

Numerická analýza vlivu tření na vedení materiálu ve vícevřetenovém automatu

Radek Machuča

Bakalářská práce
2012



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2011/2012

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Radek MACHUČA**
Osobní číslo: **T09442**
Studijní program: **B 3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Technologická zařízení**

Téma práce: **Numerická analýza vlivu tření na vedení materiálu ve víceřetenovém automatu**

Zásady pro vypracování:

Vypracovat literární studii na dané téma
Návrh a popis zvolenou metodou
Provést numerickou analýzu
Vyhodnotit získané výsledky

Rozsah bakalářské práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

Dle zadání vedoucího BP.

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Jakub Javořík, Ph.D.

Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání bakalářské práce:

13. února 2012

Termín odevzdání bakalářské práce:

25. května 2012

Ve Zlíně dne 13. února 2012


doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.
děkan




prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D.
ředitel ústavu

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním 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 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 jsem seznámen s tím, že na moji 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 – 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 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 bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem 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 27. dubna 2012

.....

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 nevdělečně 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 vzdělávacího 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 bakalářské práce je analyzovat vliv tření na chování polyuretanového pouzdra používaného ve vícevřetenových automatech při podávání kovových tyčí o různých průměrech a různém koeficientu tření.

Teoretická část se stručně zabývá materiálem zkoumaného pouzdra, vlastnostmi elastomerních materiálů, hyperelastickými modely využívaných ve FEM systémech, základním rozdělením tření a popisem použitého softwaru.

V praktické části je popsáno vytvoření FEM modelu, jeho okrajové podmínky a zatížení, které byly použity pro analýzu. Dále jsou porovnávány vypočítané výsledky pro různé průměry tyčí a porovnání vlivu zpětného pohybu tyče na chování pouzdra.

Klíčová slova: polyuretan, hyperelastická, MSC, Marc, Patran, Mentat, nelineární materiálové modely, FEM analýza, tření, koeficient tření

ABSTRACT

The aim of this thesis is to analyze the influence of friction on the behavior of polyurethane part, which is used in multi-spindle machines, during the inserting of metal bar with different diameters and different coefficients of friction.

The theoretical part deals examined part material, properties of elastomeric materials, hyperplastic models used in FEM systems, the basic description of friction and description of used software.

In the practical part creation of FEM model and boundary conditions and loads, that were used for analysis are described. Further computed results for different bar diameters are compared and the significance of reverse motion of bar is evaluated.

Keywords: polyurethane, hyperelasticity, MSC, Marc, Patran, Mentat, nonlinear material models, FEM analysis, friction, coefficient of friction

Rád bych poděkoval Ing. Jakobovi Javoříkovi, Ph.D. za poskytnutí cenných rad a ochotu spolupracovat a podílet se na tvorbě této bakalářské práce.

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

Ve Zlíně 27. dubna 2012

.....

OBSAH

ÚVOD	10
I TEORETICKÁ ČÁST	11
1 POLYURETANY	12
1.1 ZÁKLADNÍ ROZDĚLENÍ POLYMERŮ	12
1.2 HISTORIE	12
1.3 VÝROBA	13
2 HYPERELASTICITA	15
2.1 HYPERELASTICKÉ DEFORMACE	16
2.2 ZÁKLADNÍ MÓDY NAMÁHÁNÍ	17
2.2.1 Jednoosý tah	17
2.2.2 Čistý smyk.....	18
2.2.3 Dvouosý tah	19
2.3 HYPERELASTICKÉ MODELY	20
2.3.1 Hyperelastické modely využívané ve FEM systémech.....	20
3 TŘENÍ	25
3.1 ZÁKLADNÍ DĚLENÍ TŘENÍ.....	25
3.1.1 Rozdělení tření podle místa působení třecích mechanismů.....	25
3.1.2 Rozdělení tření podle skupenství kontaktních ploch	26
3.1.3 Rozdělení tření podle druhu pohybu	26
4 SOFTWAREVÁ PODPORA	29
4.1 METODA KONEČNÝCH PRVKŮ	29
4.2 FEM SYSTÉMY	29
4.3 MSC MARC&MENTAT A MSC PATRAN	31
II PRAKTICKÁ ČÁST	32
5 STANOVENÍ CÍLŮ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE	33
6 MECHANICKÉ VLASTNOSTI POUŽITÉHO POLURETANU	34
6.1 MATERIÁLOVÉ ÚDAJE POLYURETANU MTQ 25145.....	35
7 POPIS ZKOUMANÉHO PROBLÉMU	36
7.1 PRVNÍ ZKOUMANÝ PROBLÉM	36
7.2 DRUHÝ ZKOUMANÝ PROBLÉM	36
8 NUMERICKÁ ANALÝZA POUZDRA	37
8.1 MODELOVÁNÍ POUZDRA	37
8.2 VYTVOŘENÍ MODELU PRO FEM ANALÝZU	37
8.3 DEFINOVÁNÍ MATERIÁLOVÝCH VLASTNOSTÍ	38
8.4 TVORBA SÍTĚ	39
8.5 OKRAJOVÉ PODMÍNKY A ZATÍŽENÍ	40
9 VÝPOČET	42
9.1 DEFINICE VÝSLEDKŮ	42
9.1.1 Von Misesovo napětí.....	42
9.1.2 Kontaktní normálová síla	42
9.1.3 Reakční síla	43

9.1.4	Třecí síla.....	44
10	VYHODNOCENÍ VYPOČÍTANÝCH VÝSLEDKŮ.....	45
10.1	VLIV TŘENÍ PŘI ZASOUVÁNÍ TYČE O PRŮMĚRU 15 MM.....	45
10.1.1	Třecí síla.....	45
10.1.2	Reakční síla.....	47
10.1.3	Kontaktní normálová síla.....	48
10.1.4	Von Misesovo napětí.....	50
10.2	VLIV TŘENÍ PŘI ZASOUVÁNÍ TYČE O PRŮMĚRU 20 MM.....	51
10.2.1	Třecí síla.....	51
10.2.2	Reakční síla.....	53
10.2.3	Kontaktní normálová síla.....	54
10.2.4	Von Misesovo napětí.....	56
10.3	VLIV TŘENÍ PŘI ZASOUVÁNÍ TYČE O PRŮMĚRU 25 MM.....	58
10.3.1	Třecí síla.....	58
10.3.2	Reakční síla.....	59
10.3.3	Kontaktní normálová síla.....	61
10.3.4	Von Misesovo napětí.....	62
10.4	VLIV TŘENÍ PŘI ZASOUVÁNÍ TYČE O PRŮMĚRU 30 MM.....	64
10.4.1	Třecí síla.....	64
10.4.2	Reakční síla.....	65
10.4.3	Kontaktní normálové napětí.....	67
10.4.4	Von Misesovo napětí.....	68
10.5	POROVNÁNÍ HODNOT JEDNOTLIVÝCH PRŮMĚRŮ TYČÍ.....	70
10.5.1	Třecí síla.....	70
10.5.2	Reakční síla.....	70
10.5.3	Kontaktní normálová síla.....	71
10.5.4	Von Misesovo napětí.....	72
10.6	VLIV ZPĚTNÉHO POHYBU TYČE NA DEFORMACI POUZDRA.....	73
	ZÁVĚR.....	75
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	76
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	77
	SEZNAM OBRÁZKŮ.....	79
	SEZNAM TABULEK.....	81
	SEZNAM PŘÍLOH.....	82

ÚVOD

Žijeme v době, kdy výpočetní technika zaujímá v našem životě velmi významné místo. Ve valné většině jde o využití výpočetní techniky v praxi, konkrétně v průmyslu, kdy daný software pomáhá konstruktérovi s návrhem budoucího výrobku. Využití softwaru nám také napomáhá zamezení vzniku chyb na výrobku a predikci jeho chování.

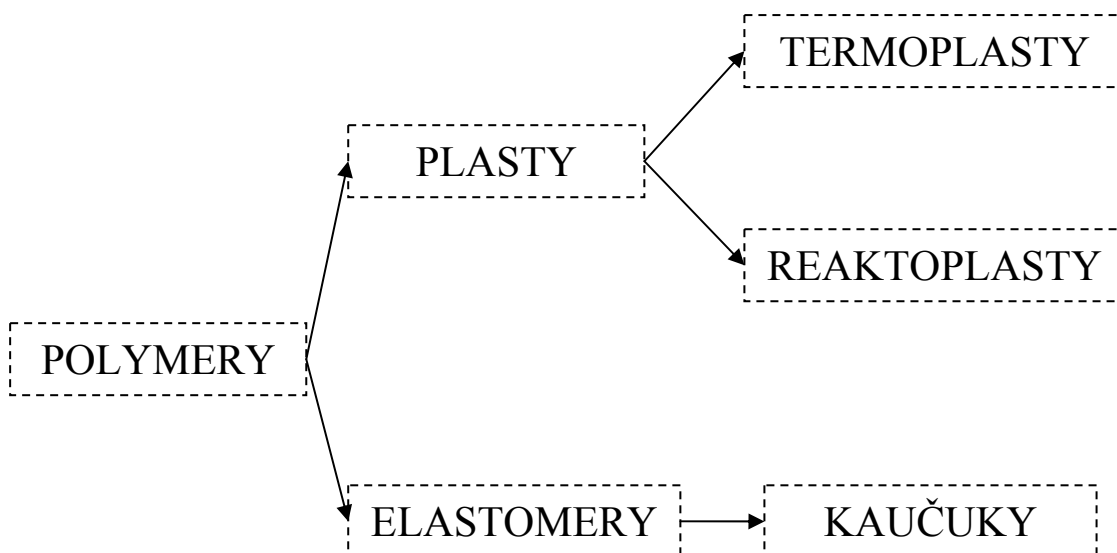
V bakalářské práci jsou použity pro řešení daného problému systémy MSC. Marc&Mentat a MSC. Patran, které využívají metod konečných prvků, slouží k simulaci průběhů napětí, deformací, vlastních frekvencí, proudění tekutin aj. na vytvořeném geometrickém modelu. Princip FEM spočívá v diskretizaci spojitého kontinua do určitého (konečného) počtu prvků, přičemž zjišťované parametry jsou určovány v jednotlivých uzlových bodech. Metoda je užívána především pro kontrolu již navržených zařízení, nebo pro stanovení kritického místa konstrukce nebo prvku. Ačkoliv jsou principy této metody známy již delší dobu, k jejímu masovému využití došlo teprve s nástupem moderní výpočetní techniky.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 POLYURETANY

V této části jsou popsány základní vlastnosti polyuretanu, historický vývoj a jejich dnešní uplatnění v technické praxi.

1.1 Základní rozdělení polymerů



Obr. 1. Základní dělení polymerů

Polymery jsou látky, v jejichž makromolekule se jako článek v řetězu mnohonásobně opakuje základní monomerní jednotka, většinou atomy uhlíku, vodíku a kyslíku, často dusíku, chloru i jiných prvků. V určitém stavu zpracování se nachází v kapalném stavu, který umožňuje udělit tvar budoucímu výrobku, jenž slouží v prakticky tuhém stavu.

Polyuretany patří do skupiny termoplastů, které jsou za běžných podmínek většinou tvrdé, často i křehké. Při zvýšené teplotě se stávají plastickými a tvarovatelnými.

1.2 Historie

Chemie polyuretanů patří do odvětví organické chemie isokyanátové. Už před r. 1850 připravili průkopníci organické chemie Wurtz a Hoffman alifatické i aromatické monoisokyanáty a vysvětlili jejich vlastnosti a reakce. Intenzivní studium isokyanátů bylo však zpočátku brzděno obtížemi a malými výtěžky. Avšak roku 1884 vyvinul Hentschel nejvhodnější přípravu isokyanátů - totiž fosgenací primárních aminů. Díky tomu dosáhl výborných výtěžků a zájem o tuto oblast tím vzrostl. [1]

Do třicátých let 20. století nebylo studováno skutečné průmyslové využití pochodů, které nás zajímají. Rok 1937 lze označit jako skutečný začátek nynějšího směru výzkumu polyuretanů, protože tehdy se dr. Otto Bayer rozhodl experimentovat s adičními produkty diisokyanátů s cílem připravit vlákna stejných nebo lepších vlastností, než má Nylon, která by však nebyla chráněna patenty na Nylon společnosti Du-Pont. 26. března 1937, objevila jeho skupina polyadiční reakci diisokyanátů a později získala německý patent č. 728 981, chránící tuto práci. [1]

Polymočoviny dávaly pouze netavitelné a silně hydrofilní polymery, které nebyly vhodné pro přípravu vláken nebo plastických hmot. Potom v Německu vynalezli a vyvinuli lineární polyuretany, které se ukázaly jako velmi mnohostranné a slibné plastické hmoty. Dosáhly pak takového rozmachu, že se od r. 1941 začaly v Německu vyrábět ve dvou typech. Prvního typu, nazvaného Perlon U, se používalo k přípravě syntetických vláken a žíní, a z druhého typu, Igamidu U, se připravovaly plastické hmoty. V témže roce zažádal dr. Bayer o přiznání prvního stupně válečné důležitosti pro výstavbu závodu s kapacitou 200 tun alifatických diisokyanátů a 100 tun diisokyanátů aromatických. Jako důvod pro přiznání této válečné důležitosti uváděl, že jeho skupina dosáhla ještě mnoha dalších úspěchů v průmyslovém využití diisokyanátů a jejich produktů. Ukázaly se možnosti jejich využití v oboru lepidel, pěnových hmot, laků a nátěrových hmot, jakož i syntetických usní atd. [1]

