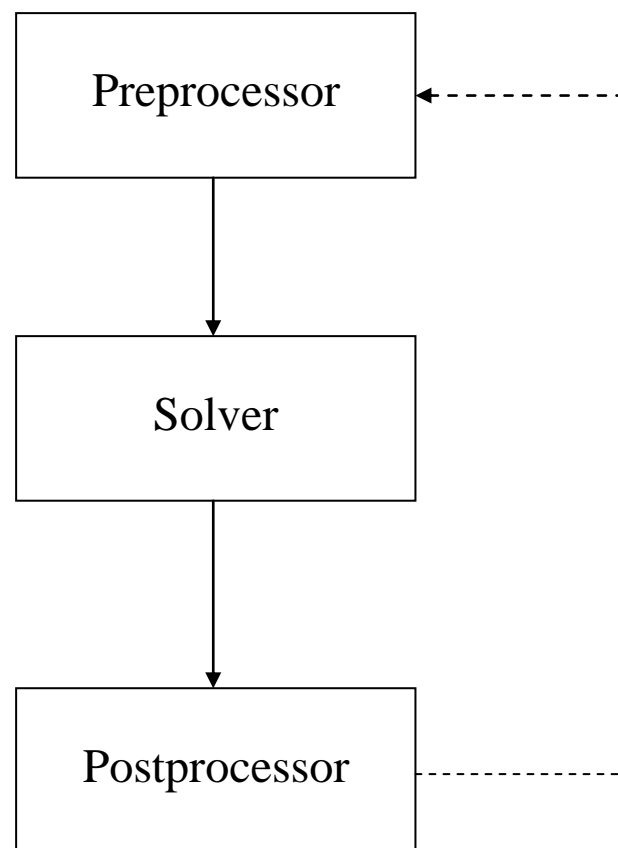
Většinou se jedná o rychlé děje a jsou časově závislé.

$$\sum F = m \cdot a \quad (36)$$

- a Kmitání
- b Proudění kapalin
- c Elektromagnetické jevy
- d Teplo
- e Dynamika

11 VYTVOŘENÍ ANALÝZY FEM MODELU

Postup pro tvorbu a analýzu FEM modelu lze rozdělit do tří fází. Tyto tři fáze pro tvorbu a analýzu FEM modelu mohou být vytvářeny v jednom programu nebo ve více programech. První část se nazývá, preprocessor, zde dochází k definici modelu a nastavení analýzy. Druhou fází je solver, zde dochází k výpočtu analýzy. Ve třetí fázi jsou vyhodnocovány a zobrazovány výsledky analýzy. Tato fáze je nazývána postprocessor. Pokud shledáme ve třetí fázi výsledky analýzy nevyhovující, vrátíme se opět k první fázi a upravuje nastavení analýzy nebo geometrii FEM modelu.



Obr. 17 Struktura tvorby a analýzy FEM modelu

12 PREPROCESSOR

V této fázi dochází k tvorbě geometrického modelu a následné definici vlastností tohoto modelu. Výběru elementu a tvorbě sítě. Definici okrajových podmínek.

12.1 Geometrický model

V tomto kroku dochází k tvorbě geometrie modelu. Geometrie modelu může být vytvořena přímo ve FEM programu, nebo může být importována z CAD programu.

12.2 Materiálové modely

Materiálový model může být lineární nebo nelineární (plasticita, viskoelasticita nebo hyperelasticita). Podle struktury se dále dělí:

- **Isotropní**
- **Anizotropní** (Příčně isotropní, ortotropní, obecně anizotropní)

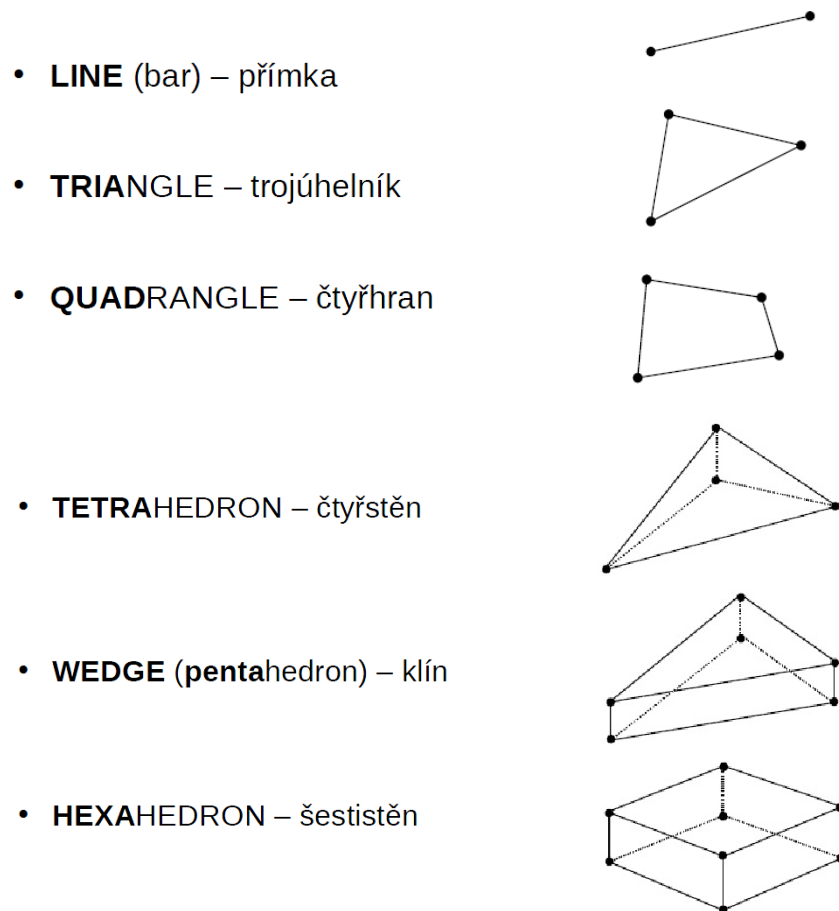
12.3 Geometrické vlastnosti

Rozlišujeme podle dimenze prvky na:

- **1D** – nosníky, skořepiny
- **2D** – solid, skořepina
- **3D**- solid

12.4 Tvorba sítě

Síť FEM modelu je tvořena elementy a uzly. Každý uzel má své parametry (číslo, souřadnice a stupeň volnosti). Elementy rozdělují geometrický model na jednotlivé základní oblasti. Jejichž parametry jsou číslo, interpolace, integrační body a materiálové vlastnosti. Vytvořenou síť lze následně modifikovat, např. zahustit v problematických místech. Obecně se dá říci, že získané výsledky z analýzy jsou závislé na hustotě a kvalitě sítě FEM modelu. Ovšem zahuštěním sítě docílíme přesnějších výsledku, ale vzroste počet uzlů a elementů. Tím se zvýší počet rovnic a také doba nutná k výpočtu. [14]



Obr. 18 Typy elementů [14]

12.5 Okrajové podmínky

Při definici okrajových podmínek jsou FEM modelu odebrány stupně volnosti a jsou mu přiřazovány různé druhy zatížení. Modely mohou být zatěžovány:

- Mechanicky (síla, tlak, moment)
- Teplotně (teplota, teplotní to)
- Elektromagnetické
- Magnetické
- Akustické

13 VÝPOČET (SOLVER)

Jak již bylo řečeno, výpočet se provádí pomocí metody konečných prvků. Je to numerická metoda pro analýzu struktur a těles. Touto metodou lze řešit problémy, které klasickými postupy nelze úspěšně řešit. Metoda pokrývá celou škálu fyzikálních aplikací: statika, dynamika, akustika, teplo, elektromagnetické pole, elektrostatika, piezoelektrické jevy a proudění. Tyto problémy lze řešit soustavou lineárních rovnic, při jejichž konstrukci a řešení se využívá výpočetní techniky. [15]

Pro lineární analýzu je diskretizovaný slabý tvar řídicích rovnic pro:

$$K \cdot d = f_{ext} \quad (37)$$

Můžeme také zapsat takto:

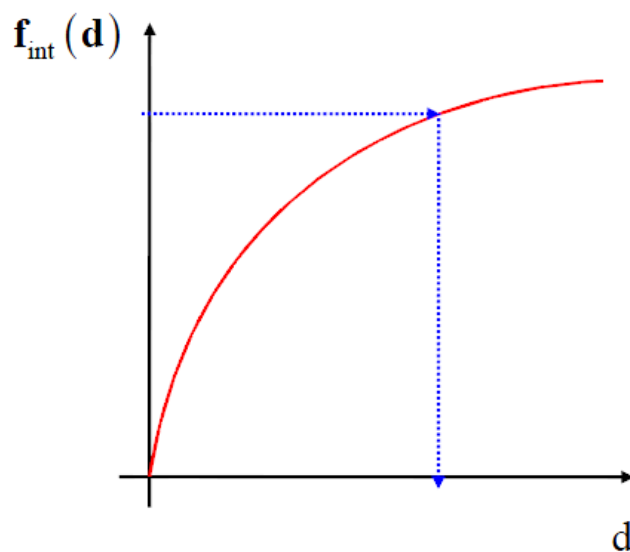
$$f_{int} = f_{ext} \quad (38)$$

f_{ext} – vektor uzlových sil od zatížení povrchovými a objemovými silami

f_{int} – vektor uzlových sil ekvivalentních napětí působících v prvcích

Je-li úloha materiálově anebo geometricky nelineární, pak vztah mezi globálními vektory uzlových sil f_{int} a uzlových posunů d je nelineární: [16]

$$f_{int}(d) = f_{ext} \quad (39)$$



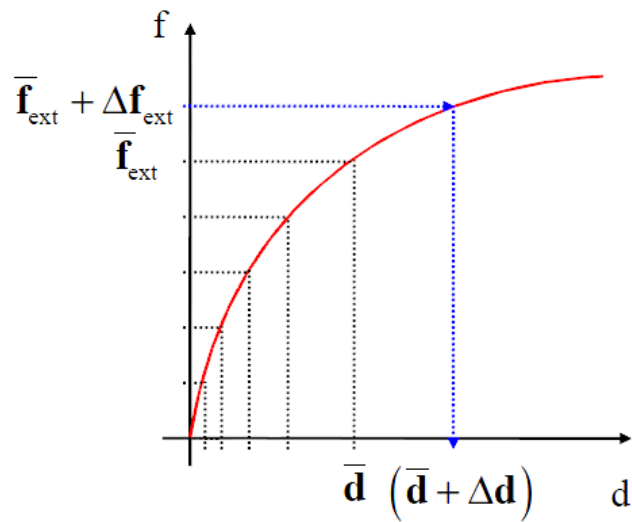
Obr. 19 Zobrazení uzlového posunu [16]

Úlohu je pak řešena po časových (zatěžovacích) krocích (přírůstcích). Předpokládejme, že řešení v kroku t je známo, např. z předchozího výpočtu. [16]

$$f_{\text{int}}(\bar{d}) = \bar{f}_{\text{ext}} \quad (40)$$

Po inkrementální změně zatížení:

$$f_{\text{int}}(\bar{d} + \Delta d) = \bar{f}_{\text{ext}} + \Delta f_{\text{ext}} \quad (41)$$



Obr. 20 Inkrementální změna zatížení [16]

14 POSTPROCESSOR

V této fázi dochází k zobrazení výsledků analýzy. Jelikož ve druhé fázi byly výsledky v podobě číselných hodnot. Výsledky analýzy mohou být prezentovány jako:

- deformace těles vystavených mechanickému nebo teplotnímu zatížení.
- Síly nutné k dosažení požadované tvarové změny.
- Tuhost dané součásti.
- Módy a frekvence přirozeného kmitání těles.
- Napětí v daném tělese

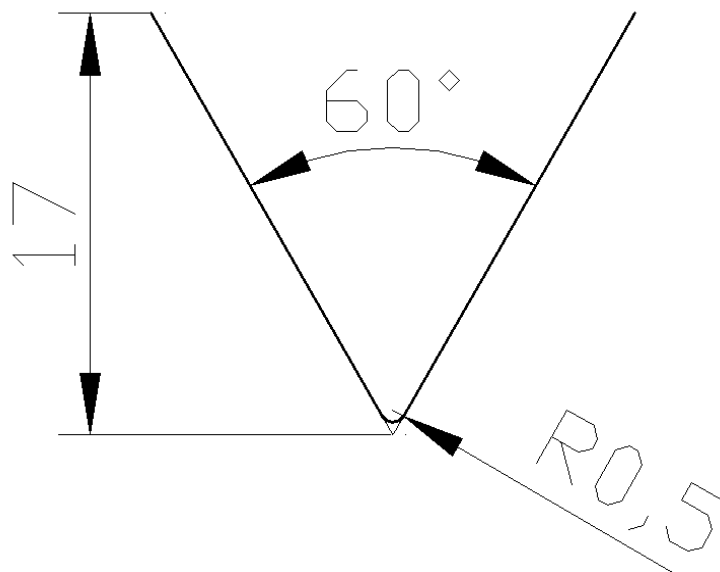
Na základě výsledků analýzy lze usoudit, jestli analyzované součást odpovídá konstrukčním požadavkům. Pokud výsledky neodpovídají konstrukčním požadavkům, tak se analýza vrací do první fáze (preprocesor), kde dojde k úpravě nastavení analýzy, nebo dojde k změně geometrie FEM modelu.

15 NASTAVENÍ 2D ANALÝZY

Analýza musí být nastavena tak, aby co nejpřesněji popisovala řešený problém. Protože je zkušební těleso z elastomeru (hyperelastické vlastnosti) jedná se o nelineární analýzu. Nelinearita se dále projevuje v tom, že dochází ke kontaktu (tuhé těleso x deformovatelné těleso). Z důvodu urychlení výpočtu a menších nároků na výpočetní hardware lze volit 2D analýzy, pokud je toto řešení možné a dostačující. Jelikož zkušební těleso má válcový průřez o konstantní tloušťce lze jej zjednodušit na 2D analýzu.

15.1 Úprava geometrie břitu

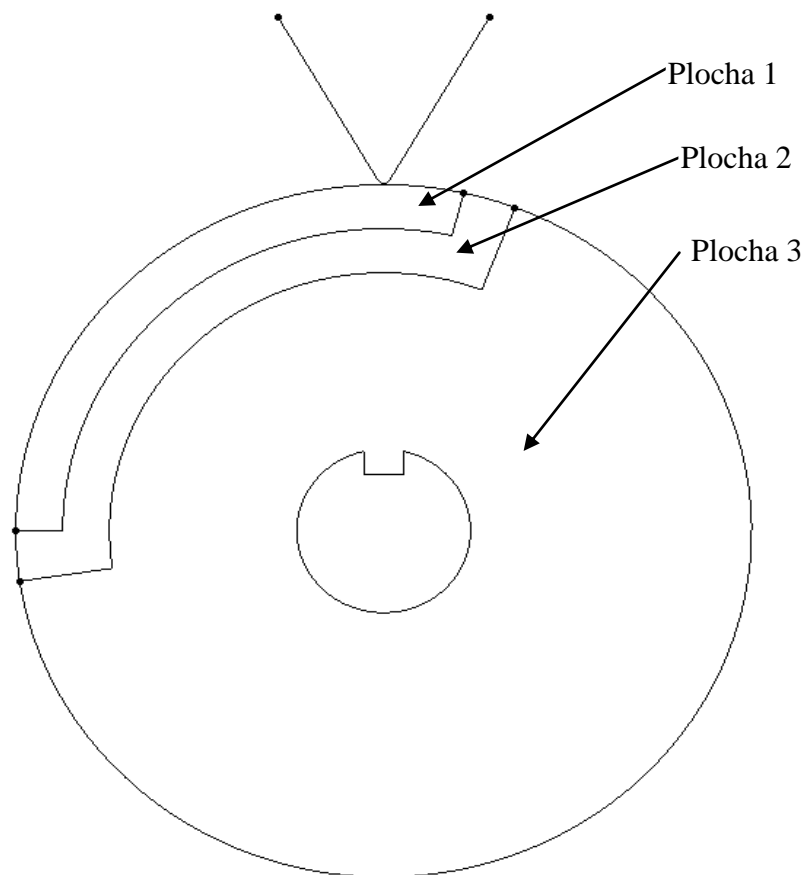
Při zkoušce opotřebení elastomeru se používá keramický břit s nezaoblenou špičkou. Ovšem pro řešení tohoto problému pomocí metody konečných prvků muselo dojít k zaoblení břitu, jelikož by tento problém byl z matematického hlediska neřešitelný. Z obr. 21 lze vyčíst, že došlo k zaoblení špičky břitu, zbytek geometrie břitu zůstal nezměněný.