V roce 1945 vyslal Úřad generálního ubytovatele vojsk Spojených států do Německa skupinu pozorovatelů, aby pátrala po jakýchkoliv technických pokrocích na poli plastických hmot, které by mohly mít přímé použití v programu výzkumu plastických hmot v souvislosti s pokračující válkou v tichomořské oblasti. Zjistili, že mnoho teoretických předpovědí v oboru isokyanátů již bylo splněno. Kromě lineárních polymerů připravených z alifatických glykolů a alifatických diisokyanátů nabyly důležitosti některé aplikace, využívající mnoha polyesterů k výrobě pěnových hmot, nátěrových hmot a lepidel. Možnosti použití v leteckém průmyslu byly nejzajímavější. [1]

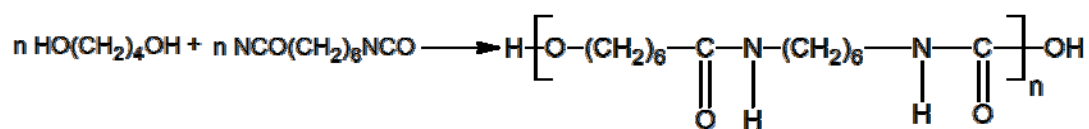
1.3 Výroba

Polyuretany jsou unikátní co do širé palety dosažitelných vlastností a tedy i jejich aplikací. Patří mezi deset objemem výroby největších typů polymerů. Pod pojmem polyuretany rozumíme skupinu polymerů vzniklých reakcí vícefunkčních isokyanátů s polyalkoholy. Hlavní výchozí surovinou jsou alifatické, ale hlavně aromatické diisokyanáty, dále poly-

esterové, polyetherové pryskyřice a katalyzátorové systémy potřebné pro regulaci průběhu reakce. [2]

Přibližně 95% produkce polyuretanů je založeno na aromatických polyisokyanátech, které jsou podstatně reaktivnější i levnější než alifatické. Avšak nevýhodou aromatických diisokyanátů je tendence jejich produktů ke žloutnutí vlivem světla a kyslíku. Tento nedostatek nevykazují alifatické a cykloalifatické diisokyanáty. [2]

Technicky nejsnáze přístupný a současně nejvýznamnější lineární polyuretan vzniká z hexamethylendiisokyanátu a 1,4-butandiolu. Jeho strukturu lze popsat vzorcem:



Obr. 2. Vznik lineárního polyuretanu

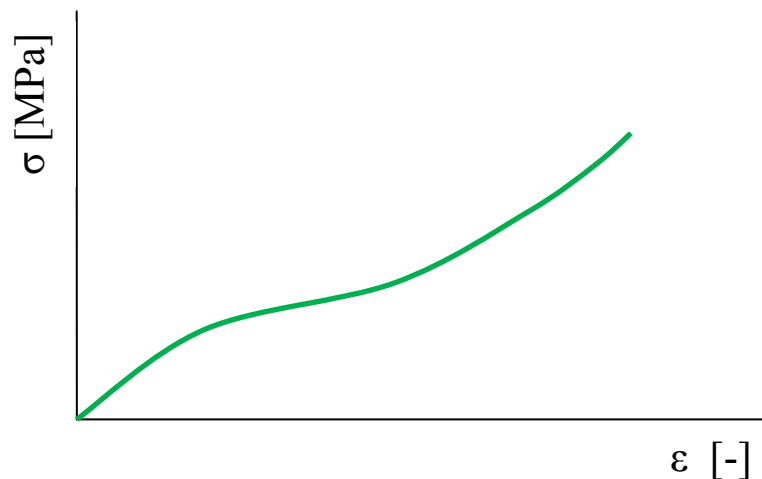
Lineární polyuretany se používají na přípravu vláken a filmů. Je to bílá hmota podobná polyamidu. Je silně krystalický, tepelně není příliš stálý i při teplotách nad 220 °C se začíná rozpadat na jednotlivé komponenty. Proti polyamidům mají lineární polyuretany nižší navlhavost, lepší odolnost proti vodě, kyselinám a povětrnosti a lepší elektroizolační vlastnosti. [2]

Polyuretan je materiál "programovatelný", podle jeho chemického složení a množství jednotlivých složek může vzniknout řada zcela odlišných typů - od měkkých pěn přes tvrdé pěny až po strukturální PUR pro výroby stavebního i spotřebního průmyslu, od běžně hořlavého polyuretanu přes samozhášivé typy až po těžko hořlavé až nehořlavé, s teplotní odolností běžnou (120°C) až po teplotně odolné při 300°C. [2]

2 HYPERELASTICITA

Elastomery se vyznačují některými charakteristickými rysy, kterými se výrazně odlišují od většiny ostatních, ideálně elastických materiálů. Souhrn těchto vlastností je často nazýván jako hyperelastická a tyto materiály pak považujeme za hyperplastické. Hlavními znaky hyperelasticity jsou [3] :

- Dosažitelné elastické (vratné) deformace jsou veliké, několikanásobně vyšší než u ideálně elastických látek. Tažnost (protažení při přetržení) dosahuje několika stovek procent původní délky.
- Závislost napětí na deformaci není lineární. Průběh této závislosti má zpravidla charakteristický esovitý průběh.



Obr. 3. Typický tahový diagram elastomerních materiálů

- Materiál se deformuje již působením malých sil. Poměr napětí a deformace v oblasti malých deformací je přibližně deset tisíckrát menší než u ideálně elastických látek.
- Objemová tuhost většiny elastomerů je velmi vysoká. Objemový modul pružnosti dosahuje hodnot řádově stovek až tisíců MPa a s uvážením předchozího bodu (tj. malého poměru napětí k deformaci) se pak Poissonův poměr blíží hodnotě $\mu=0,5$ (v závislosti na obsahu plniv). To znamená, že daný materiál můžeme považovat za objemově nestlačitelný.

Dalším specifickým rysem elastomerů je časová závislost deformace. Elastické deformační přeměny mají určité zpoždění, protože jsou brzděny vnitřními viskózními odpory uvnitř kaučukové hmoty. Deformační chování těchto materiálů má obecně elastické i viskózní projevy současně. Takové chování se označuje jako viskoelastické. Mechanické chování elastomerů je také velmi závislé na teplotě. [3]

Při nízkých teplotách (pod -50°C) tuhost materiálu výrazně roste a může se blížit vlastnostem kovů. Naopak při vysokých teplotách (nad 100°C) dochází k velkému poklesu tuhosti. Z tohoto lze usoudit, že pro použití Hookeova zákona nejsou splněny dvě základní podmínky:

- Závislost deformace na napětí není lineární
- Dochází k velkým deformacím ($\varepsilon > 2\%$)

Přesto lze Hookeův zákon s dostatečnou přesností použít u elastomerních materiálů, pokud nepředpokládáme větší zatěžování daného prvku. Pokud je deformace větší, přesnost výrazně klesá a je nutné použít nelineárního popisu závislosti napětí-deformace, který je více přesný. [3]

2.1 Hyperelastické deformace

Jelikož u elastomerů nemůžeme použít pro většinu případů Hookeův zákon, musíme použít hyperelastické modely, které formulují vztah pro hustotu deformační energie ve tvaru: [3]

$$W = f(I_1, I_2, I_3\{M\}) \text{ nebo ve tvaru } W = f(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3\{M\}) \quad (1)$$

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 ku původní délce L_0 .

$$\lambda_i = \frac{L_i}{L_0} \quad (2)$$

Deformační invarianty I_i jsou definovány vztahy:

$$I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 \quad (3)$$

$$I_2 = \lambda_1^2 \cdot \lambda_2^2 + \lambda_2^2 \cdot \lambda_3^2 + \lambda_3^2 \cdot \lambda_1^2 \quad (4)$$

$$I_3 = \lambda_1^2 \cdot \lambda_2^2 \cdot \lambda_3^2 \quad (5)$$

Pro nestlačitelné materiály je invariant $I_3 = 1$.

Pokud známe funkci W , můžeme napětí vypočítat jako derivaci této funkce podle příslušné složky deformace. [3]

$$S_{ij} = 2 \cdot \frac{\partial W_i}{\partial C_{ij}} \quad (6)$$

kde S_{ij} jsou složky 2. Piola-Kirchhoffova tenzoru napětí a C_{ij} jsou složky pravého Cauchy-Greenova deformačního tenzoru. [3]

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

$$C_{ij} = \begin{bmatrix} \lambda_1^2 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2^2 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_3^2 \end{bmatrix} \quad (7)$$

Z rovnice (6) lze odvodit vztah pro složky Cauchyova tenzoru napětí (skutečné napětí).

$$s_{ij} = p\delta_{ij} + 2 \cdot \frac{\partial W_i}{\partial I_1} \cdot C_{ij} - 2 \cdot \frac{\partial W_i}{\partial I_2} \cdot C_{ij}^{-1} \quad (8)$$

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

2.2 Základní módy namáhání

Mezi základní druhy namáhání elastomerních látek patří:

- Jednoosý tah
- Čistý smyk
- Dvouosý tah

2.2.1 Jednoosý tah

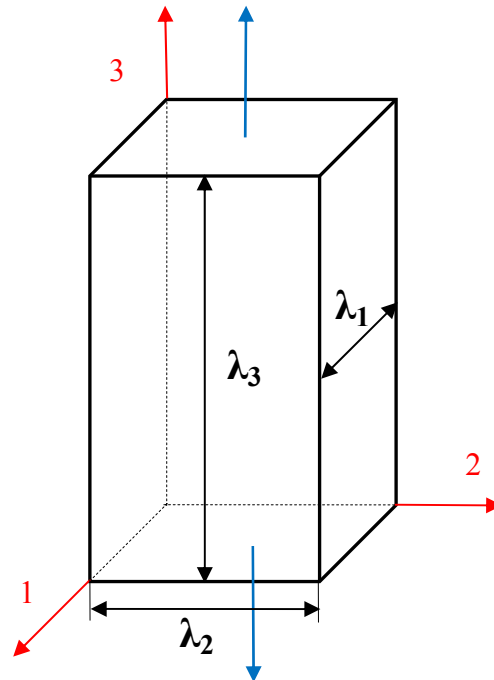
Při jednoosé napjatosti na dané těleso působí síla pouze v jednom směru (Obr. 4). Jednoduché prodloužení je pak definováno poměrným prodloužením, kde: [4]

$$\lambda_1 = \lambda; \lambda_2 = \lambda_3 = \lambda^{1/2} \quad (9)$$

Daná deformace vychází ze stavu nestlačitelnosti, což znamená, že objem zůstává stále stejný. Z toho vyplývá $\lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \lambda_3 = 1$. Pro dané napětí, kde jsou boční strany daného

vzorku nezatížené, platí $s_2 = s_3 = 0$. Pro tyto napětí se rovnice napětí (8) stane rovnicí neznámého stlačení p : [4]

$$s = 2 \cdot \left[\left(\frac{\partial W}{\partial I_1} \right) + \lambda^{-1} \cdot \left(\frac{\partial W}{\partial I_2} \right) \right] \cdot (\lambda^2 - \lambda^{-1}) \quad (10)$$



Obr. 4. Jednoosá napjatost

2.2.2 Čistý smyk

Čistý smyk můžeme definovat jako napětí působící ve směru 1 v takové formě, že je zabráněno změně šířky ve směru 2, tzn. $\lambda_2=1$ (Obr. 5). Při smykové deformaci linie rovnoběžná s jednou z hlavních os nepodléhá žádnému prodloužení. Název „čistý smyk“ znamená, že hlavní osy nerotují během deformace. Výška daného vzorku ve směru namáhání, je značně menší než horizontální šířka w ve směru druhém, a to řádově méně než jedna desetina w . Dlouhé horizontální svorky zabraňují kontrakci vedlejších stran vzorku a dochází k napětí ve vertikálním směru. Smyk vzniká v příčné rovině pod úhlem 45° . [4]

Poměrné prodloužení je při deformaci $\lambda_1 = \lambda$; $\lambda_2 = 1$; $\lambda_3 = \lambda^{-1}$, napětí $s_3 = 0$. Napětí s_2 je vyvoláno tuhými svorkami (není nulové). Tlak p je pak definován vztahem:

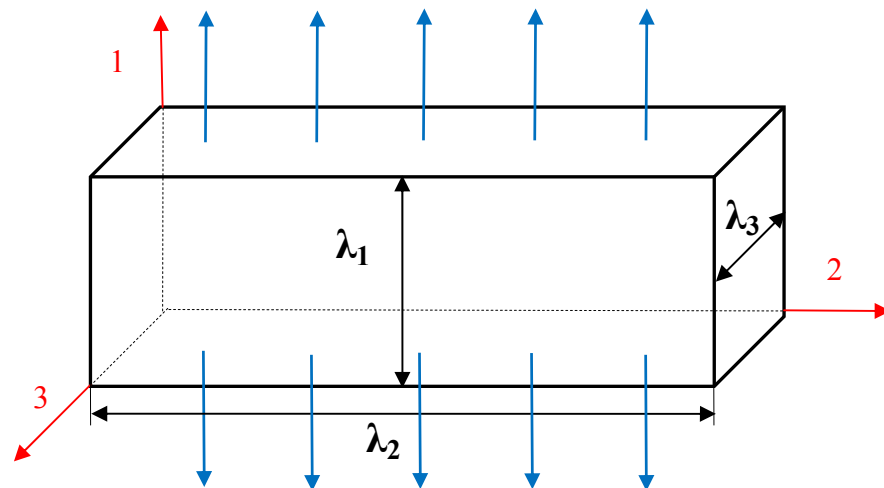
$$p = -2 \cdot \left[\lambda^{-2} \cdot \left(\frac{\partial W}{\partial I_1} \right) + \lambda^{-2} \cdot \left(\frac{\partial W}{\partial I_2} \right) \right] \quad (11)$$

Napětí v protažovaném směru je dáno vztahem:

$$s_1 = s = 2 \cdot \left(\frac{\partial W}{\partial I_1} + \frac{\partial W}{\partial I_2} \right) \cdot (\lambda^2 - \lambda^{-2}) \quad (12)$$

Vedlejší napětí je dáno vztahem:

$$s_2 = 2 \cdot \left[\frac{\partial W}{\partial I_1} + \lambda^2 \cdot \left(\frac{\partial W}{\partial I_2} \right) \right] \cdot (1 - \lambda^{-2}) \quad (13)$$



Obr. 5. Čistý smyk

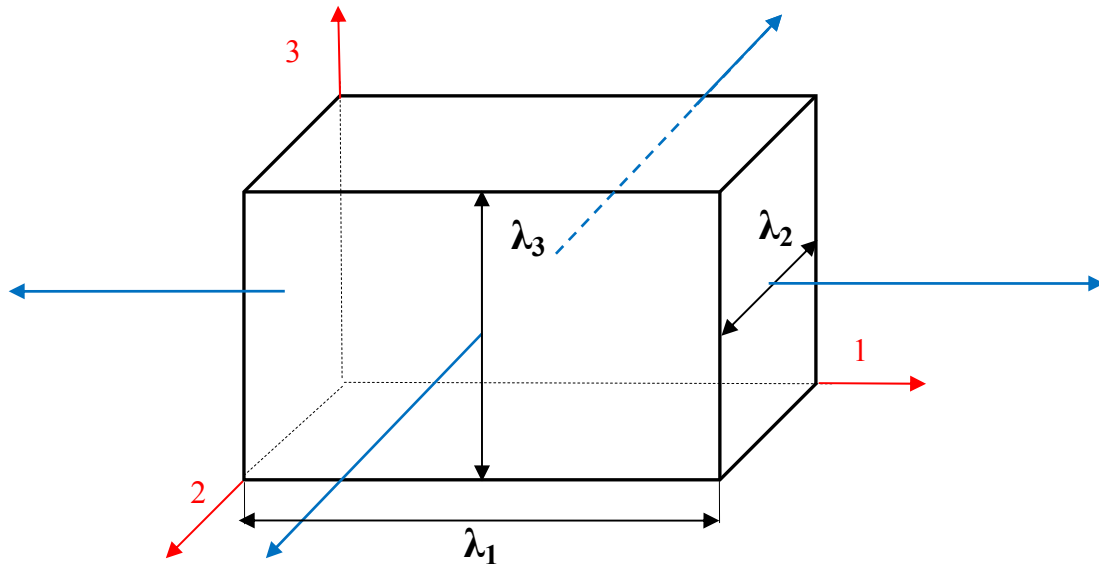
2.2.3 Dvouosý tah

Poměrné protažení můžeme definovat: $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda$; $\lambda_3 = \lambda^{-2}$. Napětí $\sigma_3 = 0$, protože tato strana výrobku je nezatížená. Stlačení je rovno: [4]

$$p = -2 \cdot \left[\lambda^{-4} \cdot \left(\frac{\partial W}{\partial I_1} \right) + \lambda^{-4} \cdot \left(\frac{\partial W}{\partial I_2} \right) \right] \quad (14)$$

Napětí s_1 a s_2 jsou dány vztahem:

$$s_1 = s_2 = 2 \cdot \left[\frac{\partial W}{\partial I_1} + \lambda^2 \cdot \left(\frac{\partial W}{\partial I_2} \right) \right] \cdot (\lambda^2 - \lambda^{-4}) \quad (15)$$



Obr. 6. Biaxiální napjatost

2.3 Hyperelastické modely

V průběhu posledních 60. let bylo různými autory postupně navrženo velké množství hyperelastických modelů. Tyto modely jsou nezávislé na rychlosti a historii deformace. V posledních letech jsou však publikovány práce zabývající se modelováním zahrnující i tyto efekty. [3]

Část hyperelastických modelů je založena na mikromechanických modelech vnitřní struktury (např. Neo-Hookean, Arruda-Boyce). Materiálové konstanty v těchto modelech mají jednoznačný fyzikální význam. Další skupina modelů byla navržena pouze na základě pozorování deformačně napěťového chování elastomerů na makroskopické úrovni tak, aby model co nejlépe aproximoval toto pozorování. Takové modely (např. Polynomický, Yeoh, Mooney-Rivlin, Ogden) jsou nazývány fenomenologické a jejich materiálové konstanty často nemají konkrétní fyzikální význam. [3]

2.3.1 Hyperelastické modely využívané ve FEM systémech

Jednotlivé hyperelastické modely se odlišují definicí funkce hustoty deformační energie W . Níže jsou uvedeny dnes nejpoužívanější tvary funkce W , které jsou většinou pojmenovány po svých autorech. [3]

Polynomická funkce

Polynomická forma je založena na prvním a druhém deformačním invariantu (I_1 , I_2). Jde o model, jenž má formu: [3]

$$W = \sum_{i+j=1}^N c_{ij} (I_1 - 3)^i (I_2 - 3)^j \quad (16)$$

kde c_{ij} jsou materiálové konstanty, za N se dosazují hodnoty od jedné do nekonečna, ale obvykle je hodnota N maximálně 3. Tuto formu můžeme použít pro deformaci dosahující až 300%. [3]

Yeoh

Model Yeoh je podobný polynomické formě, ale nepoužívá druhého deformačního invariantu a jako takový se obtížněji vyhodnocuje a poskytuje méně přesné výsledky. Jeho výhodou je naopak jeho jednoduchost. Je definován jako: [3]

$$W = \sum_{i=1}^N c_{i0} (I_1 - 3)^i \quad (17)$$

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

Yeoh model je obvykle uvažován s $N = 3$. Tří parametrový Yeoh model obecně poskytuje dobré výsledky pro deformace velkého rozsahu, i když nemusí být přesný pro nižší hodnoty deformace. [3]

Neo-Hookean

Model Neo-Hookean patří k nejstarším a nejjednodušším modelům. Je možné ho brát jako podmnožinu polynomické formy pro $N=1$, $c_{01} = 0$, $c_{10} = \mu/2$. Vychází z termodynamických principů a ze statistického přístupu k modelování vnitřní struktury elastomerů. Model není schopen věrohodně postihnout závěrečnou vyztužovací fázi napěťově deformační odezvy elastomerů. Dále model vykazuje lineární chování při smykové deformaci. Model je použitelný v rozsahu 30-40% deformací v jednoosém namáhání a v 80-90% deformací v čistém smyku. Je definován takto: [3]

$$W = \frac{\mu}{2} (I_1 - 3) \quad (18)$$

kde μ je počáteční smykový modul.

$$\mu = nkT \quad (19)$$

Kde n je počet polymerních řetězců v jednotkovém objemu, k je Boltzmannova konstanta a T je absolutní teplota. [3]

Mooney-Rivlin

Ve čtyřicátých letech 20. stol. Mooney navrhl fenomenologický model se dvěma parametry založenými na předpokladu lineárního vztahu mezi zatížením a smykem během jednoduché smykové deformace. V padesátých letech Rivlin modifikoval Mooneyho model, aby obdržel obecné vyjádření funkce deformační energie vyjádřené pomocí deformačních invariantů. [3]

Používají se dvou, tři, pěti a devíti parametrové Mooney-Rivlin modely, které také můžeme považovat za speciální případy polynomické formy. [3]

Dvou parametrový model je jeden z nejvíce používaných modelů. Je ekvivalentní polynomické formě, kde $N = 1$: [3]

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

Tří parametrový model je shodný s polynomickou formou pro $N = 2$ a $c_{20} = c_{02} = 0$. Je definován takto: [3]

$$W = c_{10}(I_1 - 3) + c_{01}(I_2 - 3) + c_{11}(I_1 - 3)(I_2 - 3) \quad (21)$$

Pěti parametrový model je ekvivalentní polynomické funkci kde $N=2$. [3]

$$W = c_{10}(I_1 - 3) + c_{01}(I_2 - 3) + c_{20}(I_1 - 3)^2 + c_{11}(I_1 - 3)(I_2 - 3) + c_{02}(I_2 - 3)^2 \quad (22)$$

Devíti parametrový model je ekvivalentní polynomické funkci kde $N=3$. [3]

$$\begin{aligned} W = & c_{10}(I_1 - 3) + c_{01}(I_2 - 3) + c_{20}(I_1 - 3)^2 + c_{11}(I_1 - 3)(I_2 - 3) \\ & + c_{02}(I_2 - 3)^2 + c_{30}(I_1 - 3)^3 + c_{21}(I_1 - 3)^2(I_2 - 3) \\ & + c_{12}(I_1 - 3)(I_2 - 3)^2 + c_{03}(I_2 - 3)^3 \end{aligned} \quad (23)$$

kde: c_{10} , c_{01} , c_{20} , c_{02} , c_{30} , c_{03} , c_{21} , c_{12} jsou materiálové konstanty.

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 %. [3]

Arruda-Boyce

Arruda-Boyce je model založený na mikromechanice vnitřní struktury elastomerních materiálů. Daný model může být považován jako rozšíření modelu Yeoh, kde $N=5$ a konstanty mají reálný význam. [3]

$$W = \mu \sum_{i=1}^5 \frac{C_i}{\lambda_L^{2i-2}} (I_1^i - 3^i) \quad (24)$$

kde konstanty C_i jsou definovány jako:

$$C_1 = \frac{1}{2}, \quad C_2 = \frac{1}{20}, \quad C_3 = \frac{11}{1050}, \quad C_4 = \frac{19}{7000}, \quad C_5 = \frac{519}{673750} \quad (25)$$

kde m je počáteční smykový modul 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. Model je vhodný pro deformaci do 300 %. [3]

Gente

Tento model je mikromechanický a je podobný formulačně složitějšímu modelu Arruda-Boyce, jelikož také užívá konceptu limitního síťového protažení, nevychází však z modelu vnitřní struktury elastomerů. [3]

$$W = -\frac{EI_m}{6} \ln \left(1 - \frac{I_1 - 3}{I_m} \right) \quad (26)$$

Kde E je počáteční modul pružnosti, který je pro nestlačitelné materiály 3μ . I_m je limitní hodnota členu (I_1-3) . Jestliže hodnota přirozeného logaritmu narůstá, výsledná forma se bude podobat modelu Yeoh. Výhody modelu spočívají v jeho jednoduchosti (pouze dvě materiálové konstanty) a schopnosti postihnout závěrečnou vyztužovací fázi napětově deformační odezvy. [3]

Ogden

Ogden model patří do skupiny fenomenologických modelů, které danou funkci vyjadřují v hodnotách hlavních protažení. Daný model je široce používaný a poměrně dobře vystihuje chování elastomerů i při velkých deformacích. [3]

$$W = \sum_{i=1}^N \frac{\mu_i}{\alpha_i} (\lambda_1^{\alpha_i} + \lambda_2^{\alpha_i} + \lambda_3^{\alpha_i} - 3^i) \quad (27)$$

Kde μ_i a α_i jsou materiálové konstanty bez odpovídajícího fyzikálního významu. Za N se jako u většiny modelů volí hodnota maximálně 3.

Pro $N = 1$ a $\alpha_i = 2$ se Ogden stává ekvivalentní k modelu Neo-Hookean. Pro $N = 2$, $\alpha_i = 2$ a $\alpha_i = -2$ Ogden přechází na dvou parametrový Mooney-Rivlin model. Ogden model může být používán pro deformace až do 700 %. [3]

Mezi další modely, které se ještě používají pro popis napětí a deformací elastomerních látek patří: [5]

Second- order invariant

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

Third- order deformation

$$W = c_{10}(I_1 - 3) + c_{01}(I_2 - 3) + c_{11}(I_1 - 3)(I_2 - 3) + c_{20}(I_1 - 3)^2 + c_{30}(I_1 - 3)^3 \quad (29)$$

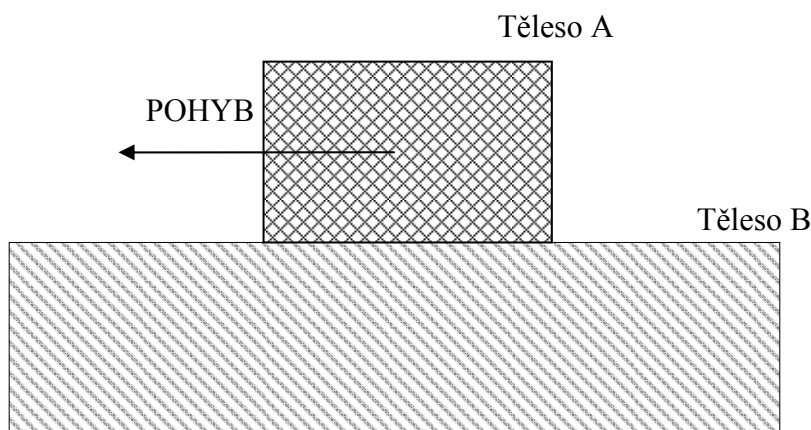
Kloaner – Segal

$$W = c_{10}(I_1 - 3) + c_{01}(I_2 - 3) + c_{11}(I_1 - 3)(I_2 - 3) + c_{20}(I_1 - 3)^2 + c_{03}(I_2 - 3)^3 \quad (30)$$

3 TŘENÍ

Tření můžeme definovat jako kontaktní reakční sílu, která vzniká mezi dvěma povrchy při jejich dotyku. Výsledná reakční síla závisí na mnoha různých mechanismech, které jsou ovlivněny změnou polohy a relativní rychlostí, tvarem kontaktní plochy, vlastnostmi povrchu obou částí nebo přítomností maziva.