Obr. 21 Geometrie břitu

15.2 Geometrie 2D modelu

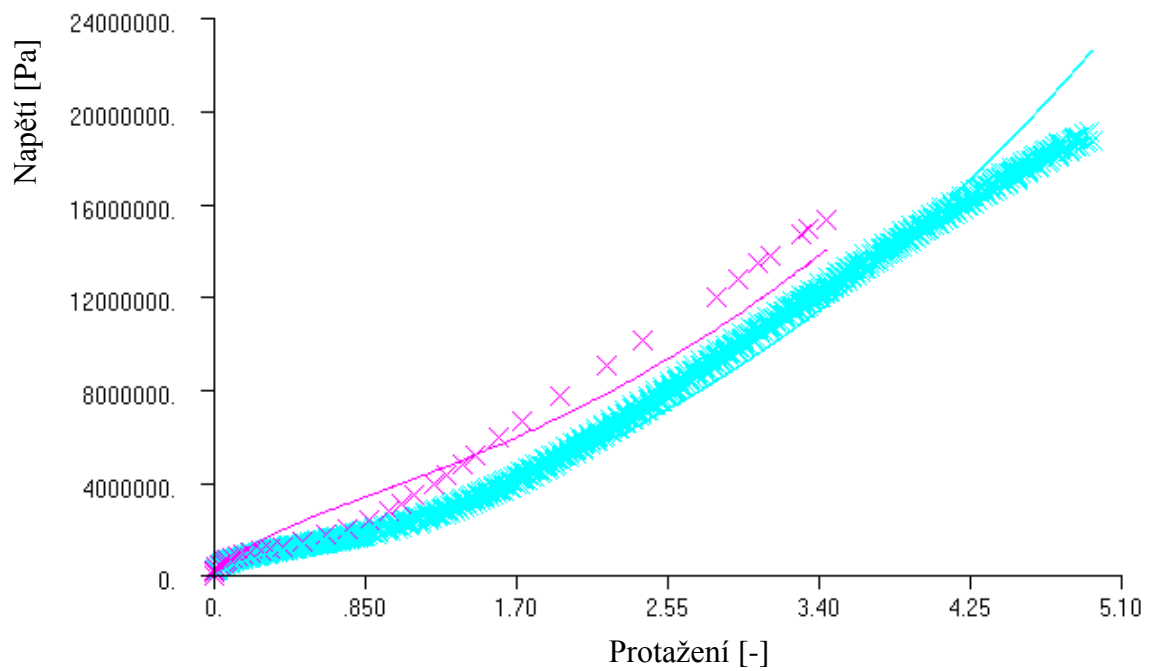
Podle rozměrů zkušebního tělesa a zatěžujícího hrotu byl vytvořen náčrt v programu Catia V5R18, který byl následně uložen jako soubor IGS. Po té byl importován do programu MSC Patran, kde byly z importovaných křivek vytvořeny plochy, jak je znázorněno na obr. 22.



Obr. 22 Nákres modelu v programu Catia V5R18

15.3 Materiálové vlastnosti 2D modelu

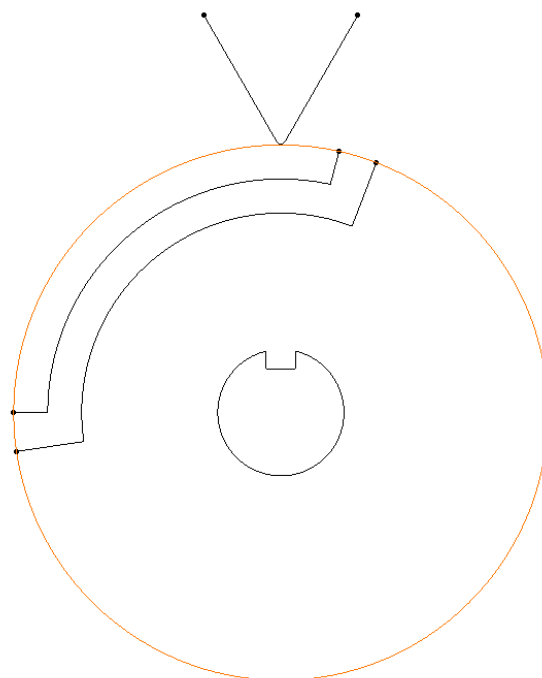
Pro popis materiálových vlastností byly použity data z jednoosé a dvojosé zkoušky. Tyto datové soubory pak byly načteny a v programu MSC Patran a byl k nim přiřazen hypereplastický model, který nejlépe popisuje vlastnosti daného materiálu. Jelikož si program spočítá, s jakou přesností daný hyperplastický model popisuje experimentální data. Nejpřesněji popisuje materiálové vlastnosti hyperplastický model Ogden. Jak můžeme vidět na obr. 23. tak růžově je znázorněn dvojosý tah a modře jednoosý tah. Experimentální data jsou znázorněna pomocí křížků. Po té jsou tyto materiálové vlastnosti přiděleny k daným plochám a jsou navoleny jako 2D solid.



Obr. 23 Porovnání experimentálních hodnot z hodnoty hyperplastického modelu

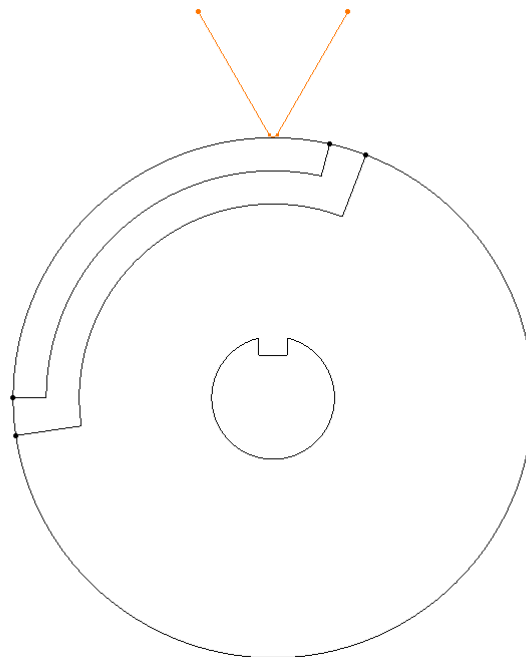
15.4 Okrajové podmínky 2D modelu

Při zkoušce opotřebení elastomeru dochází kmitavému pohybu břitu, který je zatlačován do zkušební vzorku. Proto musí být vytvořena vazba kontakt. Kdy zkušební těleso je definováno jako deformovatelné těleso.



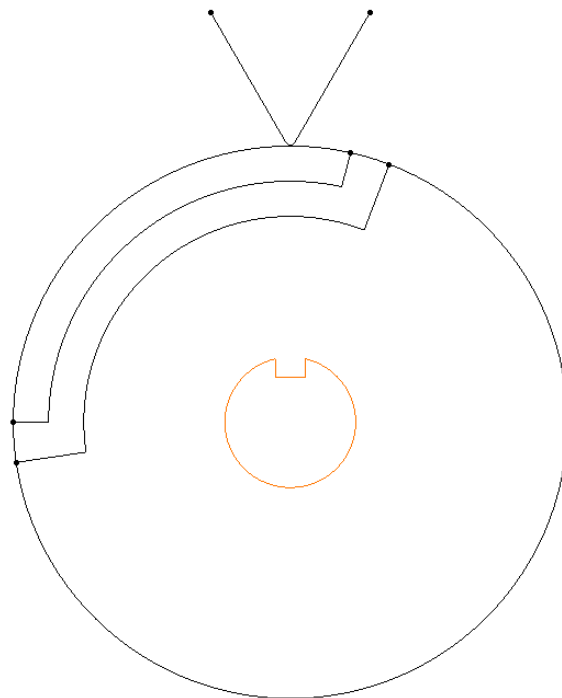
Obr. 24 Označení deformovatelného tělesa

Břit je definován jako tuhé těleso, tím že jsou vybrány křivky, které tvoří geometrii břitu a je zadán přímočarý pohyb v ose x do hloubky 3mm.



Obr. 25 Označení tuhého tělesa

Dále jako tuhé těleso je definována vnitřní díra ve zkušebním tělese s rotačním pohybem, jenž nedovoluje pohyb posunutí v ose x , y a z .



Obr. 26 Označení tuhého tělesa

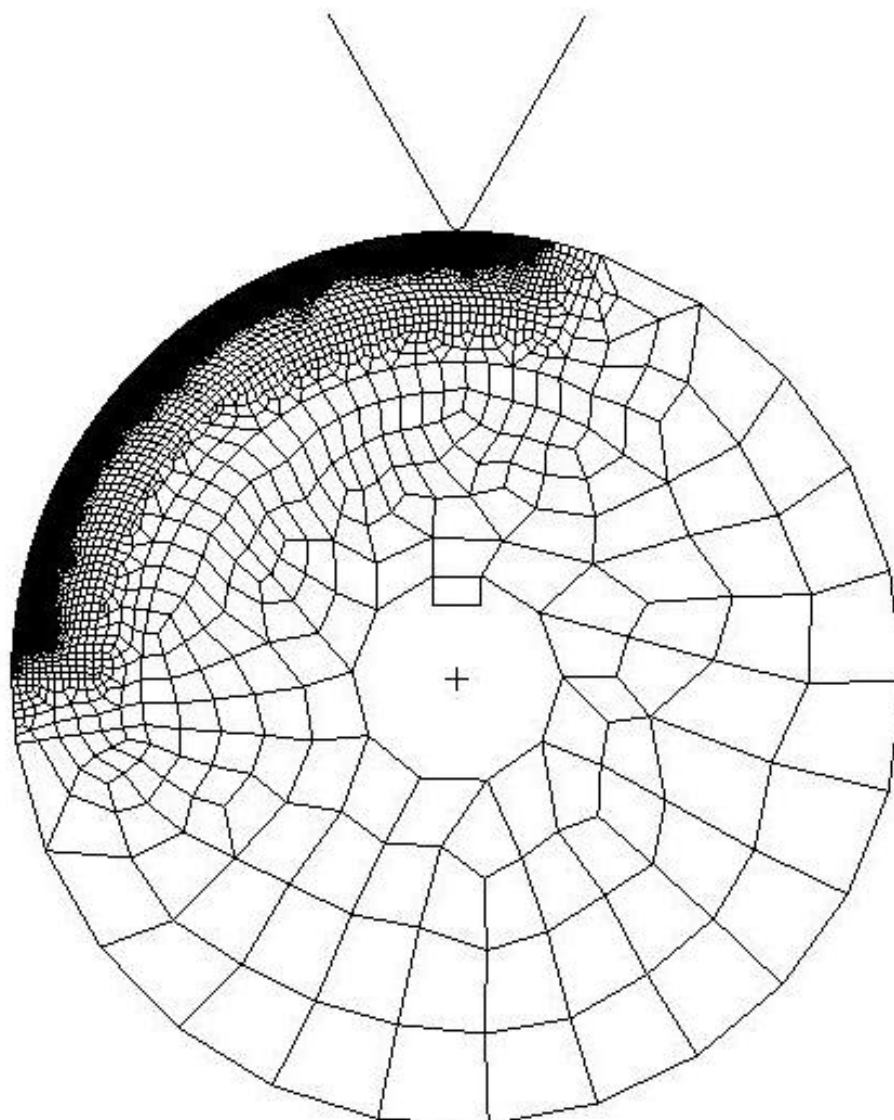
Aby docházelo otáčení celého zkušebního vzorku a ne pouze vnitřní díra muselo dojít ke změně v nastavení analýzy a to konkrétně v tabulce kontaktů. Kdy se vztah mezi vazbou deformable body zkušebního vzorku a rigid body vnitřní díry změnil na *glue* místo *touch*.

	1 - Deformable body	2 – rigid body	3 – rigid body
1 - Deformable body		T (touch)	G (glue)
2 – rigid body (hrot)	T (touch)		
3 – rigid body (díra)	G (glue)		

Obr. 27 Tabulka vazeb kontakt

15.5 Vysít'ování 2D modelu

Po té co byla vytvořena geometrie, materiálové vlastnosti a okrajové podmínky, mohlo dojít k vysít'ování modelu. Aby nedocházelo k chybám při výpočtech, musela být síť v místě kontaktu s břitem zjemněna a břit musel být zaoblen. Pro zjednodušení zjemňování sítě, je zkušební těleso rozděleno na tři plochy. Plocha, která není v žádném kontaktu s břitem, je tvořena čtyřhrannými elementy. Jak je patrné z obr. 28, tak plocha 1 je tvořena největšími elementy, kdy plocha bližší místu kontaktu s břitem má velikost elementů menší. Na ploše 3, kde dochází k přímému kontaktu břitu se zkušebním tělesem, jsou elementy sítě nejmenší. Zde také byly okrajové elementy sítě rozděleny ještě na menší, aby nedošlo k zachycení uzlového bodu sítě hrotem, což by vedlo k chybnému výpočtu analýzy nebo k jejímu přerušení. Kdyby nedošlo pouze k lokálnímu zjemnění sítě, došlo by k podstatnému prodloužení výpočetní doby analýzy vzhledem k nárůstu počtu elementů tvořících model.



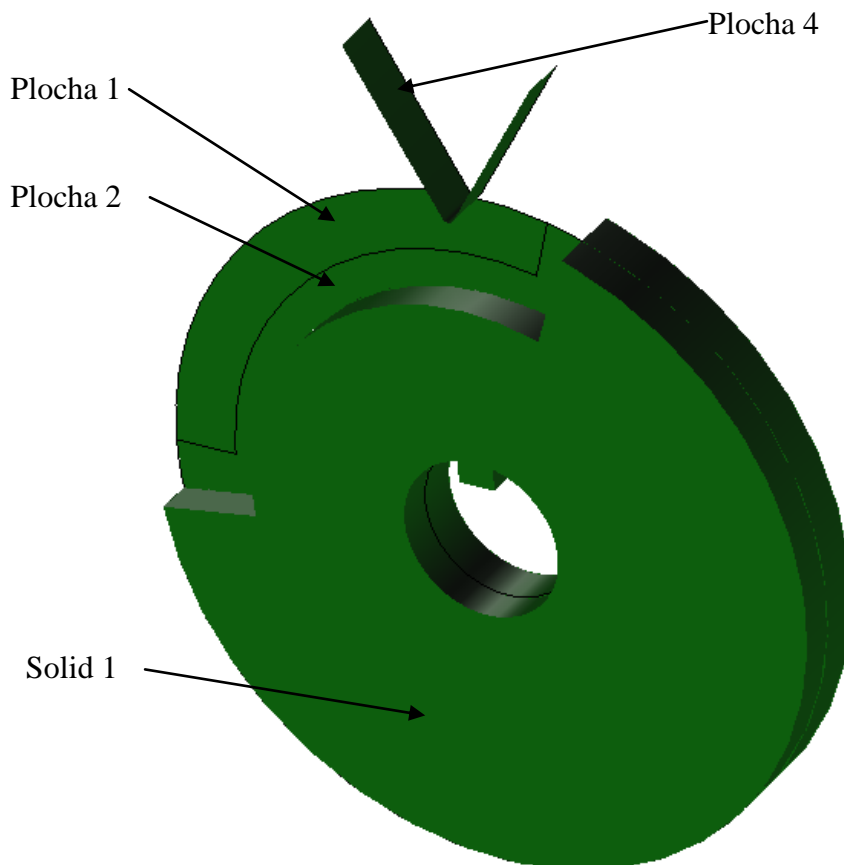
Obr. 28 Vysíťovaný 2D model v programu MSC Patran

16 NASTAVENÍ 3D ANALÝZY

Nastavení 3D analýzy je podobné jako 2D analýzy. 3D analýza se používá v případech, kdy není možnost použít 2D analýzu nebo v případě kdy vyžadujeme podrobnější výsledky daného problému. Jelikož je 3D analýza složitější z hlediska časové a hardwarové náročnosti. Bylo u 3D modelu využito geometrické symetrie daného modelu a byla řešena pouze polovina zkušebního tělesa.

16.1 Geometrie 3D modelu

Stejně jako u 2D modelu byla geometrie modelu importována z programu Catia V5R18 v souboru IGS. V programu MSC Patran byly vytvořeny plochy 1, 2, 3 a 4. Následně pak z plochy 3 byl vytvořen pomocí příkazu vysunout solid 1.



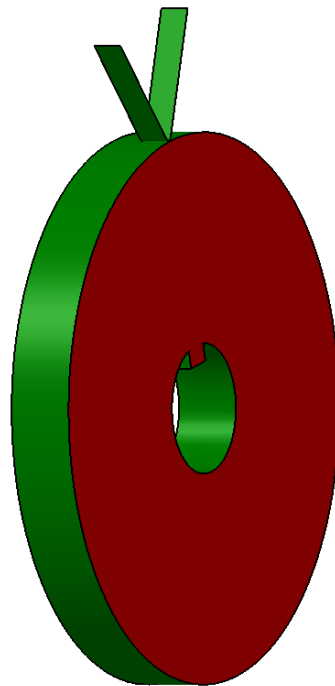
Obr. 29 Nákres 3D modelu v programu MSC Patran

16.2 Materiálové vlastnosti 3D modelu

Obdobně jako pro popis materiálových vlastností 2D modelu, byly použity data z jednoosé a dvojosé zkoušky. Materiálové vlastnosti byly přiřazeny k elementům a jsou navoleny jako 3D solid.

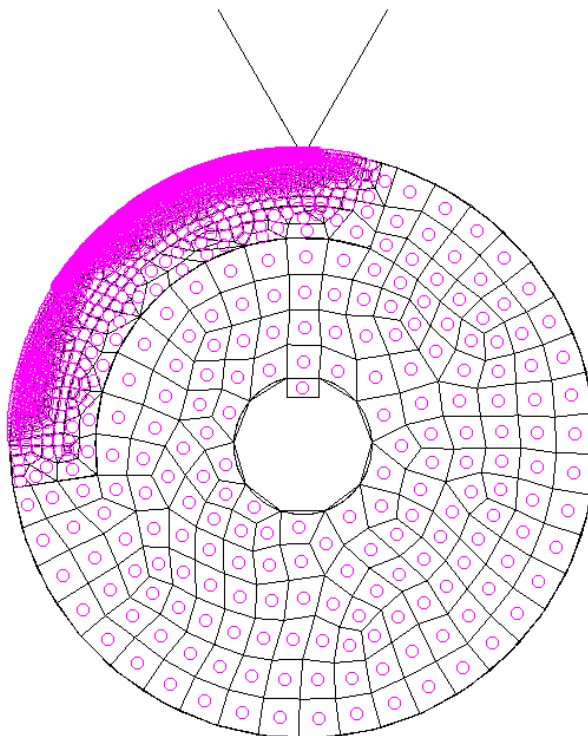
16.3 Okrajové podmínky 3D modelu

Jelikož je 3D model řešen z hlediska geometrické symetrie musí být v okrajových bodech elementů umístěna vazba, která zabrání posunutí v ose z.



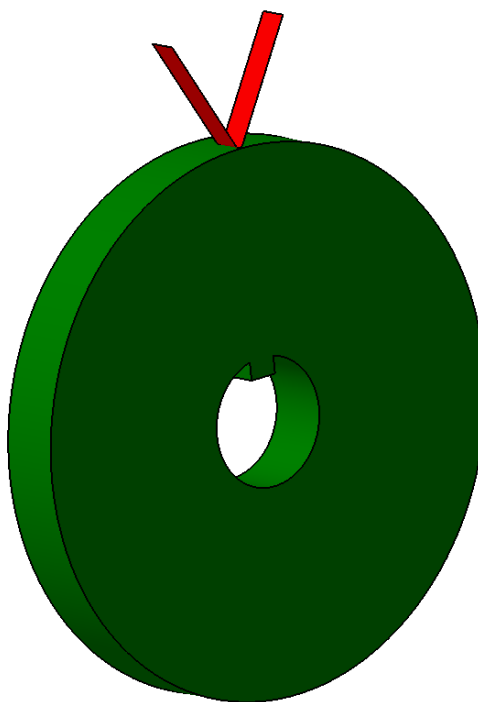
Obr. 30 Označení okrajových bodů ve 3D modelu

Dále musí být nastavena vazba kontakt. Nejprve dochází k nastavení neformovatelného tělesa, u nějž nebyla vybrána geometrie modelu nýbrž materiálové vlastnosti elementů tvořících model.



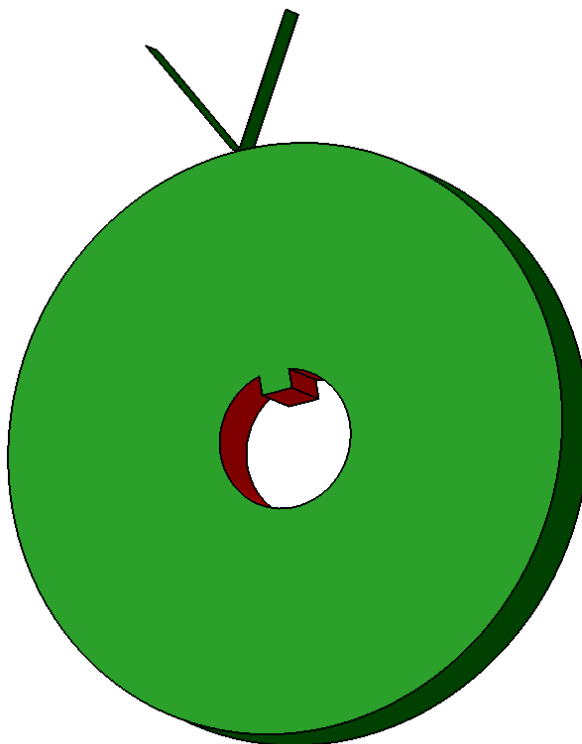
Obr. 31 Označení elementů ve 3D modelu

U definice rigid body byla vybrána plocha tvořící hrot, u které se nadefinoval pohyb v ose y .



Obr. 32 Označení plochy hrotu ve 3D modelu

Aby se docílilo rotačního pohybu zkušební tělesa, byly vybrány plochy, které jsou označeny na obr. 33. Byly odebrány stupně volnosti a navolen rotační pohyb kolem osy z.



Obr. 33 Označení ploch díry ve 3D modelu

Stejně jako u ve 2D modelu muselo, při nastavení analýzy dojít k úpravě vztahu mezi vazbou díry zkušební tělesa a samotným zkušebním tělesem jako je uvedeno na obr. 27.

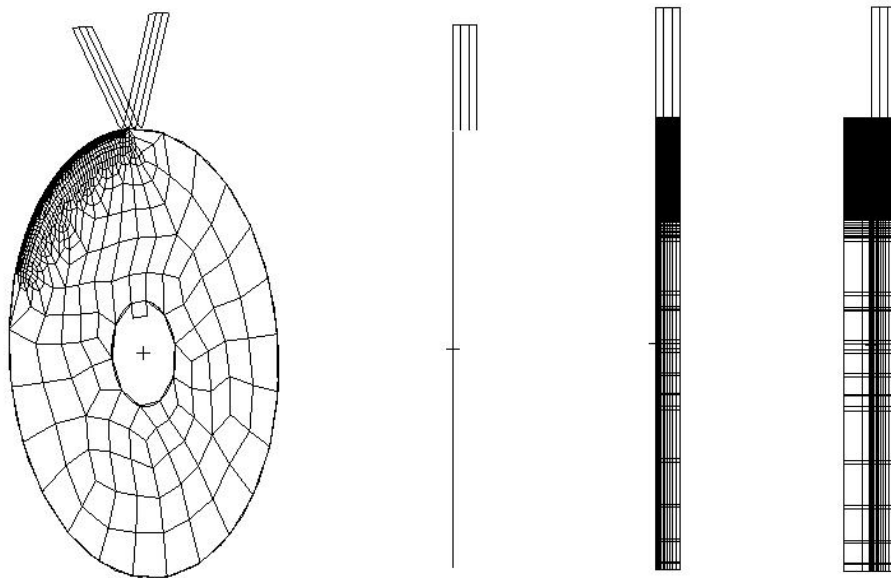
16.4 Vysítování 3D modelu

Síť 3D modelu byla vytvořena z již vysítovaného 2D modelu, pomocí příkazu tažení (extrude). Dále bylo nastaveno, aby síť byla zahuštěná v jednom směru. Při tomto nastavení se zadával počet elementů ve směru tažení a poměr délky posledního elementu L_2 k délce prvního elementu L_1 , jak je patrné z obr 34.

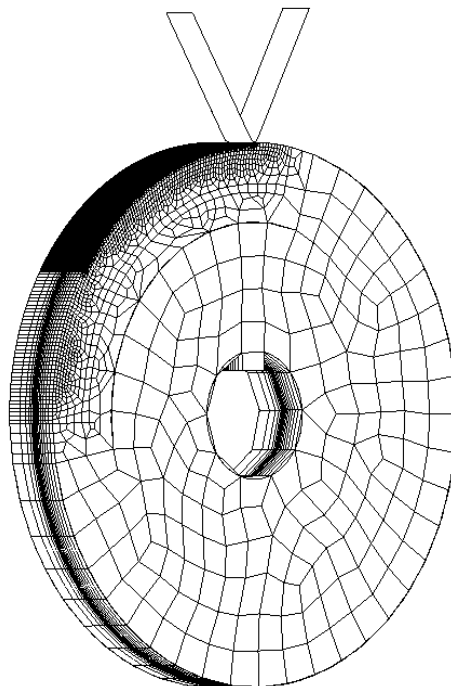


Obr. 34 Zobrazení délky elementu

Nejprve došlo k vytažení 2D sítě pod břitem, kdy délka elementu narůstala od konce břitu, jak je patrné z obr. 35. Stejně tak i v opačném směru osy z a zde již byl nastaven menší počet elementů ve směru tažení, jelikož tato část zkušebního tělesa již není zatížena břitem.



Obr. 35 Postup síťování 3D modelu



Obr. 36 Vysíťovaný 3D model

17 2D ANALÝZA – VARIANTA 1

V této variantě analýzy docházelo k postupnému zatlačování břitu do zkušební tělesa za současného otáčení zkušební tělesa. Nejprve se ve výpočtu analýzy nezohledňovalo tření mezi břitem a zkušebním tělesem. Dále byla analýza modifikována tak, že se u ní měnil koeficient smykového tření od nulové hodnoty do hodnoty 0,4.

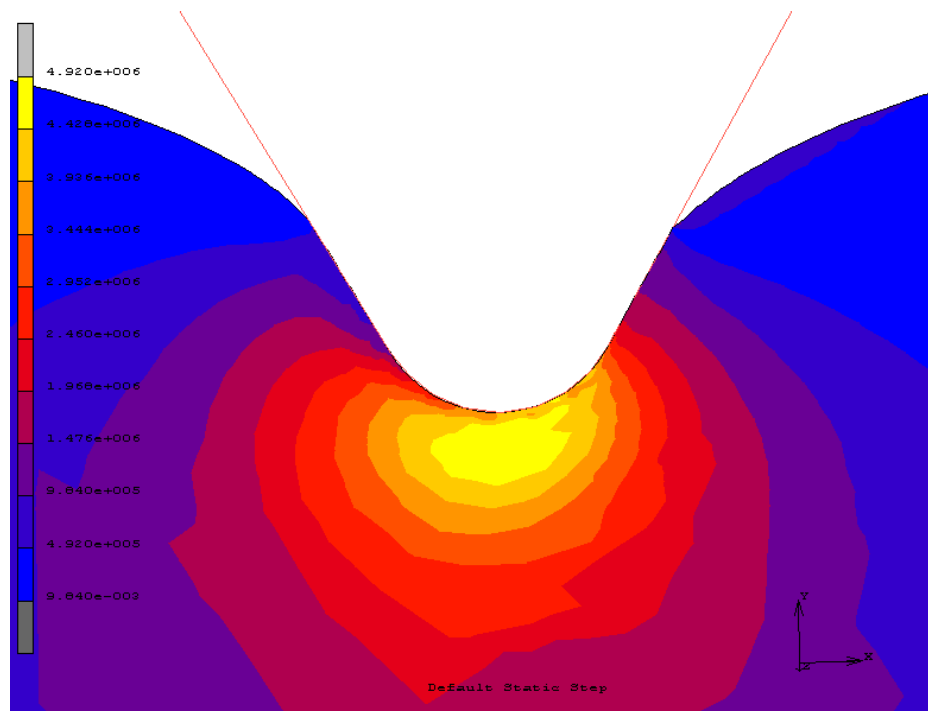
Smykové tření je definováno, jako tření mezi tělesy při jejich posuvném pohybu. Vzniká třecí síla o velikosti:

$$F_T = f \cdot F_N \quad (42)$$

Kde f je součinitel smykového tření a F_N je kolmá tlaková síla mezi tělesy.