Na následujícím obrázku (Obr. 7) je zobrazeno jednoduché schéma tření.



Obr. 7. Základní schéma tření

Kde těleso B je v klidu a těleso A koná pohyb.

3.1 Základní dělení tření

Existuje mnoho možností, jak lze tření rozdělit. Mezi nejčastěji používané rozdělení patří:

- podle místa působení třecích mechanismů
- podle skupenství kontaktních ploch
- podle druhu pohybu

3.1.1 Rozdělení tření podle místa působení třecích mechanismů

Vnitřní tření

K vnitřnímu tření dochází uvnitř látky, ve které dochází k vzájemnému silovému působení mezi částicemi při proudění. Toto tření se projevuje například u reálných kapalin, ale také v pevných látkách. Vnitřní tření u kapalin charakterizuje fyzikální veličina, která se nazývá viskozita. U pevných látek způsobuje vnitřní tření změnu elastických vlastností látek. [6]

Vnější tření

K vnějšímu tření dochází mezi minimálně dvěma tělesy při jejich kontaktu, přičemž alespoň jedno z těles se musí pohybovat. Vnější tření je více známé než tření vnitřní. Vnější tření bývá často nežádoucí, v praxi se tření může snížit např. mazáním. [6]

3.1.2 Rozdělení tření podle skupenství kontaktních ploch

Tření v kapalinách

V kapalinách dochází k vnějšímu tření jen minimálně, naopak převládá tření vnitřní. Vnitřní tření kapalin vzniká pouze u reálných kapalin a to jako důsledek přeměny části kinetické energie jednotlivých částic v tepelnou energii při proudění. Tyto kapaliny můžeme nazývat viskózní. [6]

Tření mezi tuhými tělesy

Tření mezi tuhými tělesy je nejznámější. Setkáváme se s ním při každodenním životě. K tření dochází mezi dvěma pevnými látkami, přičemž se alespoň jedno těleso pohybuje. Může to být mezi kovy, plasty, keramikou a dalšími látkami. Samozřejmě nemusí docházet ke tření jen mezi stejnými materiály, ale může dojít ke kombinaci tuhých povrchů např. kov a plast, dřevo a plast a další. [6]

Tření v plynech

Popis tření v plynech je velmi podobný tření v kapalinách. Kontaktní vrstva má vlastnosti plynu.

3.1.3 Rozdělení tření podle druhu pohybu

Statické tření (klidové tření)

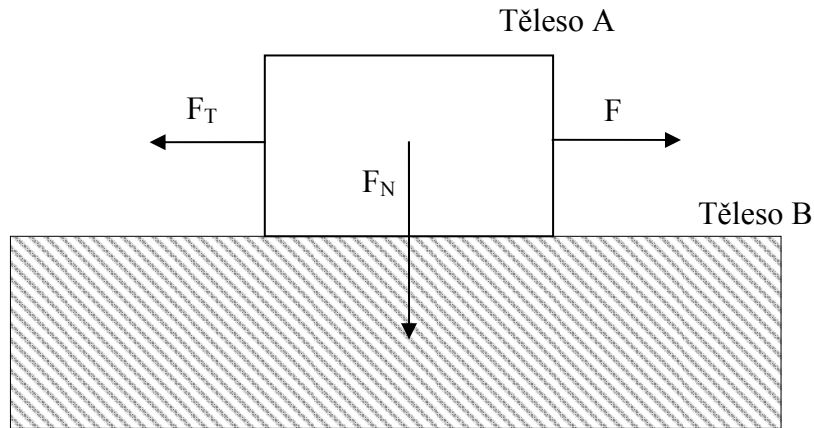
Statické tření vzniká mezi tělesy, které se vůči sobě nepohybují, jsou v klidu. Statické tření je speciální případ smykového tření (Obr. 8). [6]

Statické tření můžeme charakterizovat pomocí klidové třecí síly F_T , která je dána:

$$F_T = f_0 F_N \quad (31)$$

kde f_0 je součinitel klidového tření, F_N je kolmá tlaková síla (např. tíha tělesa).

Součinitel klidového tření je definován jako podíl třecí klidové síly a kolmé tlakové síly mezi tělesy při klidovém tření. Součinitel klidového tření bývá větší než součinitel smykového tření pro stejná tělesa. [6]



Obr. 8. Statické tření

Smykové tření

Smykové tření (kinematické tření) je tření, které vzniká mezi dvěma nebo více tělesy při jejich vzájemném posuvném pohybu (Obr. 9). [6]

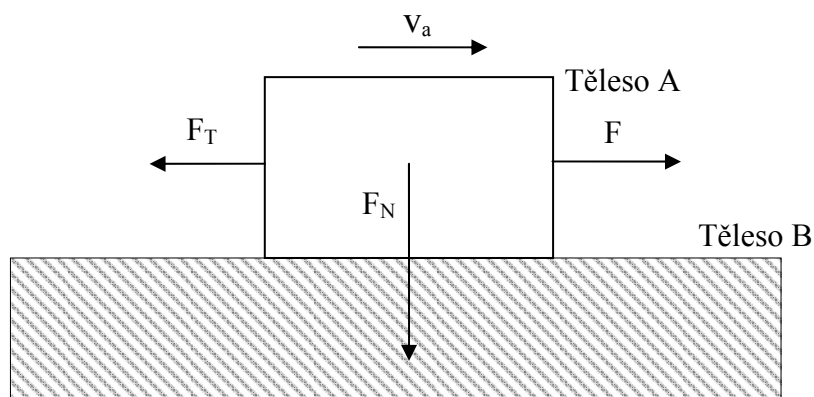
Při smykovém tření mezi tělesy vzniká třecí síla, která je dána:

$$F_f = f F_N \quad (32)$$

kde f je součinitel smykového tření, F_N je kolmá tlaková síla (např. tíha tělesa).

Velikost třecí síly závisí na kvalitě povrchu obou těles a na normálové síle.

Součinitel smykového je definován jako podíl třecí síly a kolmé tlakové síly mezi tělesy při smykovém tření.



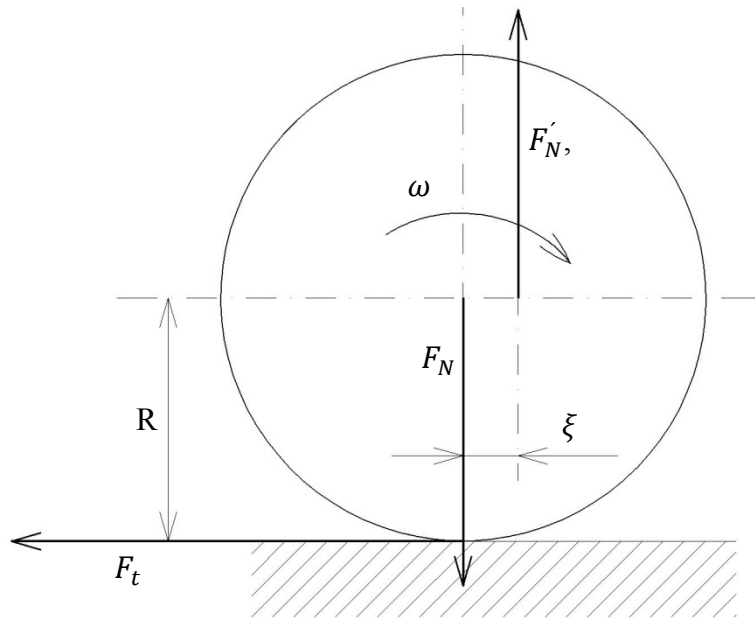
Obr. 9. Dynamické tření

Valivé tření

Valivé tření je druh tření, které vzniká mezi podložkou a mezi tělesem kruhového průřezu při jeho valivém pohybu (Obr. 10). [6]

V obrázku je znázorněna normálová síla F_N , která působí v těžišti směrem dolů. Jako reakce na ni se vytvoří síla F'_N , která nepůsobí v těžišti, ale je posunuta o vzdálenost ξ a působí opačným směrem. Tato vzdálenost se nazývá rameno valivého odporu. [6]

$$F_t = \xi \frac{F_N}{R} \quad (33)$$



Obr. 10. Valivé tření

4 SOFTWAREVÁ PODPORA

Protože analyzovaný prvek je tvarově složitější, je vhodné využít určitých počítačových programů, které zajistí přesný a rychlý výpočet.

4.1 Metoda konečných prvků

Metoda konečných prvků (Finite Element Method - FEM) slouží k řešení parciálních derivačních rovnic. FEM je zobecněná Ritz-Galerkinova variační metoda užívající básových funkcí s malým kompaktním nosičem, úzce spjatým se zvoleným rozdělením řešené oblasti na konečné prvky. [7]

Zpravidla je možné řešit touto metodou problémy, které klasickými postupy nelze úspěšně řešit. Metoda pokrývá celou šíři fyzikálních aplikací: statika, dynamika, akustika, teplo, elektromagnetické pole, elektrostatika, piezoelektrické jevy a proudění. FEM řeší tyto problémy soustavou lineárních rovnic, jejichž konstrukce a řešení lze efektivně provádět za použití výpočetní techniky. [4]

Mezi základní typy FEM analýzy patří: [7]

- Statický – rovnováha vnitřních a vnějších sil působících na těleso. Daná analýza je nezávislá na čase. $\sum F = 0$
- Dynamický – např. šíření vln, vibrace, rychlé děje (exploze, rázy). Tato analýza je závislá na čase. $\sum F = m \cdot a$

4.2 FEM systémy

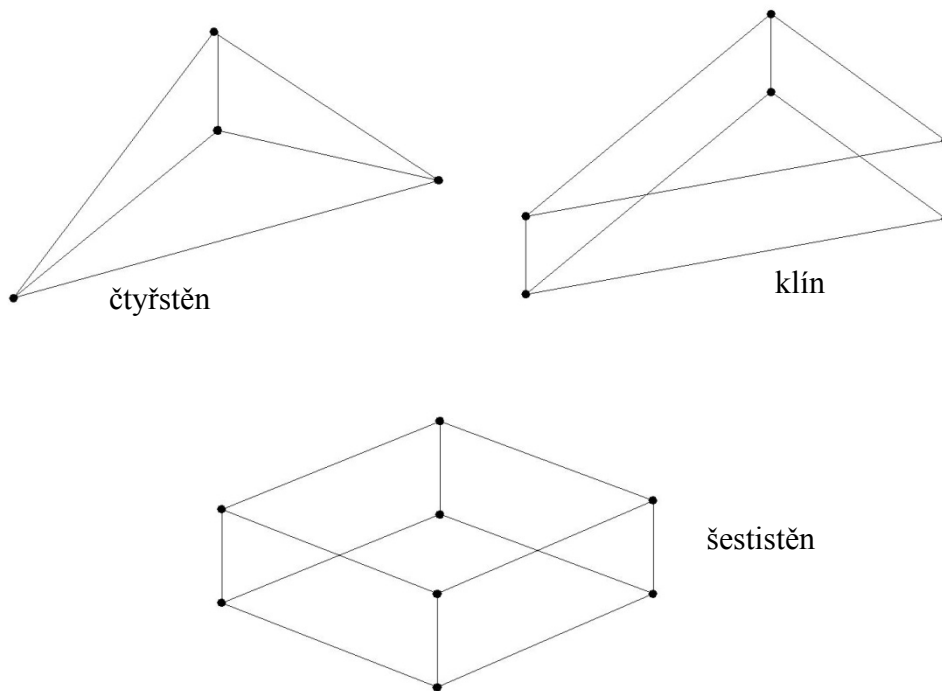
FEM systémy pro svůj výpočet používají metodu konečných prvků. FEM systémy můžeme rozdělit do tří skupin a to jako:

Preprocessor – vytváření modelu

Solver – probíhá výpočet

Postprocessor – vyhodnocení a zpracování výsledků

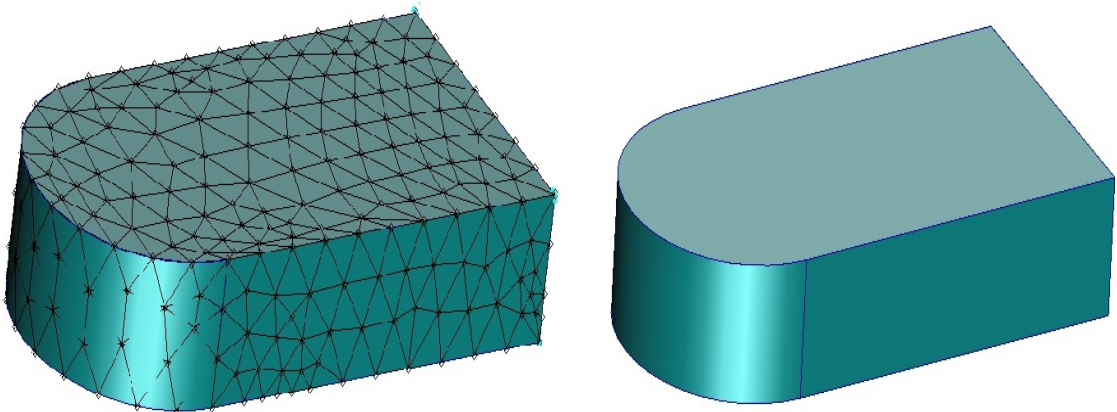
V daných systémech se podle tvaru analyzovaného tělesa používají elementy tvaru přímky, trojúhelníku, čtyřhranu pro 2D tělesa a pro 3D tělesa se používají čtyřstěn, klín nebo šestistěn (Obr. 12). [7]



Obr. 11. Základní 3D elementy

Většina FEM systémů pracuje v následujícím pořadí. V preprocessoru se vytváří geometrický model, definují se jeho vlastnosti, vytváří se na něm síť, která obsahuje určitý počet elementů (počet závisí na přesnosti výpočtu) a stanovují se okrajové podmínky spolu s uchycením a zatížením. Takto definovaný a zatížený model je později podroben výpočtu v tzv. solveru. Vypočtené výsledky (deformace, posunutí, napětí) jsou zobrazeny v postprocessoru. [7]

Na následujícím obrázku (Obr. 12) je zobrazen rozdíl mezi FEM modelem a geometrickým modelem, kde FEM model tělesa je vytvořen z konečného počtu čtyřstěňů.



Obr. 12. FEM model x Geometrický model

4.3 MSC Marc&Mentat a MSC Patran

Pro správnou analýzu termoplastických elastomerních materiálů je vyžadováno použití vhodných programů, které dokážou pracovat s nelineární charakteristikou jejich chování. Mezi takové programy patří i MSC Patran a MSC Marc&Mentat od společnosti MSC Software Corporation. [4]

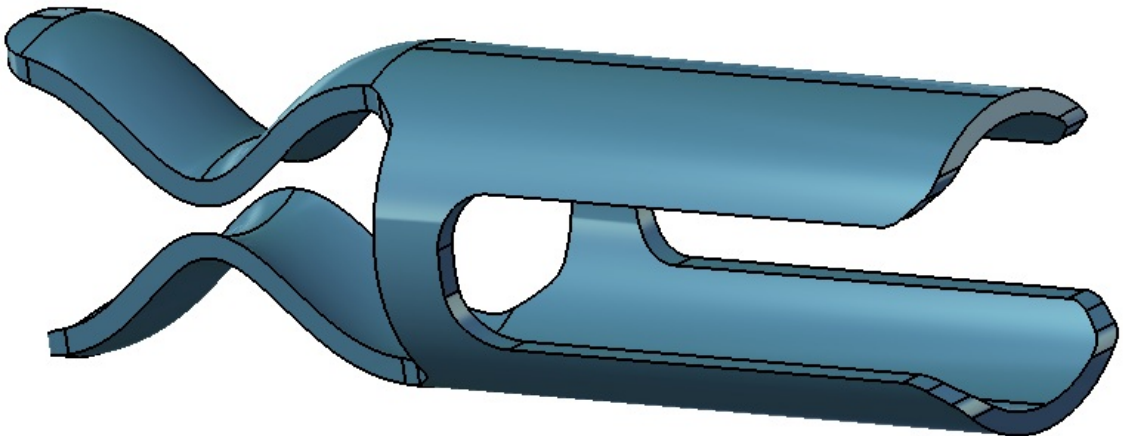
MSC Patran je preprocessor a postprocessor, který umožňuje vložení jakéhokoliv modelu z nejrozšířenějších CAD systémů s řešiči MSC a poskytuje základnu pro přípravu dat a vyhodnocení výsledků prováděných simulací. [4]

Pro samotné řešení je použit MSC Marc. Jedná se o systém s výrazným zaměřením na nelineární analýzy s pokrokovými algoritmy pro řešení kontaktních problémů a silně nelineárních materiálů jako jsou například elastomery. [4]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

5 STANOVENÍ CÍLŮ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Cílem této bakalářské práce je provést mechanickou analýzu polyuretanového pouzdra a z výsledků zjistit, jaký vliv má tření mezi podávaným materiálem a pouzdrem na výsledné napětí a síly a porovnat, jak se liší s měnícím koeficientem tření. Dále určit vliv zpětného pohybu tyče na deformaci pouzdra.

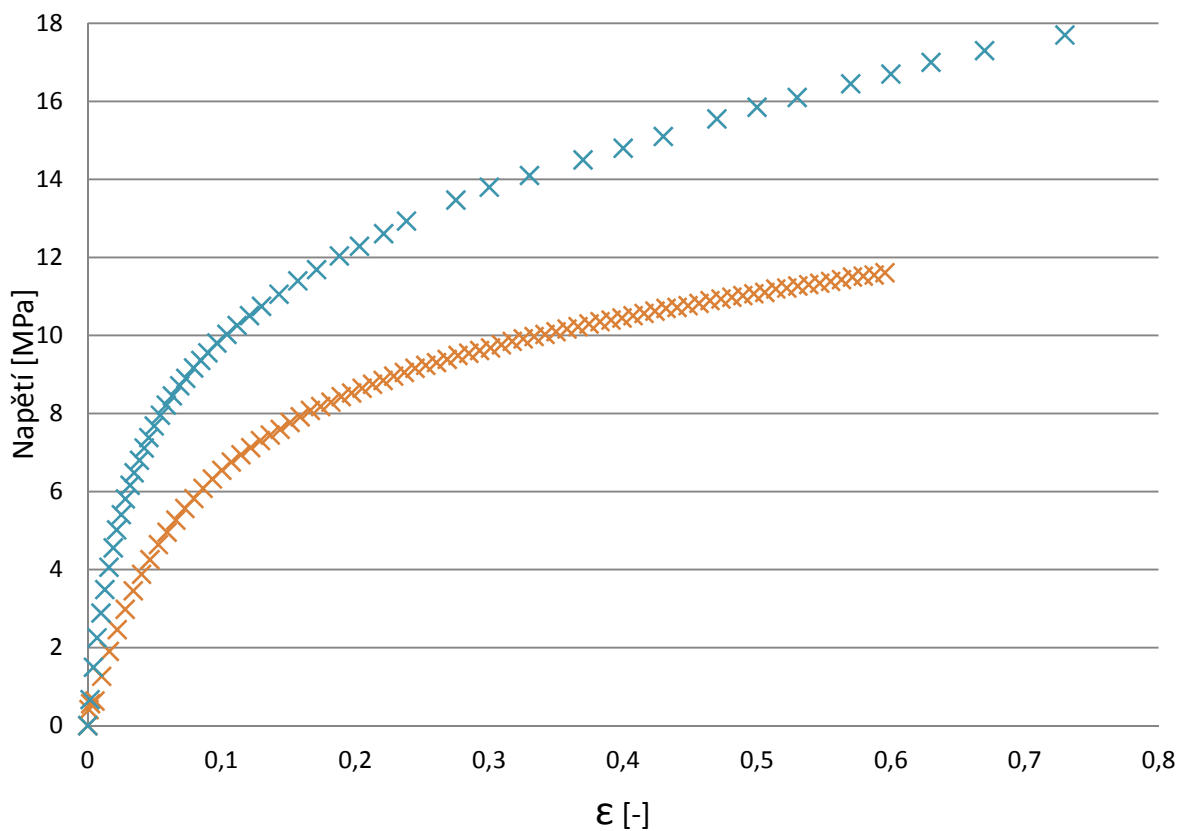


Obr. 13. Model pouzdra

6 MECHANICKÉ VLASTNOSTI POUŽITÉHO POLURETANU

Pro numerickou analýzu je nutné znát mechanické vlastnosti materiálu. Z důvodu nelineárního chování materiálu je potřeba provést nebo získat výsledky zkoušky jak jednoosým tahem, tak i tahem dvouosým. Pro analýzu byly použity naměřené hodnoty ze dne 24. 10. 2010.

Na následujícím grafu (Obr. 14) jsou zobrazena data získaná provedením jednoosé a dvouosé zkoušky tahem. Modře jsou v grafu zobrazeny hodnoty získané pomocí zkoušky dvoj-osým tahem a oranžově jsou zobrazeny hodnoty získané zkouškou jednoosým tahem.



Obr. 14. Graf- Naměřené hodnoty při zkouškách materiálu

6.1 Materiálové údaje polyuretanu MTQ 25145

V následující tabulce jsou uvedeny souhrnné materiálové vlastnosti použitého polyuretanu.

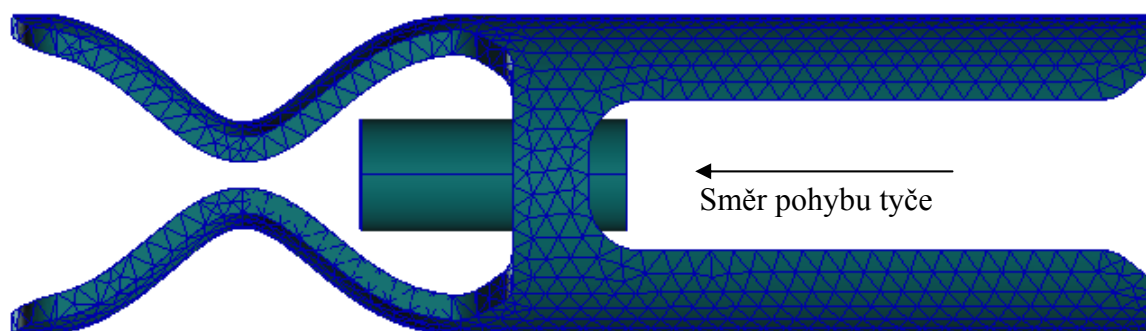
Tab. 1: Vlastnosti polyuretanu MTQ 25145 [8]

Prepolymer			MTQ 25145
Řetězec			T 20 + BDO
Procesní parametry	T 20 dílů na 100 dílů MTQ 25145		40
	BDO dílů na 100 dílů MTQ 25145		12,65
	Katalyzátor	D5 % / BDO (hmotnostně) smíšené s BDO	1,30
		SD5 % / celkem (hmotnostně)	0,51
Typické elastomerní vlastnosti		Jednotky	Norma
	Tvrdość při -5 °C	Shore A	DIN 53505
	Tvrdość při 20 °C	Shore A	DIN 53505
	Tvrdość při 80 °C	Shore A	DIN 53505
	10% modul	MPa	DIN 53504
	100% modul	MPa	DIN 53504
	200% modul	MPa	DIN 53504
	300% modul	MPa	DIN 53504
	Pevnosť v tahu	MPa	DIN 53504
	Odolnosť proti opotřebení	mm ³	DIN 53516
	Pružnosť	%	DIN 53512
	Tažnosť	%	DIN 53504
	Měrná hmotnosť	-	
			90
			89
			6.5
			13.5
			19.1
			27.8
			40
			40
			59
			450
			1,09

7 POPIS ZKOUMANÉHO PROBLÉMU

Jak už bylo dříve napsáno, jedná se o problém, při kterém je do polyuretanového pouzdra zasouvána tyč. Při tomto zasouvání dochází ke vzájemnému kontaktu, a tím jsou na pouzdře vyvolány určité deformace.

Pro porovnávání byly použity tyče o průměru 15, 20, 25 a 30 mm a rozmezí koeficientu tření bylo zvoleno od 0 po 1 s krokem po 0,2.



Obr. 15. Schéma pohybu tyče

7.1 První zkoumaný problém

Hlavním cílem bylo zjistit, jaký vliv bude mít tření, reprezentované změnami koeficientu tření, na výsledné napětí a síly, které byly vyvolány v pouzdře pohybem tyče. Pro tento případ byl zvolen pohyb vnitřní tyče ve směru, při kterém je daná tyč zasouvána do pouzdra. Tyč byla umístěna v ose pouzdra a byla považována za dokonale tuhou ve srovnání s tuhostí pouzdra (Obr. 15).

7.2 Druhý zkoumaný problém

Cílem druhého zkoumaného problému bylo zjistit, zdali při vsunutí a následnému vysunutí tyče dojde k neočekávané deformaci, která by mohla způsobit překroucení nebo dokonce přetržení svěrek pouzdra.

8 NUMERICKÁ ANALÝZA POUZDRA

Před samotnou numerickou analýzou je potřeba co nejpřesněji interpretovat daný zkoumaný problém, aby se co nejvíce podobal skutečnosti. Proto pro získání správných výsledků je potřeba definovat několik základních údajů. Jsou to materiálové vlastnosti, tvorba sítě a definování okrajových podmínek a zatížení, které jsou postupně zadávány do programu MSC Patran.