17.1 2D analýza bez koeficientu tření– varianta 1

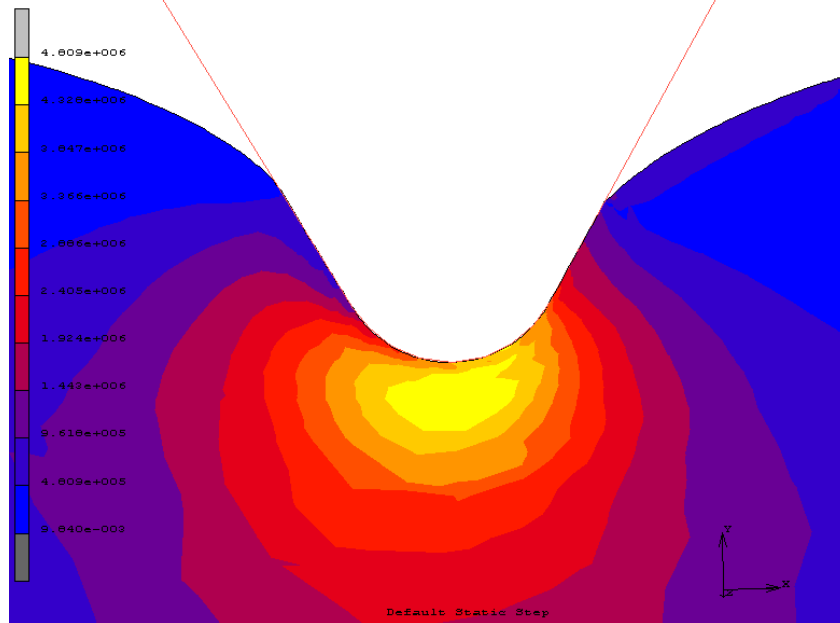
Obrázek 37 zachycuje výsledek 2D analýzy, u které byl nastaven koeficient smykového tření nulový. Výsledná hodnota Von Missesova napětí u této analýzy byla 4,92MPa.



Obr. 37 Průběh 2D analýzy – varianta 1

17.2 2D analýza koeficient smykového tření 0,05– varianta 1

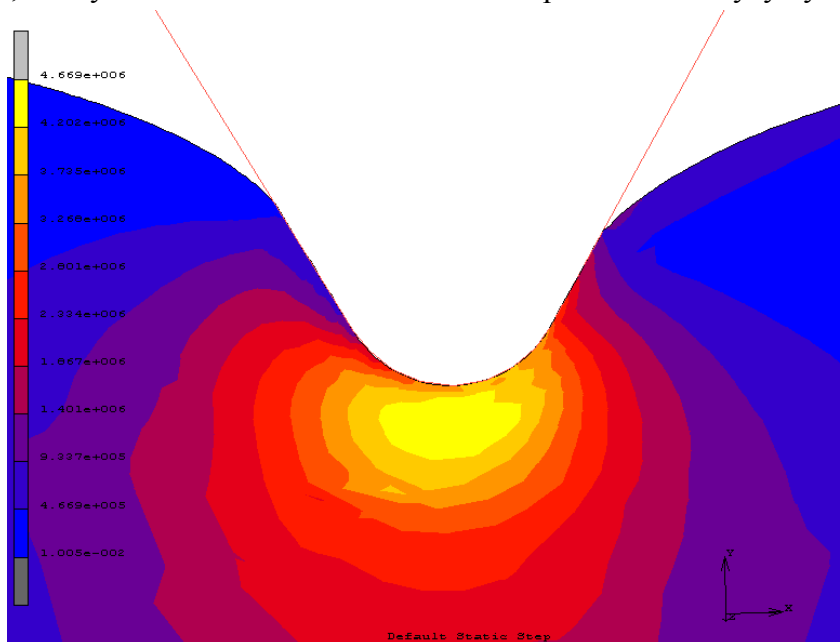
Obr. 38 zachycuje výsledek 2D analýzy, u které byl nastaven koeficient smykového tření na hodnotu 0,05. Výsledná hodnota Von Missesova napětí u této analýzy byla 4,809MPa.



Obr. 38 Průběh 2D analýzy – varianta 1

17.3 2D analýza koeficient smykového tření 0,1– varianta 1

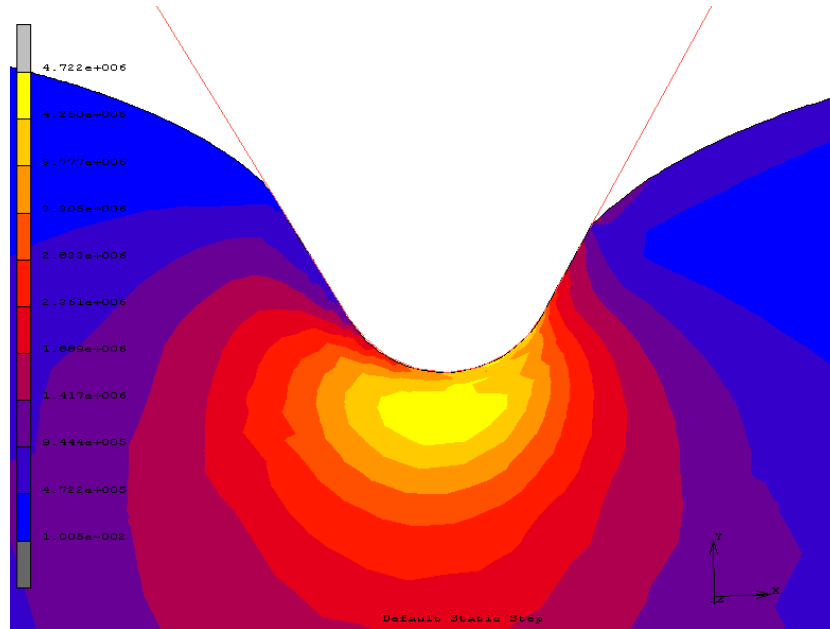
Obr. 39 zachycuje výsledek 2D analýzy, u které byl nastaven koeficient smykového tření na hodnotu 0,10. Výsledná hodnota Von Missesova napětí u této analýzy byla 4,669MPa.



Obr. 39 Průběh 2D analýzy – varianta 1

17.4 2D analýza koeficient smykového tření 0,15 – varianta 1

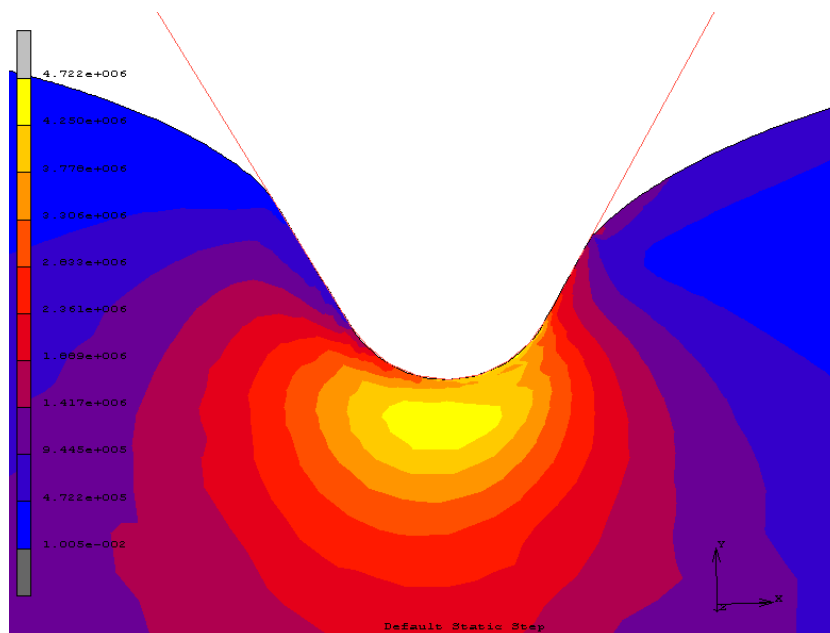
Obr. 40 zachycuje výsledek 2D analýzy, u které byl nastaven koeficient smykového tření na hodnotu 0,15. Výsledná hodnota Von Missesova napětí u této analýzy byla 4,722MPa.



Obr. 40 Průběh 2D analýzy – varianta 1

17.5 2D analýza koeficient smykového tření 0,2 – varianta 1

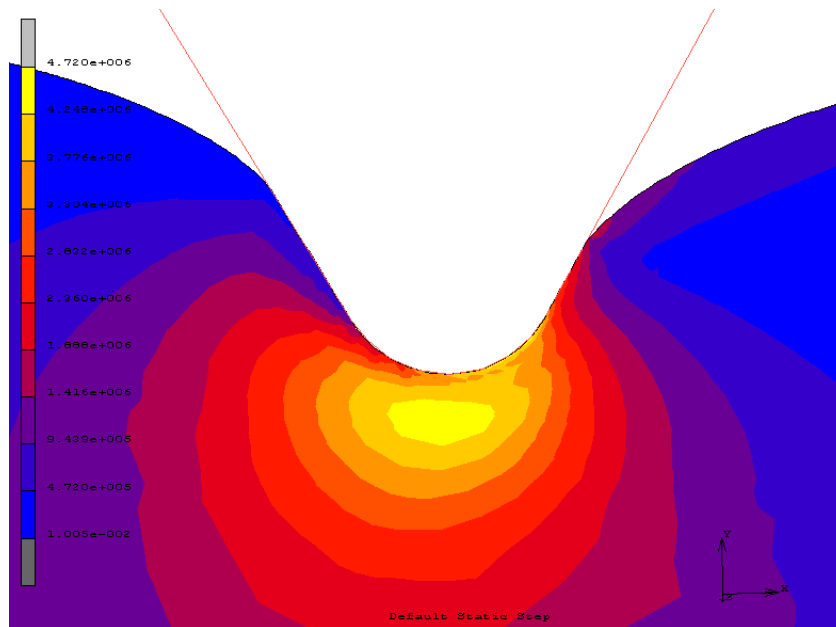
Obr. 41 zachycuje výsledek 2D analýzy, u které byl nastaven koeficient smykového tření na hodnotu 0,20. Výsledná hodnota Von Missesova napětí u této analýzy byla 4,722MPa.



Obr. 41 Průběh 2D analýzy – varianta 1

17.6 2D analýza koeficient smykového tření 0,25 – varianta 1

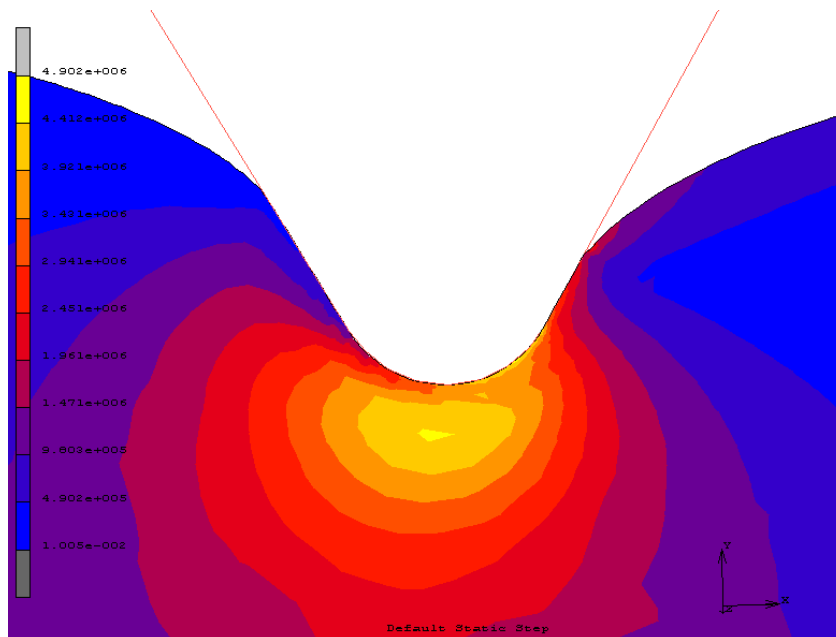
Obr. 42 zachycuje výsledek 2D analýzy, u které byl nastaven koeficient smykového tření na hodnotu 0,25. Výsledná hodnota Von Missesova napětí u této analýzy byla 4,720MPa.



Obr. 42 Průběh 2D analýzy – varianta 1

17.7 2D analýza koeficient smykového tření 0,3 – varianta 1

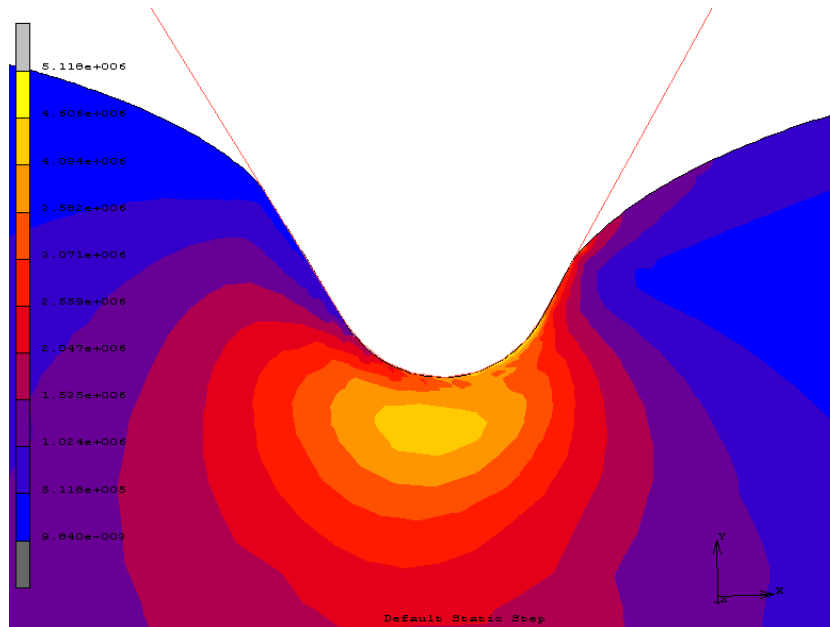
Obr. 43 zachycuje výsledek 2D analýzy, u které byl nastaven koeficient smykového tření na hodnotu 0,30. Výsledná hodnota Von Missesova napětí u této analýzy byla 4,902MPa.



Obr. 43 Průběh 2D analýzy – varianta 1

17.8 2D analýza koeficient smykového tření 0,35 – varianta 1

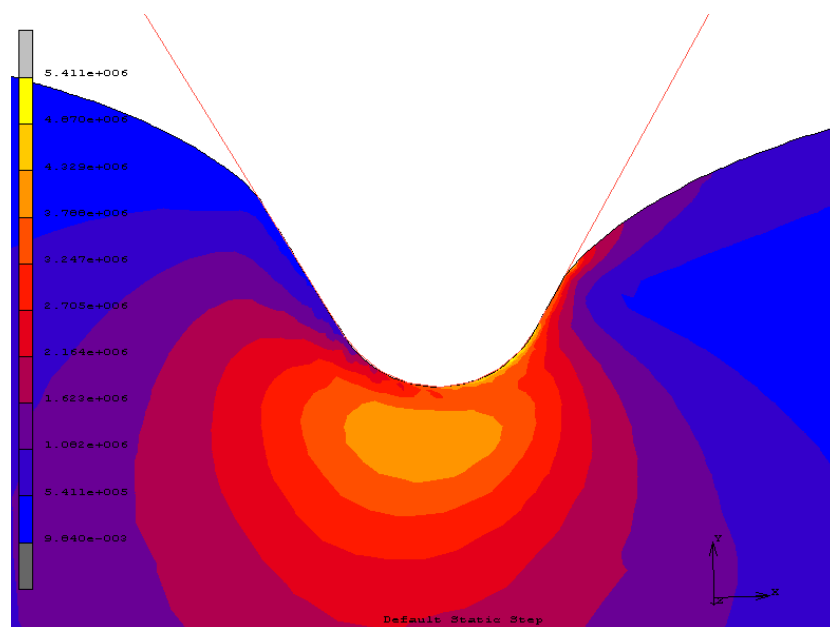
Obr. 44 zachycuje výsledek 2D analýzy, u které byl nastaven koeficient smykového tření na hodnotu 0,35. Výsledná hodnota Von Missesova napětí u této analýzy byla 5,118MPa.