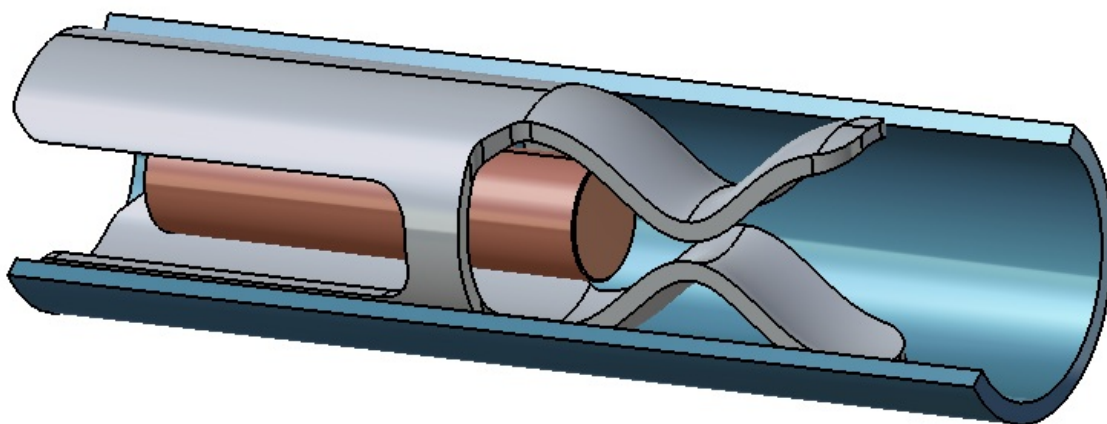
8.1 Modelování pouzdra

Pro samotné modelování pouzdra mohl být použit i program MSC Patran, který je spíše vhodný pro modelování jednodušších tvarů. Z důvodu větší tvarové složitosti pouzdra byl jako program pro vytvoření modelu použit program CATIA V5R18. Model byl vytvořen v modulu Part design, který slouží pro tvorbu jednotlivých dílů (Obr. 13).

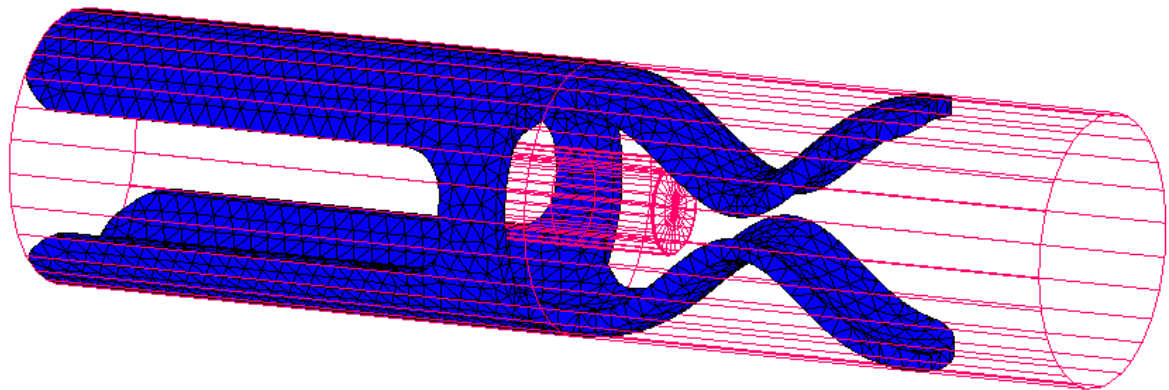
Z důvodu nekompatibility nativního formátu Catie .CATPart a formátu pro import modelu do programu MSC Patran, bylo potřeba vytvořený model uložit do formátu .stp, který už daný program pro import modelu podporuje.

8.2 Vytvoření modelu pro FEM analýzu

Jak je vidět na Obr. 16 je pouzdro uloženo v trubce, která je nehybná a uvnitř se bude pohybovat tyč o daném průměru. Tyč a trubka byly vytvořeny v programu MSC Patran a byly vytvořeny jako plochy, které budou nedeformovatelné. Na Obr. 17 jsou tyto vytvořené plochy znázorněné červeně.



Obr. 16. Uložení pouzdra



Obr. 17. Model pro analýzu

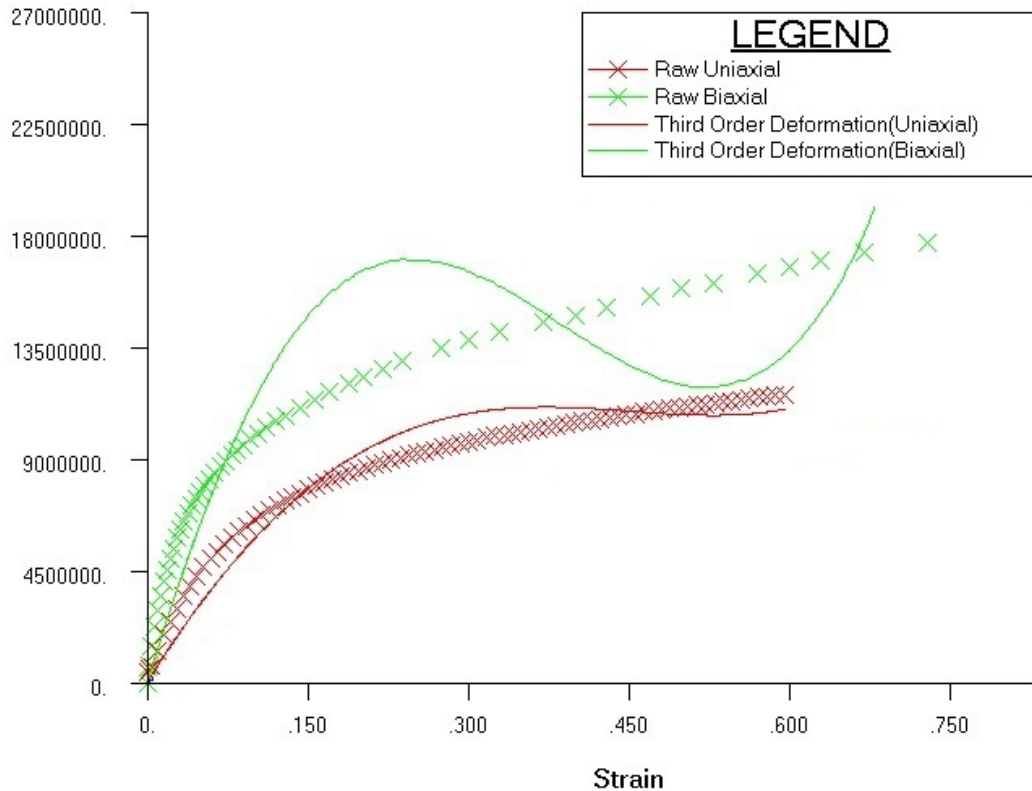
8.3 Definování materiálových vlastností

Pro popis materiálového chování byly použity data ze zkoušky jednoosým a dvojosým tahem. Tato data byla uložena ve formátu .dat, se kterým dokáže program MSC Patran následně pracovat.

Materiálu je nutné přiřadit matematický model, který co nejpřesněji dokáže popsat chování materiálu zjištěné při zkouškách. V MSC Patran je přímo funkce, jež po importu a přiřazení dat jednotlivým zkouškám dokáže vypočítat pomocí zvoleného matematického modelu materiálové konstanty.

Po propočtu všemi modely, který program obsahoval, byla nejmenší chyba zjištěna u 3rd Order Deformation. Materiálové konstanty získané pomocí zvoleného modelu byly: $C_{10}=3807216,8$ Pa; $C_{01}=7772891$ Pa; $C_{11}=-3797253,5$ Pa; $C_{20}=-2287461$ Pa; $C_{30}=1915801,1$ Pa.

Na následujícím obrázku (Obr. 18) je zobrazen graf závislosti napětí na deformaci, který srovnává naměřené hodnoty při zkouškách s hodnotami vypočtených pomocí 3rd Order Deformation modelu. Naměřené hodnoty jsou označeny křížkem a hodnoty získané pomocí použitého modelu jsou zobrazeny křivkou. V grafu jsou zobrazeny křivky, které popisují chování při jednoosém a dvojosém namáhání materiálu.

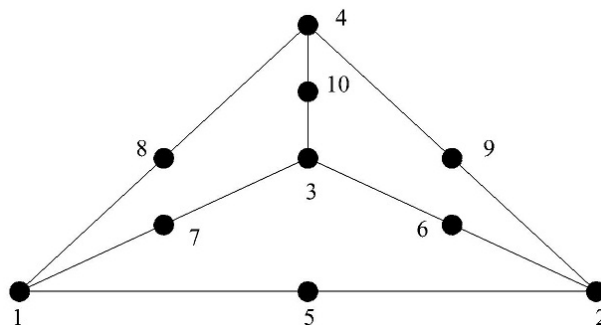


Obr. 18. Výsledky zkoušky materiálu porovnané s 3rd order deformation modelem

8.4 Tvorba sítě

Síť vytvořená na modelu je tvořena elementy, které rozdělují těleso na jednotlivé základní oblasti. Mezi jejich parametry patří: číslo; připojené uzly; interpolace; integrační body; materiálové vlastnosti. Dále síť tvoří uzly (noute), které jsou charakterizovány číslem, stupni volnosti a souřadnicemi.[7]

Pro zadané pouzdro byl použit typ síťovací metody Solid, která slouží pro tvorbu sítě na 3D tělese. Jako element byl zvolen Tet-10, který je zobrazen na Obr. 18. Daný element je vytvořen ze čtyřstěnu a má celkem 10 uzlových bodů.

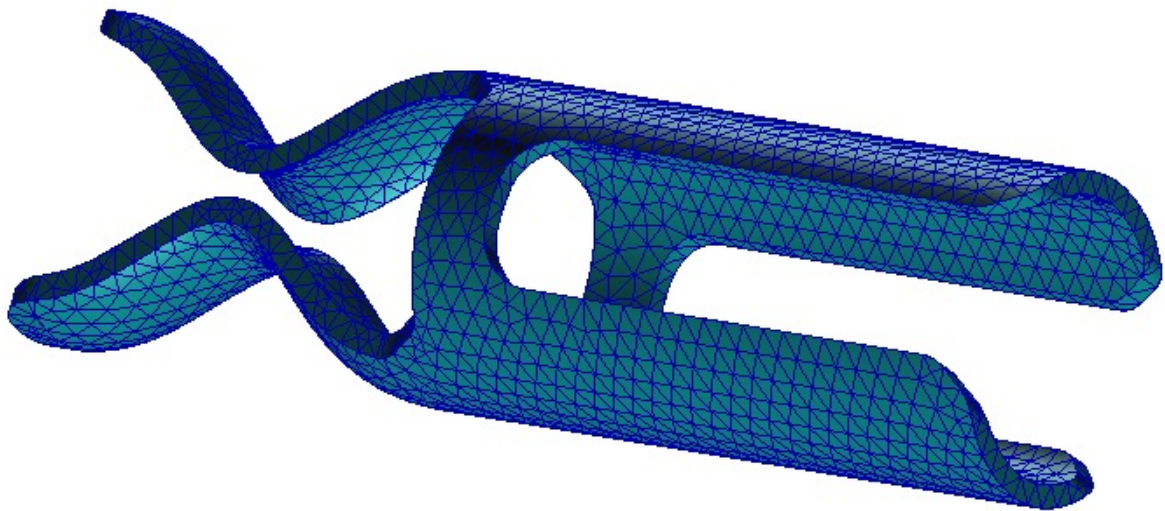


Obr. 19. Tet-10 element

Program MSC Patran po označení tělesa, na kterém měla být vytvořena síť, automaticky vypočítal počet uzlových bodů 3108 a 1368 elementů. Vygenerovaná síť byla však velmi hrubá, proto bylo potřeba vytvořit jemnější síť.

Po zadání menšího koeficientu pro výpočet obsahovala výsledná síť pro první problém 15970 uzlových bodů a 7749 elementů (Obr. 20).

Pro případ zpětného pohybu tyče byla použita z důvodu složitějších deformací ještě jemnější síť, která obsahovala 31974 uzlových bodů a 17870 elementů. A pro nejkritičtější průměr, který byl určen na 25 mm, byl navýšen počet uzlových bodů na 64468 a 31548 elementů.



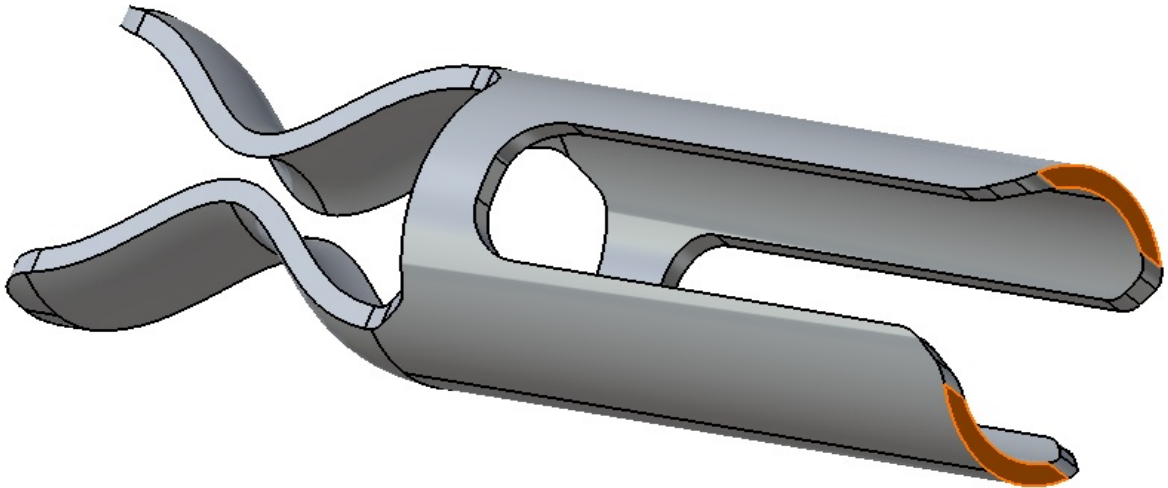
Obr. 20. Vytvořená síť na tělese

8.5 Okrajové podmínky a zatížení

Na Obr. 15 je zobrazeno, jak je pouzdro vloženo v trubce, která má vnitřní průměr stejný jako vnější průměr pouzdra. Vnitřkem tohoto pouzdra je posouvána tyč kruhového průřezu, která je přidržována pomocí svěrek pouzdra, které se při podávání tyče deformují a přicházejí ke kontaktu jak s tyčí, tak i s trubkou. Při výpočtu byly použity tyče o průměru 15, 20, 25, 30 mm. Pouzdro je nehybně uchyceno za zadní plochu (Obr. 20.). Všechny tyto náležitosti musí být správně nadefinovány v programu MSC Patran, aby se zadané podmínky co nejvíce podobaly skutečnosti.