Obr. 44 Průběh 2D analýzy – varianta 1

17.9 2D analýza koeficient smykového tření 0,4 – varianta 1

Obr. 45 zachycuje výsledek 2D analýzy, u které byl nastaven koeficient smykového tření na hodnotu 0,40. Výsledná hodnota Von Missesova napětí u této analýzy byla 5,411MPa.



Obr. 45 Průběh 2D analýzy – varianta 1

18 VYHODNOCENÍ 2D ANALÝZY – VARIANTA 1

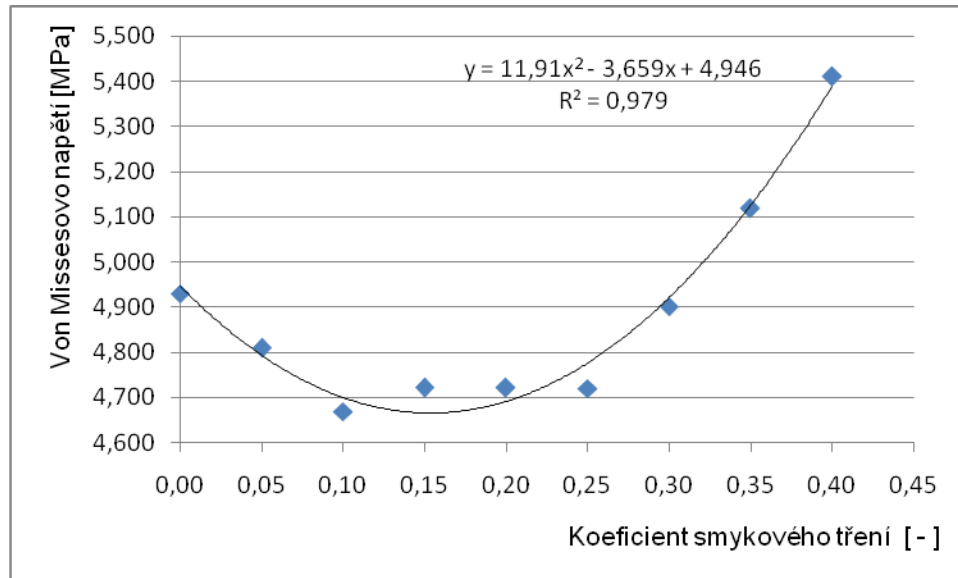
Pro vyhodnocení vlivu koeficientu smykového tření na Von Missesovo napětí, byla analýza nastavena tak, že současně probíhal pohyb bříty a zkušebního tělesa. Na obr. 46 jsou vyneseny hodnoty Von Missesova napětí v závislosti na koeficientu smykového tření. Průběh vlivu koeficientu smykového tření byl popsán pomocí polynomické funkce druhého řádu.

Z tabulky 1 lze vyčíst, že nejprve dochází k poklesu hodnot Von Missesova napětí se zvyšujícím se koeficientem smykového tření, až po její hodnotu 0,10. Kdy od hodnoty smykového tření 0,15 se hodnota Von Missesova napětí téměř nemění, zůstává stejná na hodnotě 4,722MPa. Od hodnoty smykového tření 0,3 se dochází k prudkému nárůstu Von Missesova napětí se zvyšujícím se koeficientem smykového tření. Při hodnotě smykového tření 0,4 je hodnota Von Missesova napětí 5,411MPa.

Z obr. 37 můžeme vyčíst, že největší koncentrace napětí se objevuje pod zaoblenou špičkou bříty do určité hloubky. Se zvyšujícím se koeficientem smykového tření se snižovala hloubka, do které se soustředilo napětí. Kdy od koeficientu smykového tření 0,35 bylo největší napětí soustředěno do povrchu místa kontaktu bříty se zkušebním vzorkem. Jelikož průběh vlivu koeficientu smykového tření na napětí neposkytl předpokládané výsledky, bylo přistoupeno k další variantě analýzy.

Tab. 1 Hodnoty napětí

Koeficient tření [-]	Napětí [Mpa]
0,00	4,930
0,05	4,809
0,10	4,669
0,15	4,722
0,20	4,722
0,25	4,720
0,30	4,902
0,35	5,118
0,40	5,411



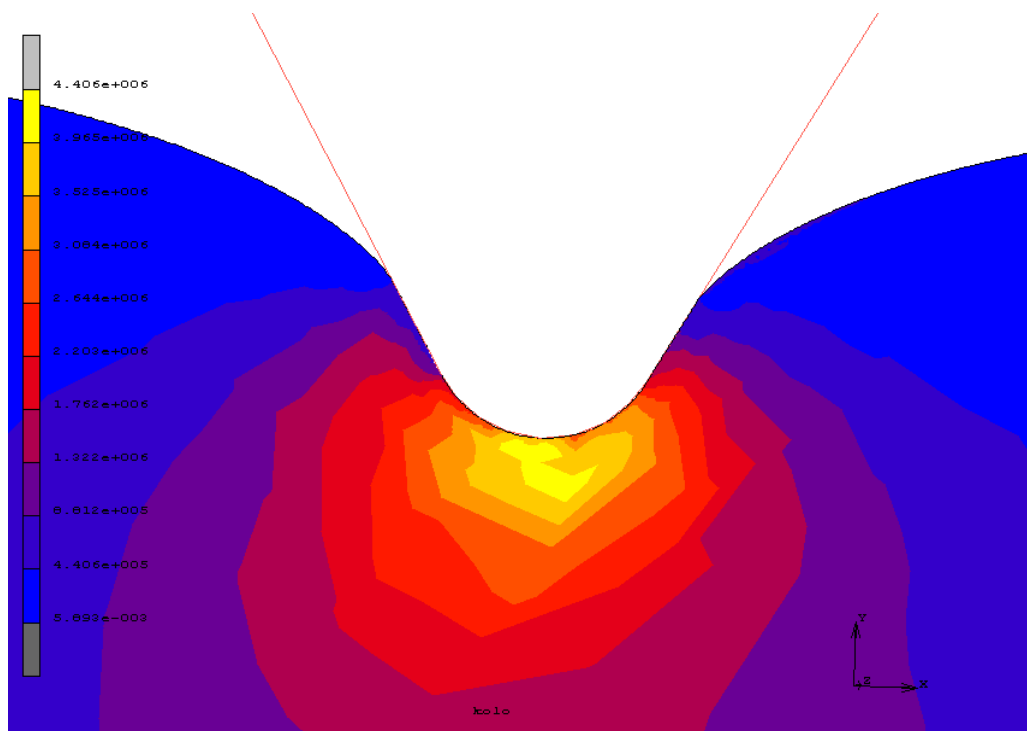
Obr. 46 Vliv koeficientu smykového tření na napětí

19 2D ANALÝZA – VARIANTA 2

Při této variantě 2D analýzy dochází nejdříve k zatlačení břitu do zkušebního tělesa až do hloubky 3mm, Po té dochází k rotačnímu pohybu zkušebního tělesa. U jednotlivých analýz této varianty bylo vybráno 12 hodnot Von Missesova napětí ve stejných časových krocích, od chvíle kdy byl břit zatlačen do požadované hloubky a byl zahájen rotační pohyb zkušebního tělesa. Z těchto 12 hodnot Von Missesova napětí byla vypočtena aritmetická průměrná hodnota Von Missesova napětí.

19.1 2D analýza bez tření – varianta 2

U této analýzy byl nastaven koeficient smykového tření na nulovou hodnotu. Na obr. 47 je zobrazena hodnota Von Missesova napětí, která se nejvíce přibližuje aritmetické průměrné hodnotě Von Missesova napětí zapsané v tabulce 2 a jejíž hodnota je 4,439MPa.



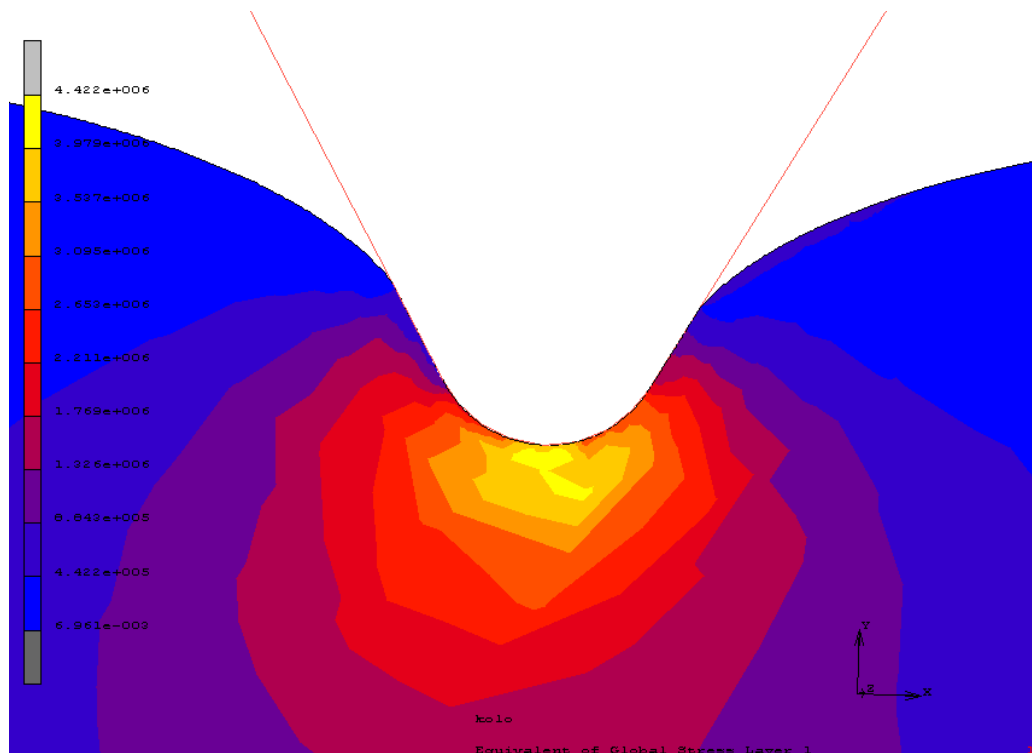
Obr. 47 Průběh 2D analýzy

Tab. 2 Hodnoty napětí

krok	napětí [MPa]	čas [s]
1	4,603	1,010
2	4,639	1,022
3	4,858	1,036
4	4,753	1,046
5	4,576	1,065
6	4,299	1,094
7	4,268	1,108
8	4,233	1,137
9	4,220	1,152
10	4,246	1,166
11	4,406	1,209
12	4,171	1,224
Průměr	4,439	

19.2 2D analýza koeficient smykového tření 0,05 – varianta 2

U této analýzy byl nastaven koeficient smykového tření na hodnotu 0,05. Na obr. 47 je zobrazena hodnota Von Misesova napětí, která se nejvíce přibližuje aritmetické průměrné hodnotě Von Misesova napětí zapsané v tabulce 3 a jejíž hodnota je 4,446MPa.



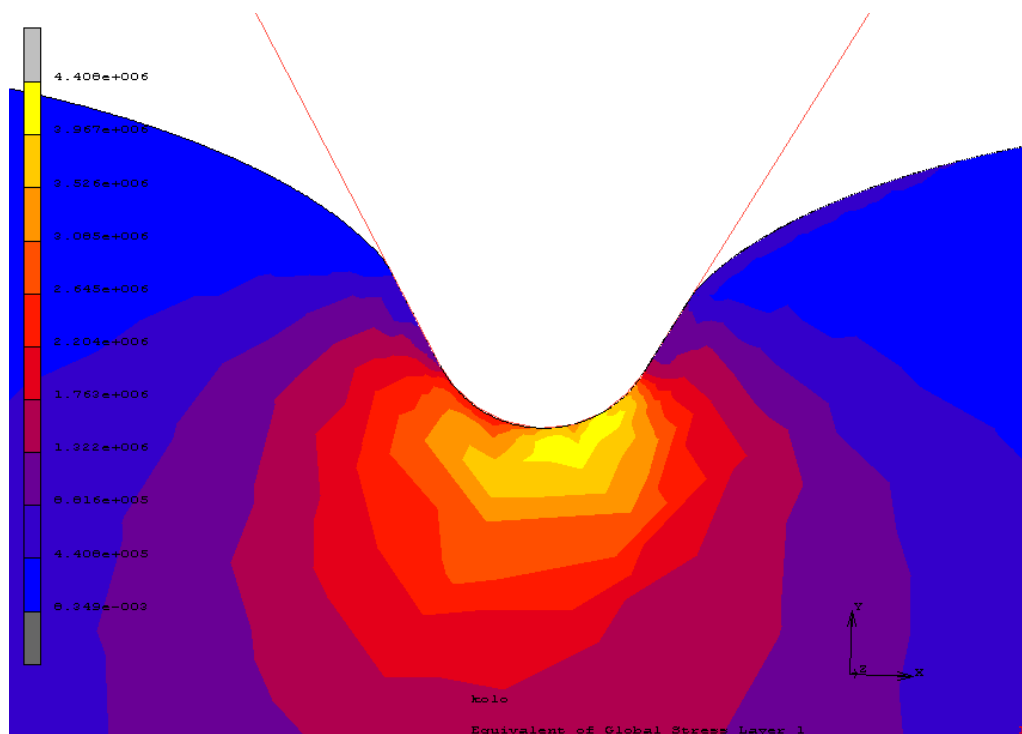
Obr. 48 Průběh 2D analýzy

Tab. 3 Hodnoty napětí

krok	napětí [MPa]	čas [s]
1	4,687	1,010
2	4,670	1,020
3	4,674	1,032
4	4,714	1,046
5	4,302	1,075
6	4,264	1,090
7	4,241	1,118
8	4,233	1,133
9	4,214	1,162
10	4,549	1,219
11	4,422	1,234
12	4,381	1,248
Průměr	4,446	

19.3 2D analýza koeficient smykového tření 0,1 – varianta 2

U této analýzy byl nastaven koeficient smykového tření na hodnotu 0,10. Na obr. 49 je zobrazena hodnota Von Missesova napětí, která se nejvíce přibližuje aritmetické průměrné hodnotě Von Missesova napětí zapsané v tabulce 3 a jejíž hodnota je 4,460MPa.



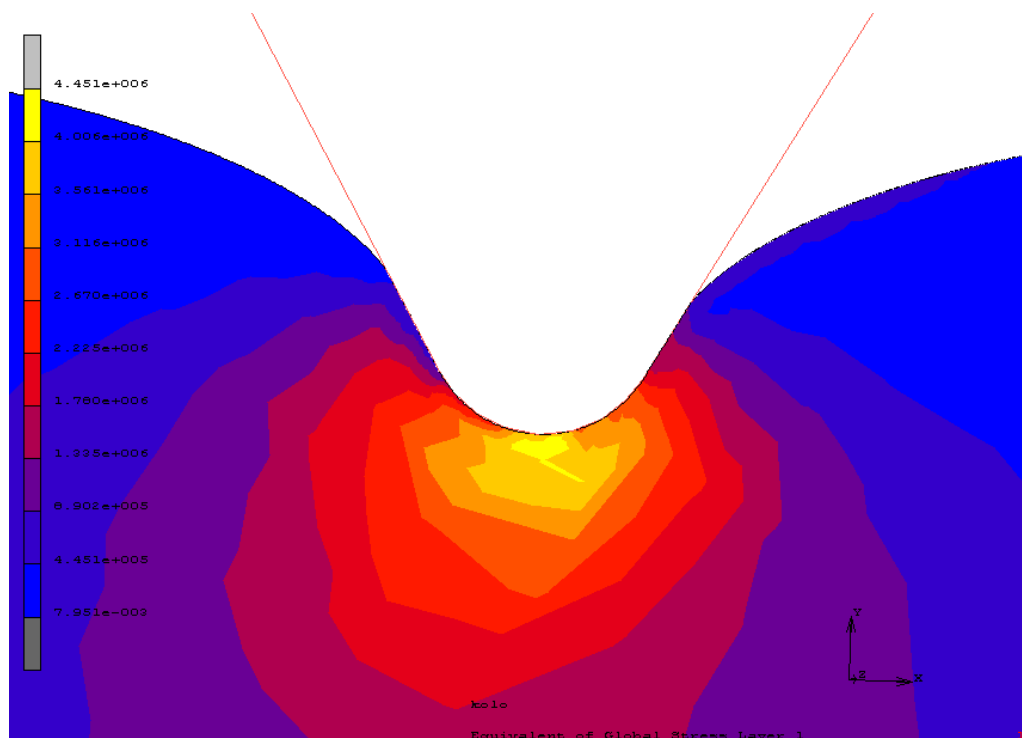
Obr. 49 Průběh 2D analýzy

Tab. 4 Hodnoty napětí

krok	napětí [MPa]	čas [s]
1	4,652	1,010
2	4,660	1,020
3	4,684	1,032
4	4,746	1,046
5	4,803	1,064
6	4,229	1,081
7	4,190	1,098
8	4,408	1,116
9	4,242	1,141
10	4,138	1,150
11	4,123	1,185
12	4,650	1,202
Průměr	4,460	

19.4 2D analýza koeficient smykového tření 0,15 – varianta 2

U této analýzy byl nastaven koeficient smykového tření na hodnotu 0,15. Na obr. 50 je zobrazena hodnota Von Missesova napětí, která se nejvíce přibližuje aritmetické průměrné hodnotě Von Missesova napětí zapsané v tabulce 5 a jejíž hodnota je 4,499MPa.



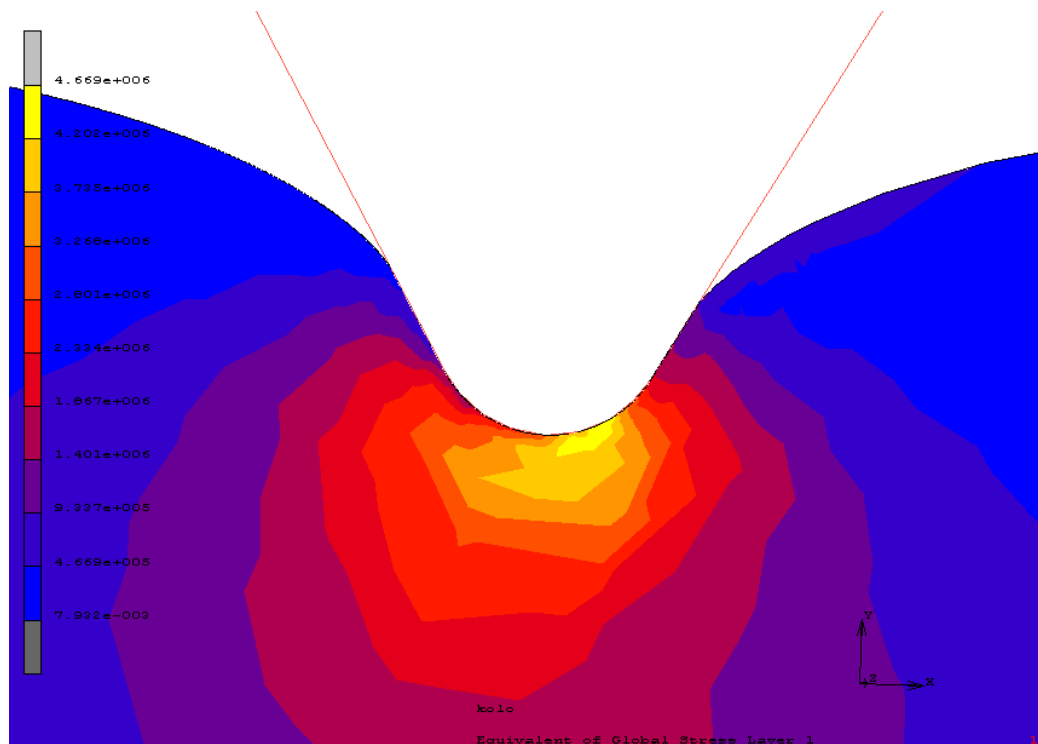
Obr. 50 Průběh 2D analýzy

Tab. 5 Hodnoty napětí

krok	napětí [MPa]	čas [s]
1	4,691	1,010
2	4,684	1,020
3	4,693	1,032
4	4,703	1,046
5	4,710	1,064
6	4,735	1,081
7	4,708	1,098
8	4,187	1,116
9	4,160	1,133
10	4,166	1,150
11	4,451	1,185
12	4,102	1,202
Průměr	4,499	

19.5 2D analýza koeficient smykového tření 0,2 – varianta 2

U této analýzy byl nastaven koeficient smykového tření na hodnotu 0,20. Na obr. 51 je zobrazena hodnota Von Misesova napětí, která se nejvíce přibližuje aritmetické průměrné hodnotě Von Misesova napětí zapsané v tabulce 6 a jejíž hodnota je 4,537MPa.



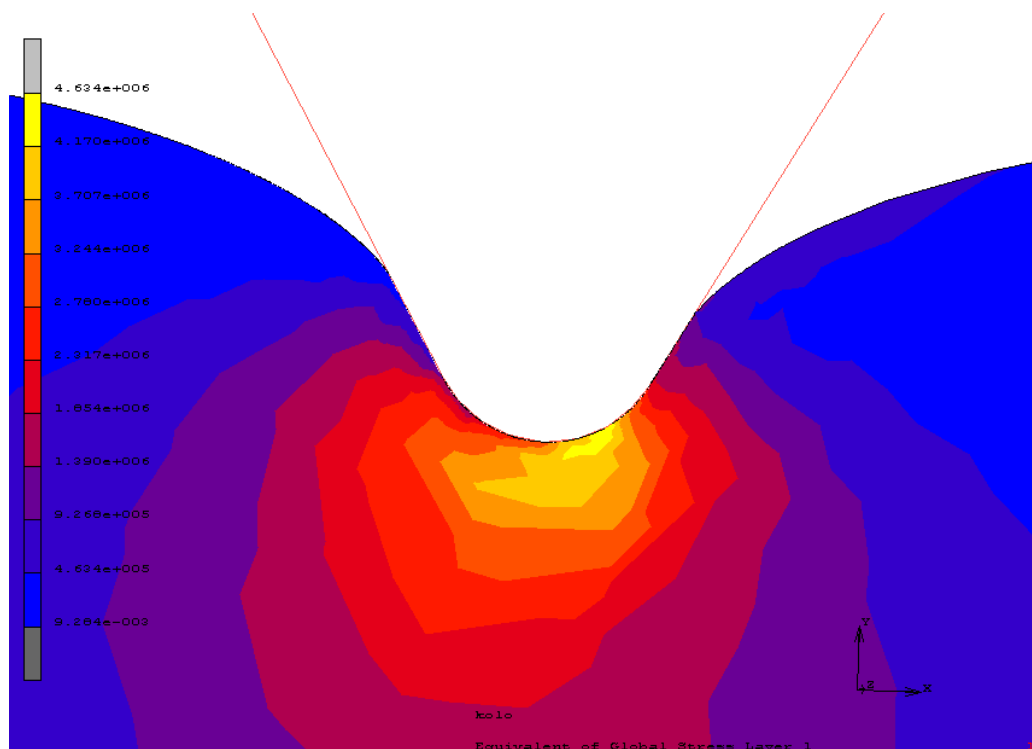
Obr. 51 Průběh 2D analýzy

Tab. 6 Hodnoty napětí

krok	napětí [MPa]	čas [s]
1	4,740	1,010
2	4,742	1,020
3	4,755	1,032
4	4,770	1,046
5	4,781	1,064
6	4,785	1,081
7	4,772	1,098
8	4,669	1,116
9	4,140	1,133
10	4,089	1,150
11	4,195	1,185
12	4,007	1,202
Průměr	4,537	

19.6 2D analýza koeficient smykového tření 0,25 – varianta 2

U této analýzy byl nastaven koeficient smykového tření na hodnotu 0,25. Na obr. 52 je zobrazena hodnota Von Misesova napětí, která se nejvíce přibližuje aritmetické průměrné hodnotě Von Misesova napětí zapsané v tabulce 6 a jejíž hodnota je 4,553MPa.



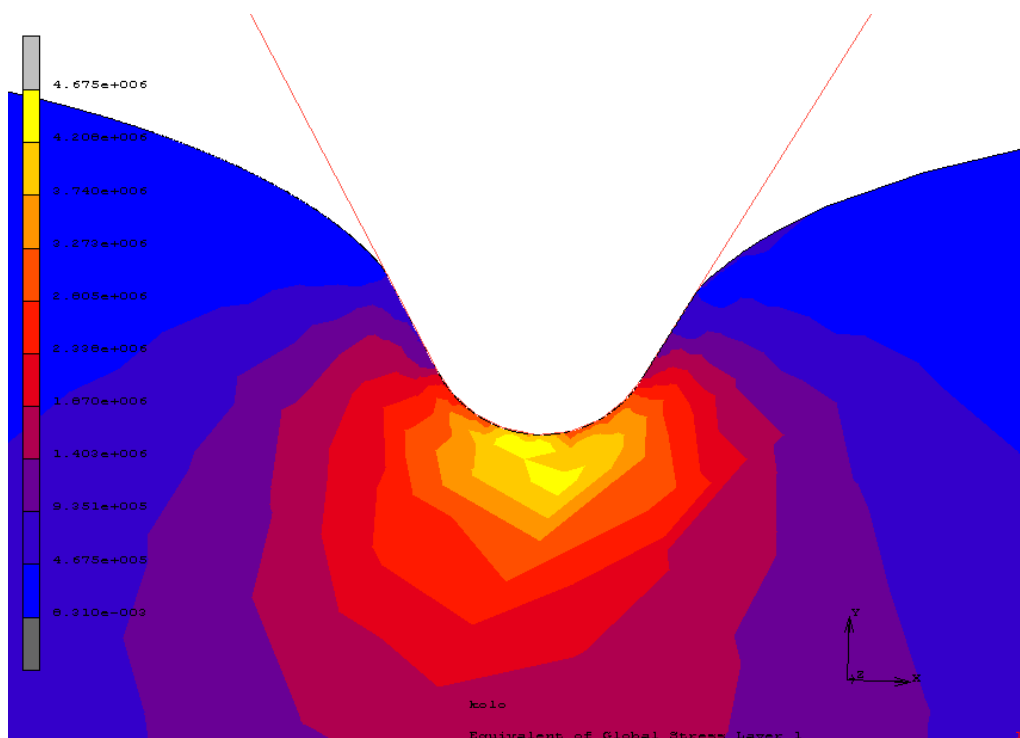
Obr. 52 Průběh 2D analýzy

Tab. 7 Hodnoty napětí

krok	napětí [MPa]	čas [s]
1	4,697	1,010
2	4,709	1,020
3	4,724	1,032
4	4,750	1,046
5	4,773	1,064
6	4,780	1,081
7	4,765	1,098
8	4,713	1,116
9	4,634	1,133
10	4,048	1,150
11	4,033	1,185
12	4,007	1,202
Průměr	4,553	

19.7 2D analýza koeficient smykového tření 0,3 – varianta 2

U této analýzy byl nastaven koeficient smykového tření na hodnotu 0,30. Na obr. 53 je zobrazena hodnota Von Missesova napětí, která se nejvíce přibližuje aritmetické průměrné hodnotě Von Missesova napětí zapsané v tabulce 8 a jejíž hodnota je 4,604MPa.



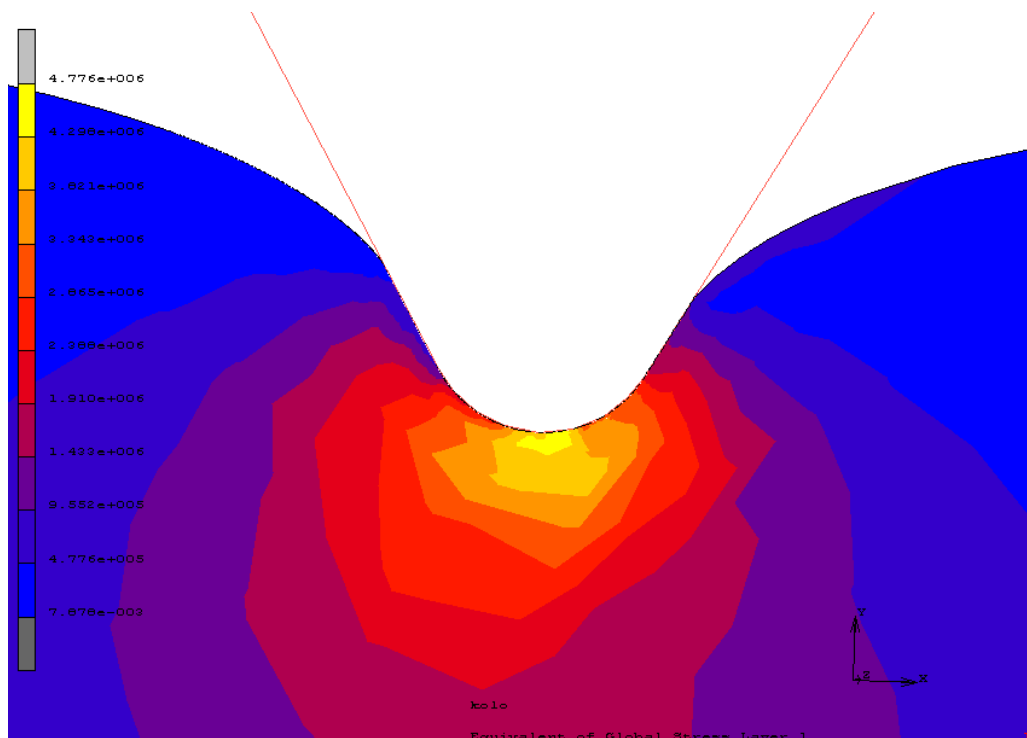
Obr. 53 Průběh 2D analýzy

Tab. 8 Hodnoty napětí

krok	napětí [MPa]	čas [s]
1	4,675	1,010
2	4,691	1,020
3	4,707	1,032
4	4,738	1,046
5	4,767	1,064
6	4,781	1,081
7	4,772	1,098
8	4,729	1,116
9	4,685	1,133
10	4,725	1,150
11	3,989	1,185
12	3,986	1,202
Průměr	4,604	

19.8 2D analýza koeficient smykového tření 0,35 – varianta 2

U této analýzy byl nastaven koeficient smykového tření na hodnotu 0,35. Na obr. 54 je zobrazena hodnota Von Missesova napětí, která se nejvíce přibližuje aritmetické průměrné hodnotě Von Missesova napětí zapsané v tabulce 9 a jejíž hodnota je 4,689MPa.