Zadání hodnot do MSC Patran

K uchycení pouzdra slouží funkce Displacement (ukotvení). Zde se nadefinuje nulový pohyb ve směru x, y a z. Dále bylo zamezeno rotaci kolem os souřadnicového systému. Jako poslední je potřeba vybrat plochu nebo bod, na které se bude ukotvení vztahovat. V daném případě byly zvoleny zadní plochy pouzdra, které jsou zvýrazněny oranžovou barvou na Obr. 21.



Obr. 21. Nehybně uchycené plochy pouzdra

Jelikož mezi tělesy docházelo ke vzájemnému kontaktu, je potřeba tuto podmínku zadat do programu. V programu MSC Patran najdeme funkci Contact (kontakt), která slouží k definování kontaktu mezi tělesy. Zde můžeme rozlišit dva základní typy a to Deformable body (deformovatelné těleso) a Rigid body (nedeformovatelné těleso).

Jako Deformable body bylo vybráno pouzdro. Dále se zde zadává koeficient tření.

V modelu se vyskytují dvě Rigid body. Jako první Rigid body byla pro oba případy vybrána trubka, ve které je uloženo pouzdro. Trubce pomocí funkce position (pozice) byl zakázán pohyb ve všech směrech

Pro první případ byla jako druhé Rigid body použita tyč, které bylo pomocí funkce position (pozice) nastaven posun o 30 mm směrem ke svěrkám pouzdra.

Pro druhý případ byla také použita jako druhé Rigid body tyč, ale z důvodu zpětného pohybu bylo potřeba použít jinou funkci pro nastavení pohybu. Byla zvolena funkce Force/Moment (síla/moment). Kde se zadal jako First control node (první kontrolní uzel) node 1. Node 1 měl pomocí funkce Displacement vytvořené dva pohyby, a to pohyb o 30 mm ve směru svěrek a následně pohyb zpátky.

9 VÝPOČET

Jako výstup výpočtu byly zvoleny výsledky:

Elementové výsledky: Equivalent Mises stress (Von Misesovo napětí)

Uzlové výsledky: Reaction force (reakční síla)

 Contact normal force (kontaktní normální síla)

 Friction force (třecí síla)

9.1 Definice výsledků

V následující kapitole budou definovány významy výsledků.

9.1.1 Von Misesovo napětí

Jedná se o skalár, pomocí kterého lze určit selhání isotropního materiálu zatíženého obecným víceosým (prostorovým) napětím. Je srovnáváno s pevnostními parametry materiálu získanými při jednoosém zatížení. Lze ho určit z druhého invariantu deviačního (distorzního) napětí. Jednotkou Von Misesova napětí je MPa. [3]

$$\sigma_V = \sqrt{3 \cdot J_2} \quad (34)$$

$$\sigma_V = \sqrt{\frac{(\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 + (\sigma_1 - \sigma_2)^2}{2}} \quad (35)$$

$$\sigma_V = \sqrt{(\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2) - \sigma_2\sigma_3 - \sigma_3\sigma_1 - \sigma_1\sigma_2} \quad (36)$$

$$\sigma_V = \sqrt{\frac{(\sigma_{11} - \sigma_{33})^2 + (\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + (\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + 6(\sigma_{23}^2 - \sigma_{31}^2 - \sigma_{12}^2)}{2}} \quad (37)$$

9.1.2 Kontaktní normálová síla

Kontaktní normálová síla (přítlačná síla) vzniká při kontaktu dvou těles a její vektor je kolmý na kontaktní plochu. Může být vyvolána vlastní tíhou těles nebo další vnější silou, která působí na jedno nebo na obě tělesa, jež jsou v kontaktu.

Pro porovnání jednotlivých případů byl použit součet hodnot kontaktní normálové síly v jednotlivých uzlech modelu, které byly v kontaktu se zasouvanou tyčí, a proto ji můžeme považovat za přítlačnou sílu vyvolanou svěrkou pouzdra.

$$F_N = \sum_{i=1}^n F_{Ni} \quad (38)$$

F_{Ni} - Kontaktní normálová síla, kterou působí i-tý uzel na podávanou tyč.

n- Počet uzlů, které působí kontaktní normálovou silou na podávanou tyč.

Na Obr. 22 je modře zvýrazněna plocha, na které byly vybrány elementy pro výpočet kontaktní normálové síly.

9.1.3 Reakční síla

Je to síla vznikající při zasouvání tyče do pouzdra. Reakční síla se nachází na ukotvené ploše, které je zamezen pohyb.

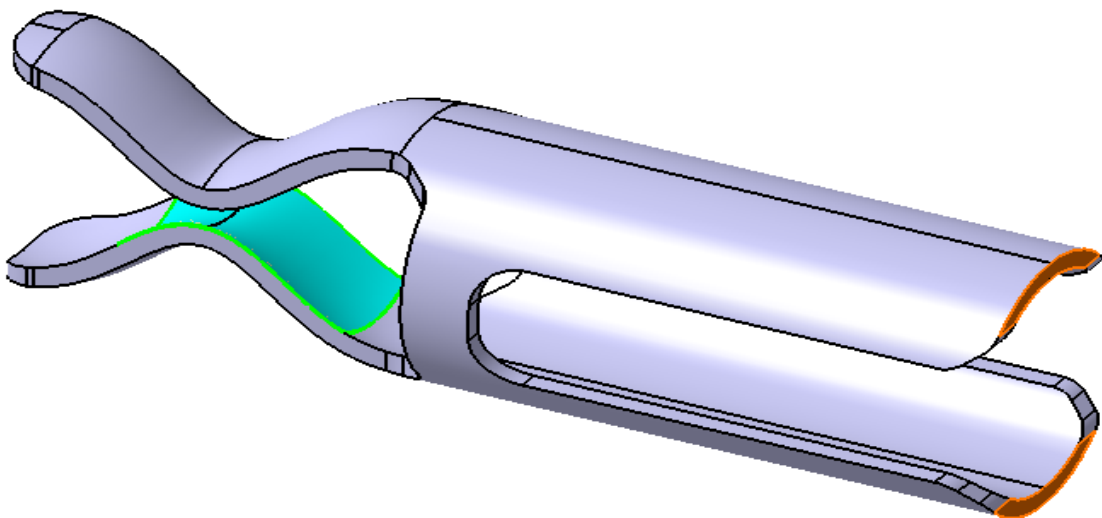
Pro porovnání jednotlivých případů byl použit součet hodnot reakční síly v jednotlivých uzlech modelu nacházejících se na ploše ukotvující pouzdro.

$$F_R = \sum_{i=1}^n F_{Ri} \quad (39)$$

F_{Ri} - Reakční síla působící v i-tém uzlovém bodu.

n- Počet uzlů, ve kterých je vyvolána reakční síla.

Na Obr. 22 je oranžově zvýrazněna plocha, na které byly vybrány elementy pro výpočet reakční síly.



Obr. 22. Zobrazení ploch pro výpočet reakční a kontaktní normálové síly

9.1.4 Třecí síla

Třecí síla vzniká mezi dvěma nebo více tělesy při jejich vzájemném posuvném pohybu. Třecí síla je přímo úměrná koeficientu tření, který byl při výpočtech postupně měněn.

Pro porovnání jednotlivých případů byl použit součet hodnot třecí síly v jednotlivých uzlech modelu.

$$F_f = \sum_{i=1}^n F_{fi} \quad (40)$$

F_{fi} - Třecí síla v i -tém uzlu.

n - Počet uzlů, ve kterých je vyvolána třecí síla.

10 VYHODNOCENÍ VYPOČÍTANÝCH VÝSLEDKŮ

V následující kapitole bude postupně porovnáván vliv tření, který bude reprezentovaný změnou koeficientu tření, na napětí a síly vyvolané posuvem tyče, o daných průměrech, v pouzdře.

Pro zobrazení výsledků byly použity grafy, obrázky a tabulky, jež byly získány pomocí programu MSC Patran.

V grafech jsou vždy pro zkoumanou veličinu zobrazeny hodnoty pro všechny koeficienty tření. V legendě grafu jsou zobrazeny barvy křivek pro jednotlivé koeficienty tření. Pro lepší čitelnost grafů jsou ukončeny po první nebo druhé hodnotě, která zůstává konstantní. Hodnoty dané veličiny jsou v grafech spojeny pomocí křivky.

Data, která sloužila pro sestavení grafů, jsou vložena jako přílohy.

Pro zobrazení rozložení zkoumané veličiny na pouzdře je přidán vždy jeden obrázek, který byl vytvořen pomocí programu MSC Mentat. Na obrázku je vidět na levé straně legenda s maximálními hodnotami dané veličiny, které je rozdělena na deset částí, kde její rozsah je dán maximální a minimální hodnotou. Čísla jsou vždy zapsána v základních jednotkách dané veličiny.

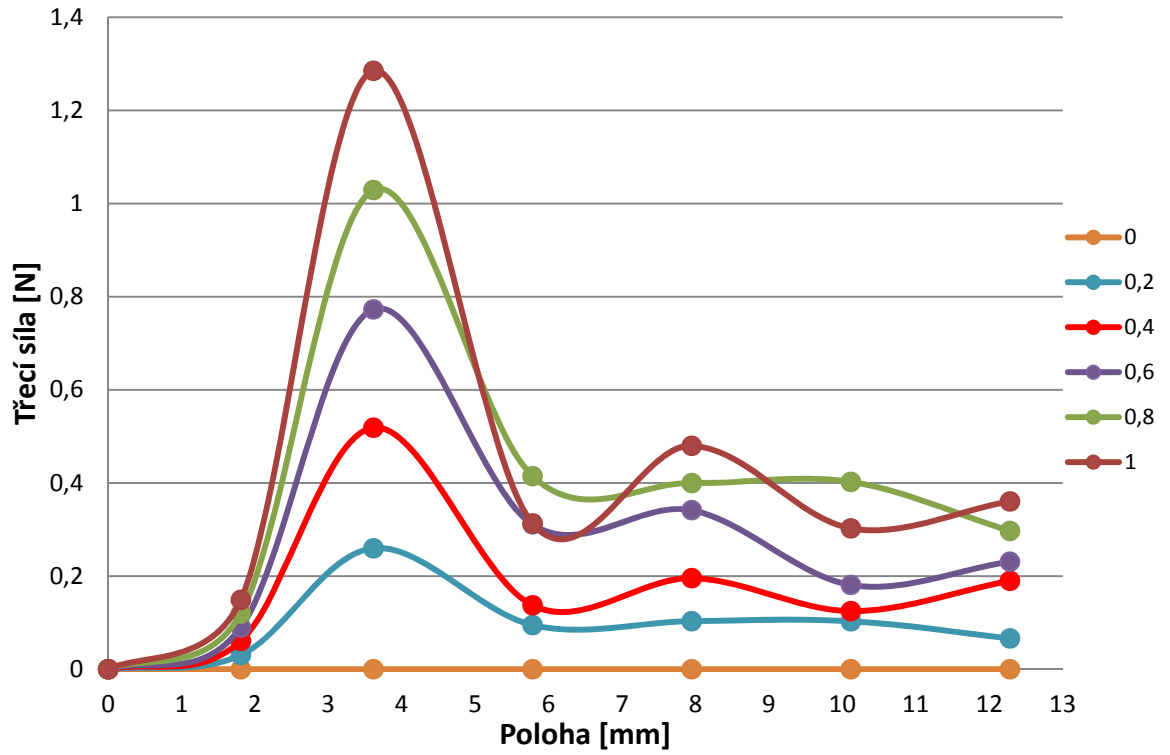
10.1 Vliv tření při zasouvání tyče o průměru 15 mm