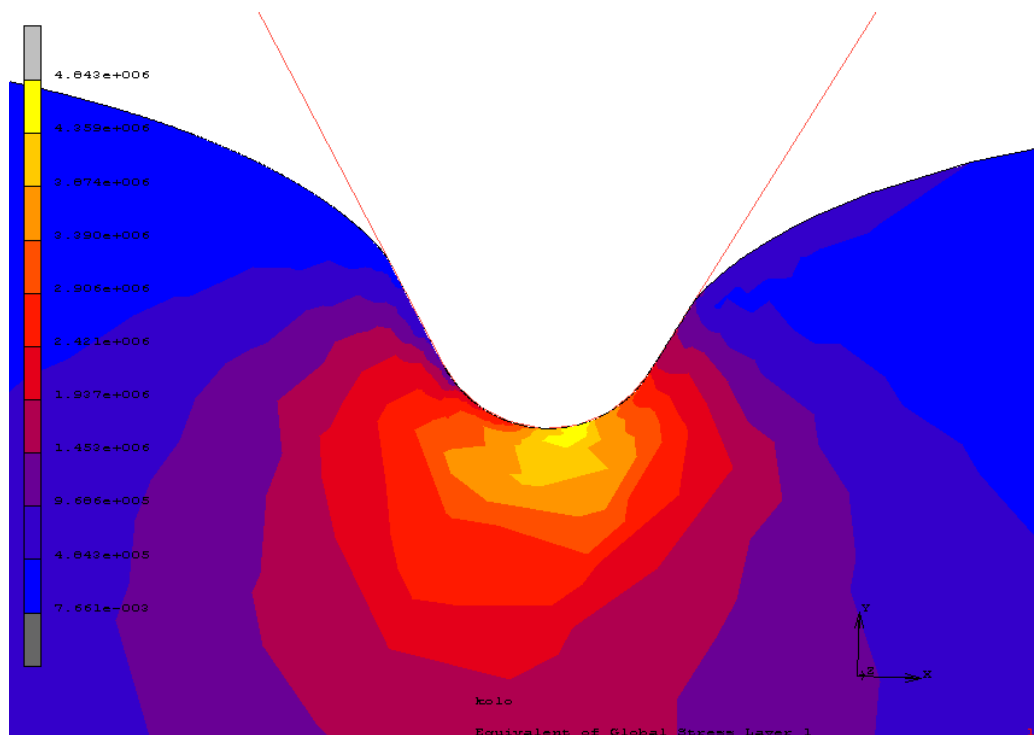
Obr. 54 Průběh 2D analýzy

Tab. 9 Vliv koeficientu tření na napětí

krok	napětí [MPa]	čas [s]
1	4,825	1,010
2	4,807	1,020
3	4,818	1,032
4	4,808	1,046
5	4,796	1,064
6	4,779	1,081
7	4,776	1,098
8	4,734	1,116
9	4,877	1,133
10	4,887	1,150
11	3,920	1,185
12	4,245	1,202
Průměr	4,689	

19.9 2D analýza koeficient smykového tření 0,4 – varianta 2

U této analýzy byl nastaven koeficient smykového tření na hodnotu 0,40. Na obr. 55 je zobrazena hodnota Von Misesova napětí, která se nejvíce přibližuje aritmetické průměrné hodnotě Von Misesova napětí zapsané v tabulce 10 a jejíž hodnota je 4,840MPa.



Obr. 55 Průběh 2D analýzy

Tab. 10 Hodnoty napětí

krok	napětí [MPa]	čas [s]
1	4,932	1,010
2	4,945	1,020
3	4,926	1,032
4	4,910	1,046
5	4,897	1,064
6	4,880	1,081
7	4,853	1,098
8	4,809	1,116
9	4,843	1,133
10	4,917	1,150
11	4,961	1,185
12	4,207	1,202
Průměr	4,840	

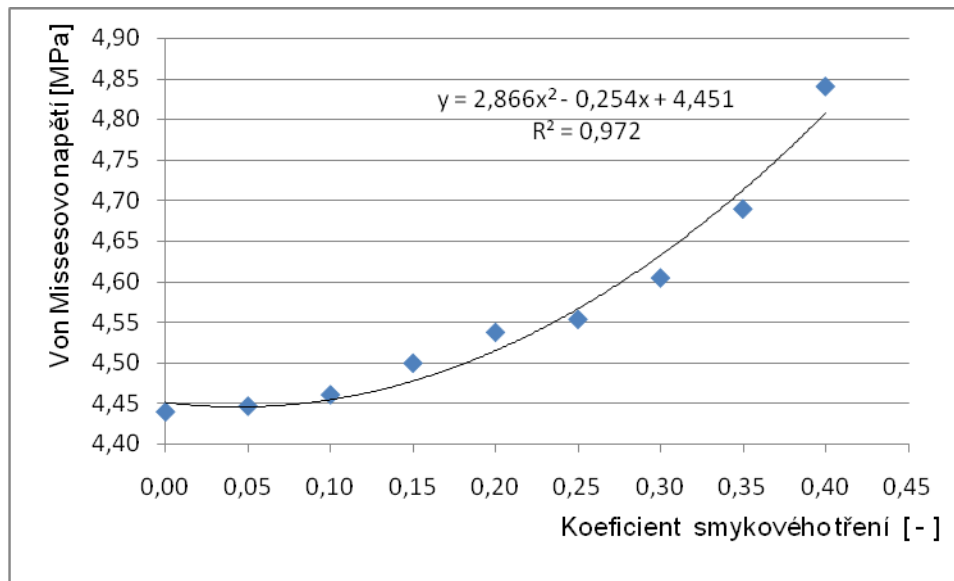
20 VYHODNOCENÍ 2D ANALÝZY – VARIANTA 2

U varianty byl břit nejdříve do zkušebního tělesa zatlačen do požadované hloubky a pak teprve došlo k rotačnímu pohybu zkušebního tělesa. Tato varianta byla zvolena, tak aby se zkušební těleso po nějakou dobu otáčelo při konstantní hloubce břitu. A to proto, aby mohl být vypočítán aritmetický průměr Von Missesova napětí. U analýzy bylo vybráno 12 časových kroků, ve kterých byly zapsány hodnoty Von Missesova napětí z nichž byl vypočítán aritmetický průměr.

U každé analýzy této varianty bylo vybráno 12 hodnot Von Missesova napětí ve stejných časových krocích analýzy. U některých analýz se tyto časové kroky nepatrně lišily, což může znamenat určitou nepřesnost vypočteného aritmetického průměru hodnoty Von Missesova napětí. Průběh vlivu koeficientu smykového tření na Von Missesovo napětí je zobrazen na obr. 56. Pro popsání průběhu vlivu koeficientu smykového tření na napětí, bylo použito polynomické funkce druhého řádu. V tabulce 11 jsou zobrazeny hodnoty Von Missesova napětí pro jednotlivé hodnoty koeficientu smykového tření.

Tab. 11 Hodnoty napětí

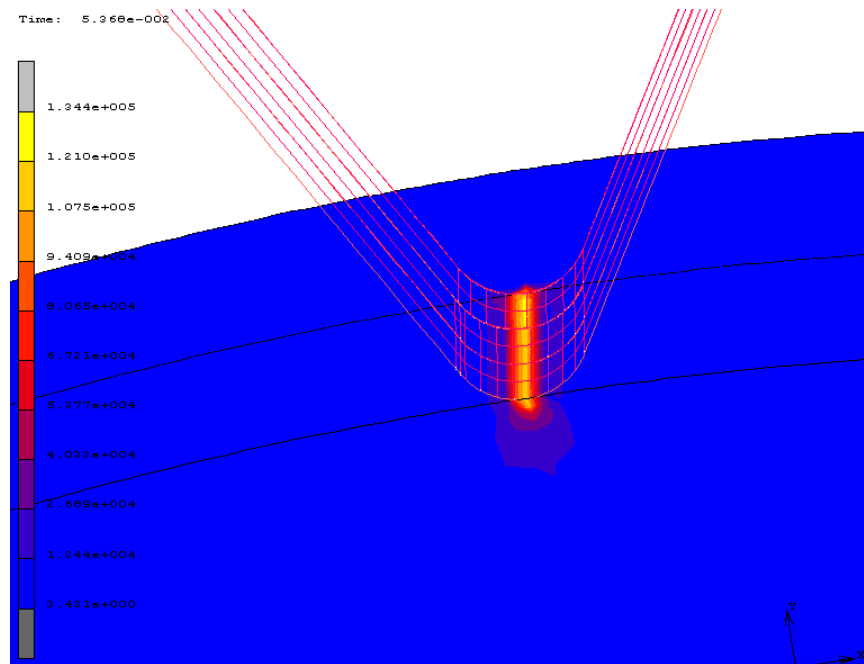
koeficient tření [-]	napětí [Mpa]
0,00	4,439
0,05	4,446
0,10	4,460
0,15	4,499
0,20	4,537
0,25	4,553
0,30	4,604
0,35	4,689
0,40	4,840



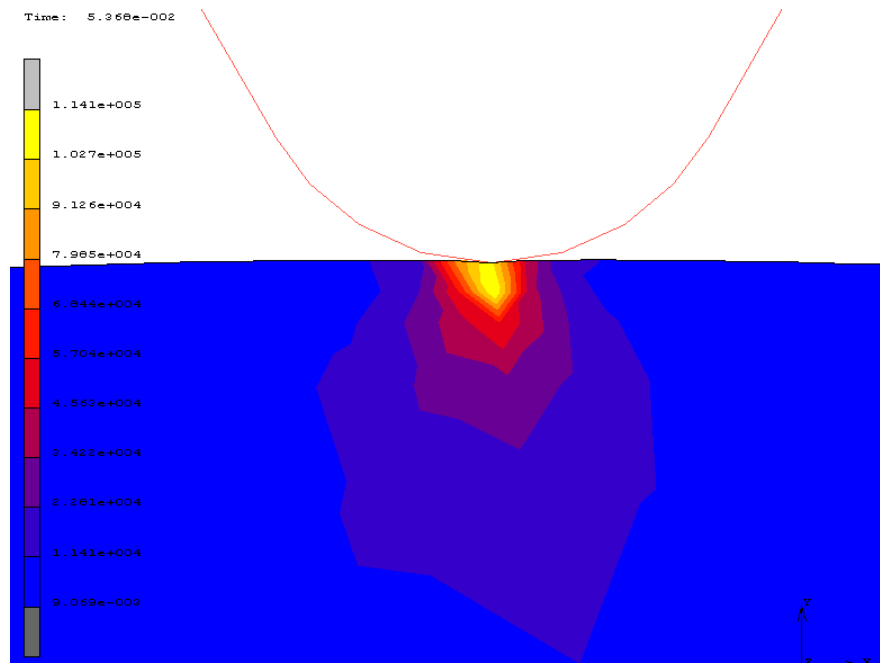
Obr. 56 Vliv koeficientu smykového tření na napětí

21 VYHODNOCENÍ 3D ANALÝZY

3D analýza se provádí v případech, kdy výsledky 2D analýz jsou nedostačující. Jak vyplývá z obr. 57 tak při vnikání břitu do zkušebního tělesa se je Von Missesovo napětí rovnoměrně rozloženo pod celou šířkou břitu.

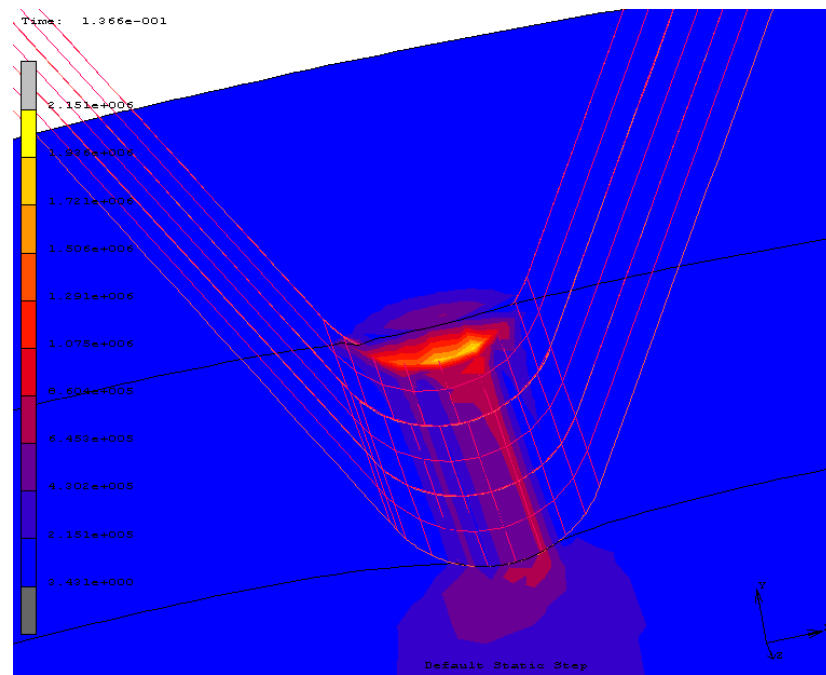


Obr. 57 Výsledek 3D analýzy

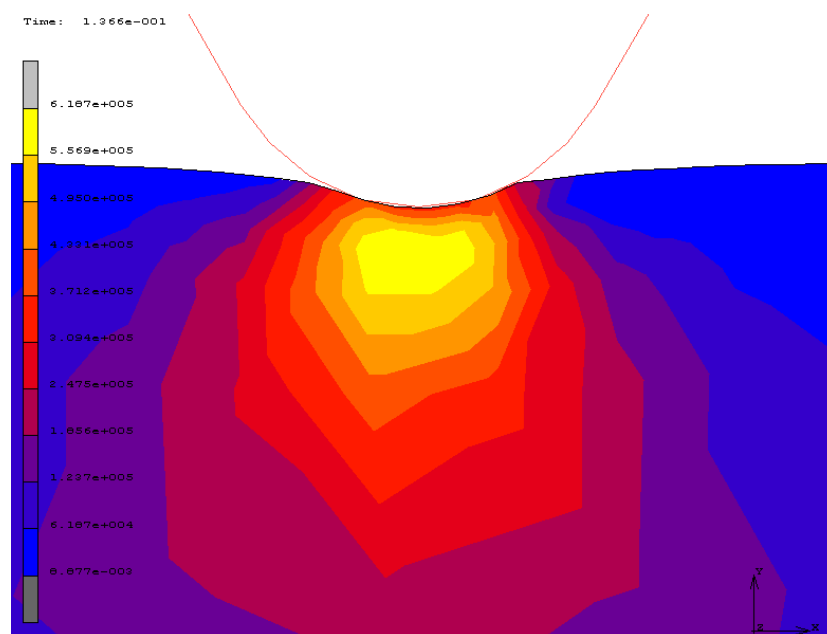


Obr. 58 Výsledek 2D analýzy

Z obr. 57 vyplývá, že hodnota Von Missesova napětí je 0,1344MPa ve 3D analýze. U 2D analýzy je ve stejném časovém kroku hodnota Von Missesova napětí 0,1141MPa (obr. 58). Ovšem při dalším průniku břitu do větší hloubky se začíná napětí koncentrovat do kraje břitu, jak je zobrazeno na obr. 59. Von Missesovo napětí je na okraji břitu je 2,151MPa. Zatím co Von Missesovo napětí pod břitem se pohybuje kolem hodnoty 0,6MPa. Což jak můžeme vidět, odpovídá výsledkům 2D analýzy na obr. 60. Jejíž hodnota Von Missesova napětí je 0,6187MPa.



Obr. 59 Výsledek 3D analýzy



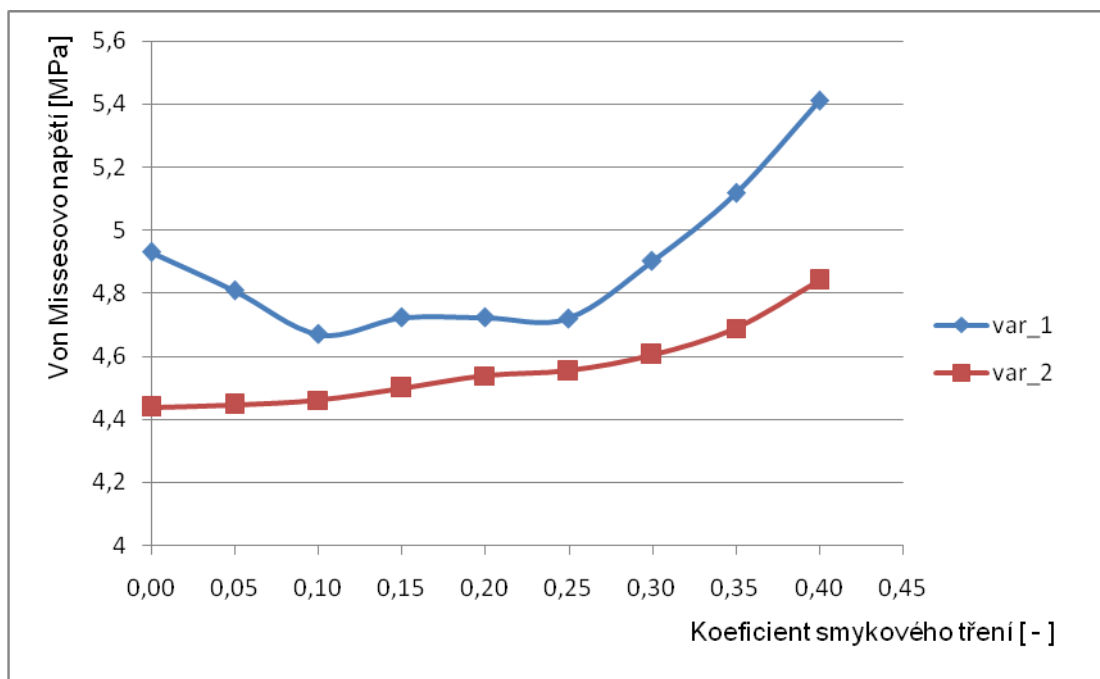
Obr. 60 Výsledek 2D analýzy

22 VYHODNOCENÍ ANALÝZ

Byly navrženy dvě varianty 2D analýz pro zjištění vlivu koeficientu smykového tření na Von Missesovo napětí. V první variantě se břit postupně zatlačoval do zkušební tělesa. Výsledky těchto analýz neposkytly předpokládaný vliv koeficientu smykového tření na Von Missesovo napětí. Výsledky analýz mohou být ovlivněny nedostatečnou hustotou a kvalitou sítě FEM modelu v místě, kde byl břit zatlačován do zkušební tělesa.

Proto bylo přistoupeno ke druhé variantě analýzy. V této variantě byl břit nejdříve zatlačen do požadované hloubky 3mm, poté došlo k otáčení zkušební tělesa. Ve stejných časových krocích bylo zapsáno 12 hodnot Von Missesova napětí u jednotlivých analýz.

Mezi délkami časových kroků jednotlivých analýz byly nepatrné rozdíly, což mohlo zapříčinit nepřesnosti ve výpočtu aritmetické průměrné hodnoty Von Missesova napětí. U této varianty bylo zjištěno, že se zvyšujícím se koeficientem smykového tření roste hodnota Von Missesova napětí.



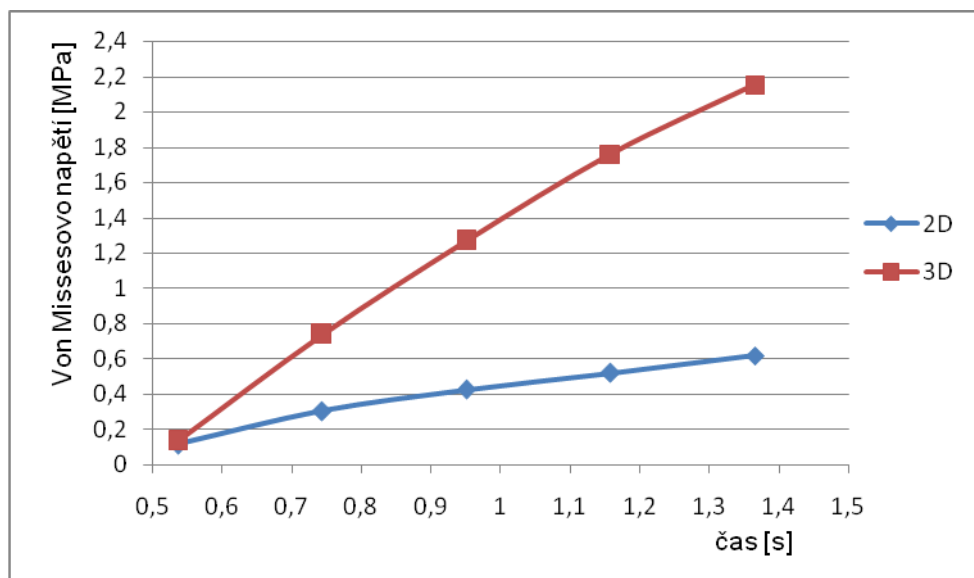
Obr. 61 Vliv koeficientu smykového tření na napětí

Na obrázku 61 je graf, který zobrazuje závislost Von Missesova napětí na koeficientu smykového tření na první a druhé varianty analýz. Jak je patrné z tohoto obrázku tak hodnoty Von Missesova napětí u analýz první varianty jsou vyšší než hodnoty Von Missesova napětí u analýz druhé varianty. Rozdíly v hodnotách Von Missesova napětí mohou být následkem jiného typu zatížení, kterému bylo zkušební těleso v jednotlivých variantách

analýz vystaveno. U první varianty docházelo ke kombinaci pohybu bříty a zkušebního tělesa.

Srovnáním 3D a 2D analýzy bylo zjištěno, že v počátku průběhu analýz se hodnoty Von Missesova napětí téměř neliší. V dalším průběhu analýz, kdy byl břit zatlačen do větší hloubky, lze u 3D analýzy pozorovat vyšší hodnoty Von Missesova napětí než u 2D analýzy (obr. 62). Na obrázku 59 je zachycen průběh 3D analýzy z níž lze vyčíst, že nejvyšší hodnota Von Missesova napětí se vyskytuje pod okrajem bříty. Hodnota Von Missesova napětí ve 2D analýze odpovídá přibližně Von Missesově napětí, které je pod břítem ve 3D analýze, když zanedbáme Von Missesovo napětí vznikající v okrajové části bříty.

Pomocí 2D analýz byl zjištěn vliv koeficientu smykového tření na Von Missesovo napětí. Dále byly prokázány odlišnosti mezi 2D a 3D analýzou dané problematiky. Z čehož vyplývá, pokud bychom chtěli řešit zkoušku opotřebení elastomeru pomocí analýz. Museli bychom zvolit 3D analýzy, pro získání co nejpřesnějších výsledků. Využití 3D analýzy je ovšem časově velmi náročné.



Obr. 62 Porovnání 3D a 2D analýzy

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] DVOŘÁK, Z., JAVOŘÍK, J. *Konstrukce výrobků*. Zlín, 2009. [T9]
- [2] DUCHÁČEK, V.: *Polymery - výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. Vysoká škola chemicko-technologická v Praze. Praha 2006. 280 s. ISBN 80-7080-617-6
- [3] DVOŘÁK, Z., LAMBOROVÁ, R. *Základy výrobních procesů I*. Zlín, 2008. [T1]
- [4] ŠPAČEK, J. *Technologie gumárenská a plastikářská II*. Brno: Rektorát vysokého učení technického v Brně, 1980
- [5] Základy makromolekulární chemie www.fch.vutbr.cz/~klucakova/web14.doc
- [6] DVOŘÁK, Z. *Zpracovatelské procesy gumárenské*. Zlín, 2009.
- [7] HOLUB, J. *Pryž jako konstrukční materiál*. Praha: SNTL, 1967
- [8] ŠUBA, O. *Dimenzování a navrhování výrobků z polymerů*. Zlín 2005
- [9] JAVOŘÍK, J. *Hyperelasticita*. (učební text)
- [10] *Hyperelastic material* [online]. 2010 [cit. 2010-12-07]. Wikipedie. Dostupné z WWW: <http://en.wikipedia.org/wiki/Hyperelastic_material>.
- [11] GENT, N. A. *Engineering with Rubber*. Munich: Carl Hauser Verlag. 2001
- [12] BROWN, R. *Physical Testing of Rubber*. New York: Springer Science + Business Media, Inc. 2006. 387 s. ISBN 0-387-28286-6
- [13] MAŇAS, D. *Obrobitelnost pryže a opotřebení pryžových výrobků*. Brno, 2005
- [14] JAVOŘÍK, J. *Aplikace výpočetních metod*. (přednášky)
- [15] *Metoda konečných prvků* : 1. panel. [online] 2007 [cit. 2011-04-28]. Dostupné z WWW: <http://www.345.vsb.cz/jirihruby/Vmt/MKP_panel1.pdf>.
- [16] *Metody konečných prvků* : Nelineární úlohy. [online]. 2007 [cit. 2011-04-28]. Dostupné z WWW: <<http://people.fsv.cvut.cz/~pkabele/YNAK/YNAK-pr04.pdf>>.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

C_{ij}	Hyperelastická materiálová konstanta [Pa]
σ	Von Missesovo napětí [Pa]
E	Modul pružnosti v tahu [Pa]
ν	Poissonova konstanta [-]
ε	Poměrné prodloužení [-]
p	Tlak [Pa]
W	Hustota deformační energie [Pa]
I	Deformační invariant [-]
λ	Poměrné protažení [-]
λ_L	Limitní protažení [-]
L	Deformovaná délka [mm]
L_0	Původní délka [mm]
S	Deformovaný průřez [mm ²]
S_0	Původní průřez [mm ²]
K	Objemový modul pružnosti [Pa]
M	Množina materiálových vlastností
μ	Počáteční smykový modul [Pa]
k	Boltzmanova konstanta [J.K ⁻¹]
T	Absolutní teplota [K]
f	Součinitel smykového tření [-]
F_T	Třecí síla [N]

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Změna objemu elementární krychlové části [8]	20
Obr. 2 Zatížení částice materiálu všestranným tlakem [8]	21
Obr. 3 Rozdělení prostorové napjatosti [8].....	22
Obr. 4 Závislost napětí a deformace při zatěžování elastomerů	24
Obr. 5 Elastomer při zkoušce jednoosým tahem [9].....	26
Obr. 6 Princip jednoosého tahu.....	31
Obr. 7 Zkušební těleso pro jednoosý tah [12].....	32
Obr. 8 Princip dvouosého tahu	32
Obr. 9 Metoda dvouosého tahu pomocí nafouknutí vzorku [9].....	33
Obr. 10 Metoda dvouosého tahu pomocí tahu ve dvou kolmých osách [9]	33
Obr. 11 Metoda dvouosého tahu pomocí radiálního tahu [9]	33
Obr. 12 Čistý smyk	34
Obr. 13 Zkušební vzorek upnutý v čelistech [9].....	34
Obr. 14 Mimosilniční pneumatika [13]	35
Obr. 15 Schéma testovacího zařízení pro rychlý test opotřebení [13].....	36
Obr. 16 Rozměry zkušebního tělesa a zkušební těleso před a po zkoušce [13]	37
Obr. 17 Struktura tvorby a analýzy FEM modelu	42
Obr. 18 Typy elementů [14]	44
Obr. 19 Zobrazení uzlového posunu [16]	45
Obr. 20 Inkrementální změna zatížení [16]	46
Obr. 21 Geometrie břitu.....	48
Obr. 22 Náčrtes modelu v programu Catia V5R18	49
Obr. 23 Porovnání experimentálních hodnot z hodnoty hyperplastického modelu.....	50
Obr. 24 Označení deformovatelného tělesa	50
Obr. 25 Označení tuhého tělesa	51
Obr. 26 Označení tuhého tělesa	51
Obr. 27 Tabulka vazeb kontakt.....	52
Obr. 28 Vysíťovaný 2D model v programu MSC Patran	53
Obr. 29 Náčrtes 3D modelu v programu MSC Patran.....	54
Obr. 30 Označení okrajových bodů ve 3D modelu	55
Obr. 31 Označení elementů ve 3D modelu.....	56
Obr. 32 Označení plochy hrotu ve 3D modelu	56

Obr. 33 Označení ploch díry ve 3D modelu	57
Obr. 34 Zobrazení délky elementu	57
Obr. 35 Postup síťování 3D modelu	58
Obr. 36 Vysíťovaný 3D model	58
Obr. 37 Průběh 2D analýzy – varianta 1	59
Obr. 38 Průběh 2D analýzy – varianta 1	60
Obr. 39 Průběh 2D analýzy – varianta 1	60
Obr. 40 Průběh 2D analýzy – varianta 1	61
Obr. 41 Průběh 2D analýzy – varianta 1	61
Obr. 42 Průběh 2D analýzy – varianta 1	62
Obr. 43 Průběh 2D analýzy – varianta 1	62
Obr. 44 Průběh 2D analýzy – varianta 1	63
Obr. 45 Průběh 2D analýzy – varianta 1	63
Obr. 46 Vliv koeficientu smykového tření na napětí.....	65
Obr. 47 Průběh 2D analýzy.....	66
Obr. 48 Průběh 2D analýzy.....	67
Obr. 49 Průběh 2D analýzy.....	68
Obr. 50 Průběh 2D analýzy.....	69
Obr. 51 Průběh 2D analýzy.....	70
Obr. 52 Průběh 2D analýzy.....	71
Obr. 53 Průběh 2D analýzy.....	72
Obr. 54 Průběh 2D analýzy.....	73
Obr. 55 Průběh 2D analýzy.....	74
Obr. 56 Vliv koeficientu smykového tření na napětí.....	77
Obr. 57 Výsledek 3D analýzy	78
Obr. 58 Výsledek 2D analýzy	78
Obr. 59 Výsledek 3D analýzy	79
Obr. 60 Výsledek 2D analýzy	79
Obr. 61 Vliv koeficientu smykového tření na napětí.....	80
Obr. 62 Porovnání 3D a 2D analýzy.....	81

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1 Hodnoty napětí</i>	64
<i>Tab. 2 Hodnoty napětí</i>	67
<i>Tab. 3 Hodnoty napětí</i>	68
<i>Tab. 4 Hodnoty napětí</i>	69
<i>Tab. 5 Hodnoty napětí</i>	70
<i>Tab. 6 Hodnoty napětí</i>	71
<i>Tab. 7 Hodnoty napětí</i>	72
<i>Tab. 8 Hodnoty napětí</i>	73
<i>Tab. 9 Vliv koeficientu tření na napětí.....</i>	74
<i>Tab. 10 Hodnoty napětí</i>	75
<i>Tab. 11 Hodnoty napětí</i>	76