10.1.1 Třecí síla

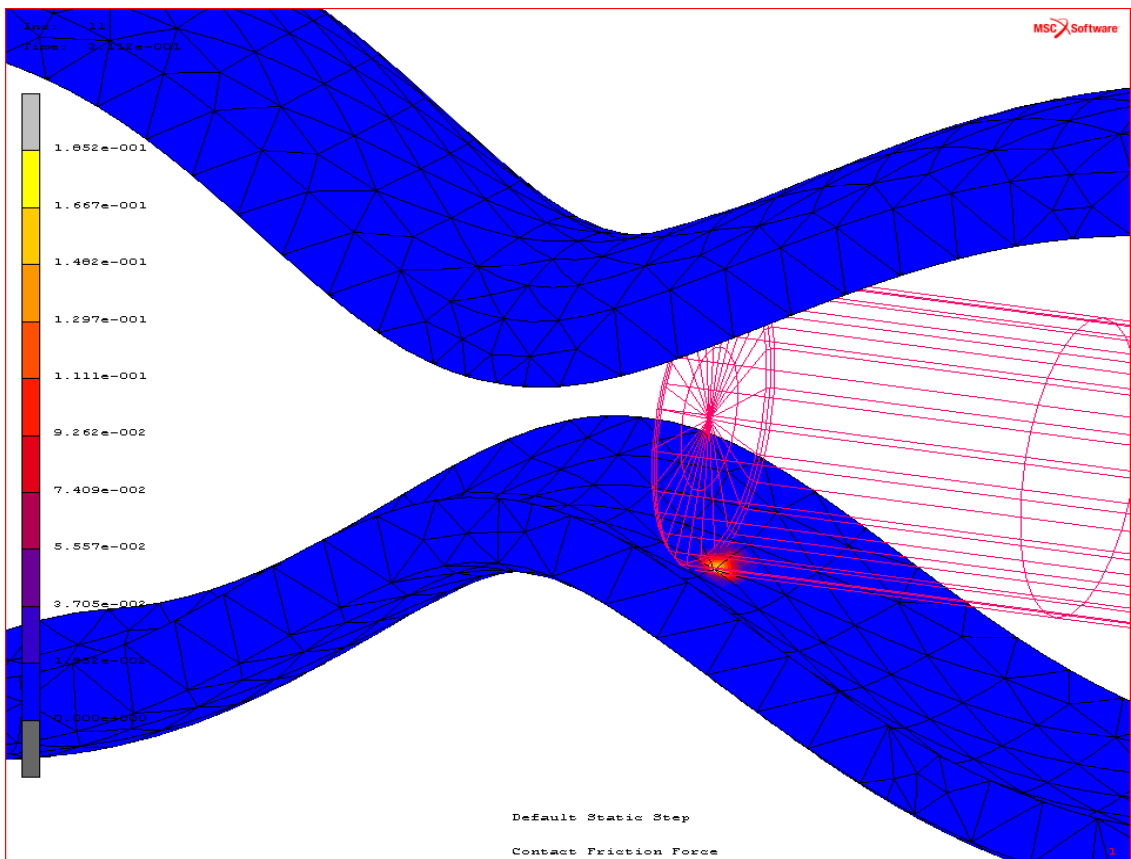
Na následujícím grafu (Obr. 23) lze vidět, jak třecí síla prudce narůstá a následně dochází k jejímu poklesu a dále k mírnému navýšení. Maximální hodnota třecí síly je vygenerována téměř okamžitě. Dále lze odečíst nárůst velikosti třecí síly se zvětšujícím se třecím koeficientem.

Na Obr. 24 je vidět rozložení třecí síly na pouzdře při zasouvání tyče o průměru 15 mm a třecím koeficientu 0,6. Síla působí na velmi malé ploše, která je dána průměrem tyče a tvarem pouzdra.

Hodnoty třecí síly získané pomocí programu MSC Mentat, jsou přidány jako Příloha P I.



Obr. 23. Graf- Třecí síla ($\varnothing 15\text{mm}$)



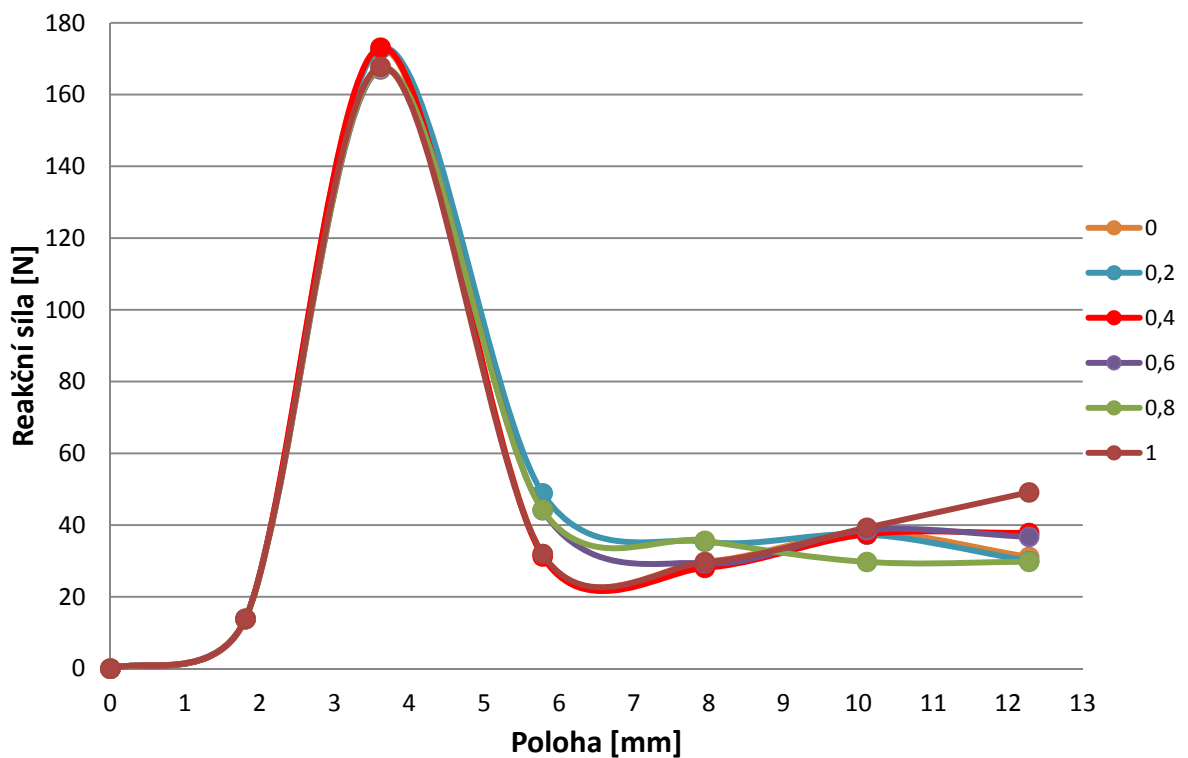
Obr. 24. Rozložení třecí síly ($f=0,6$; $\varnothing 15\text{mm}$)

10.1.2 Reakční síla

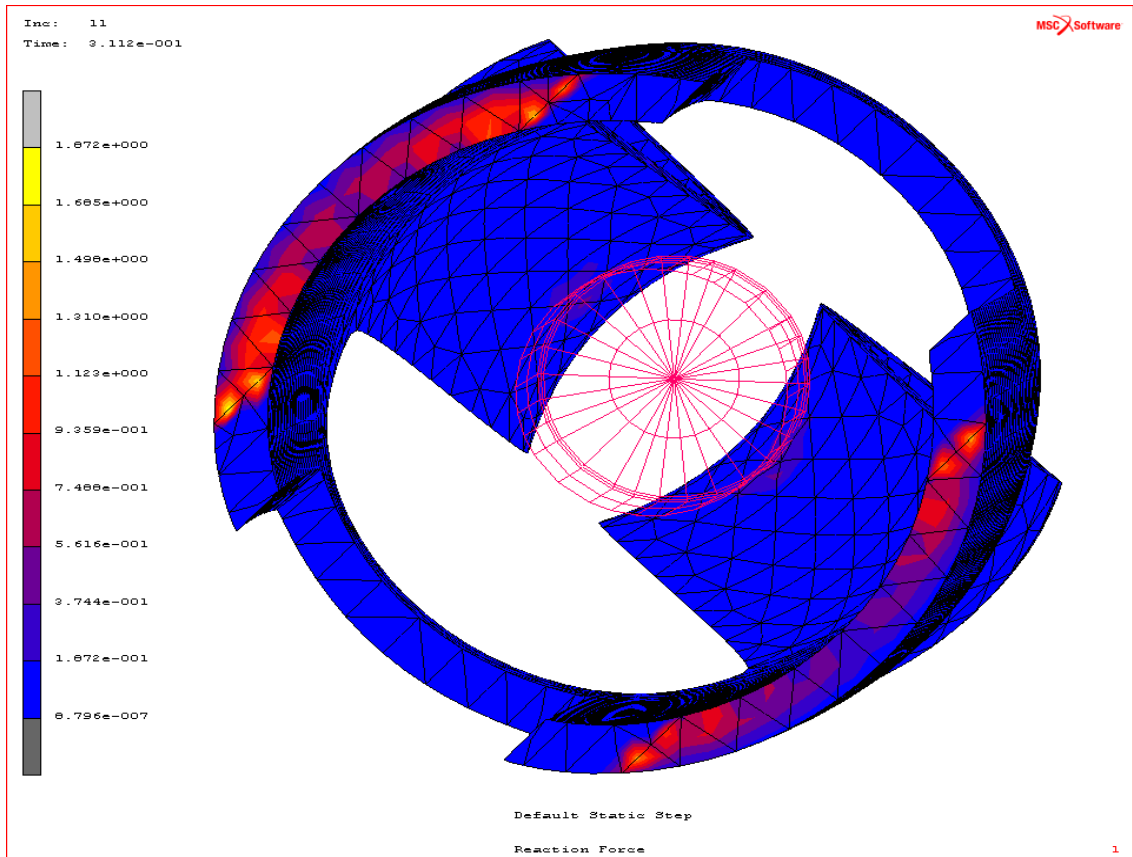
Na následujícím grafu (Obr. 25) lze vidět, jak reakční síla prudce narůstá a následně dochází k jejímu poklesu. Maximální hodnota se u různých koeficientů příliš neliší, mírný rozdíl lze pozorovat až při úplném zasunutí tyče, kde je rozdíl 20 N.

Na Obr. 26 je vidět rozložení reakční síly na pouzdře při zasouvání tyče o průměru 15 mm a třecím koeficientu 0,6.

Hodnoty reakční síly získané pomocí programu MSC Mentat jsou přidány jako Příloha P II.



Obr. 25. Graf- Reakční síla ($\varnothing 15$ mm)



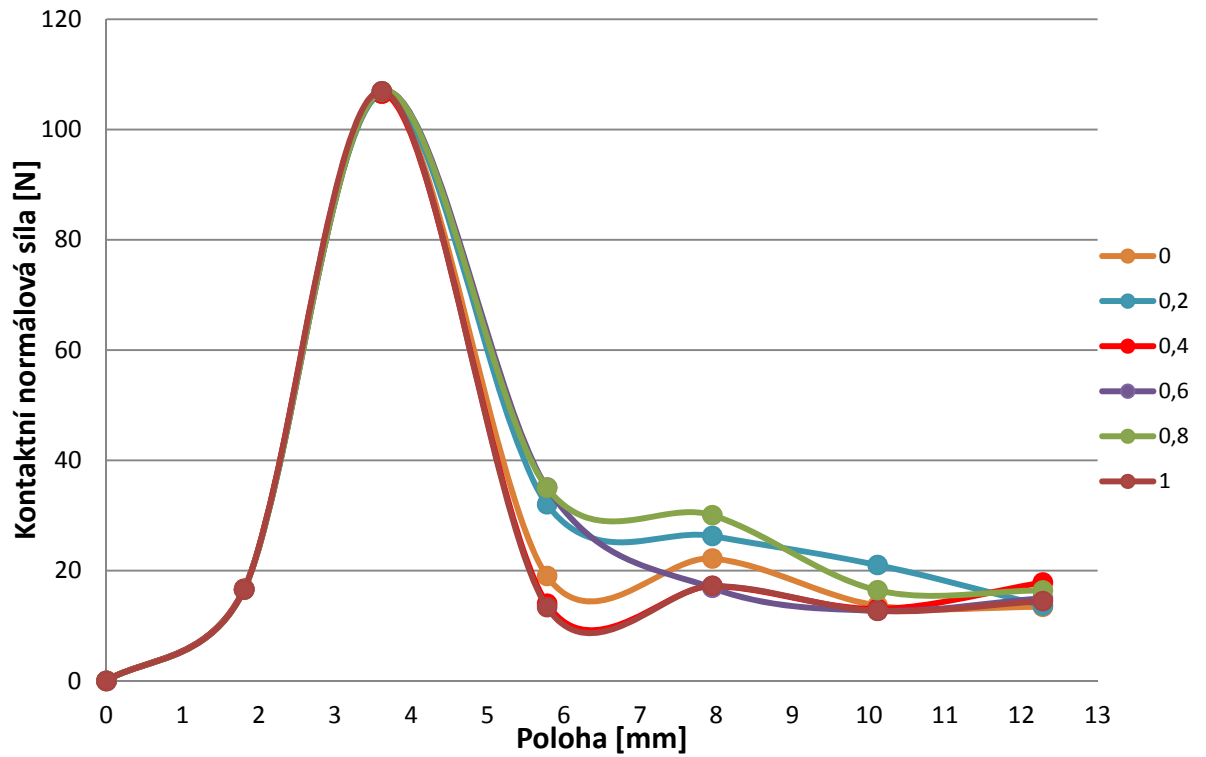
Obr. 26. Rozložení reakční síly ($f=0,6$; $\varnothing 15$ mm)

10.1.3 Kontaktní normálová síla

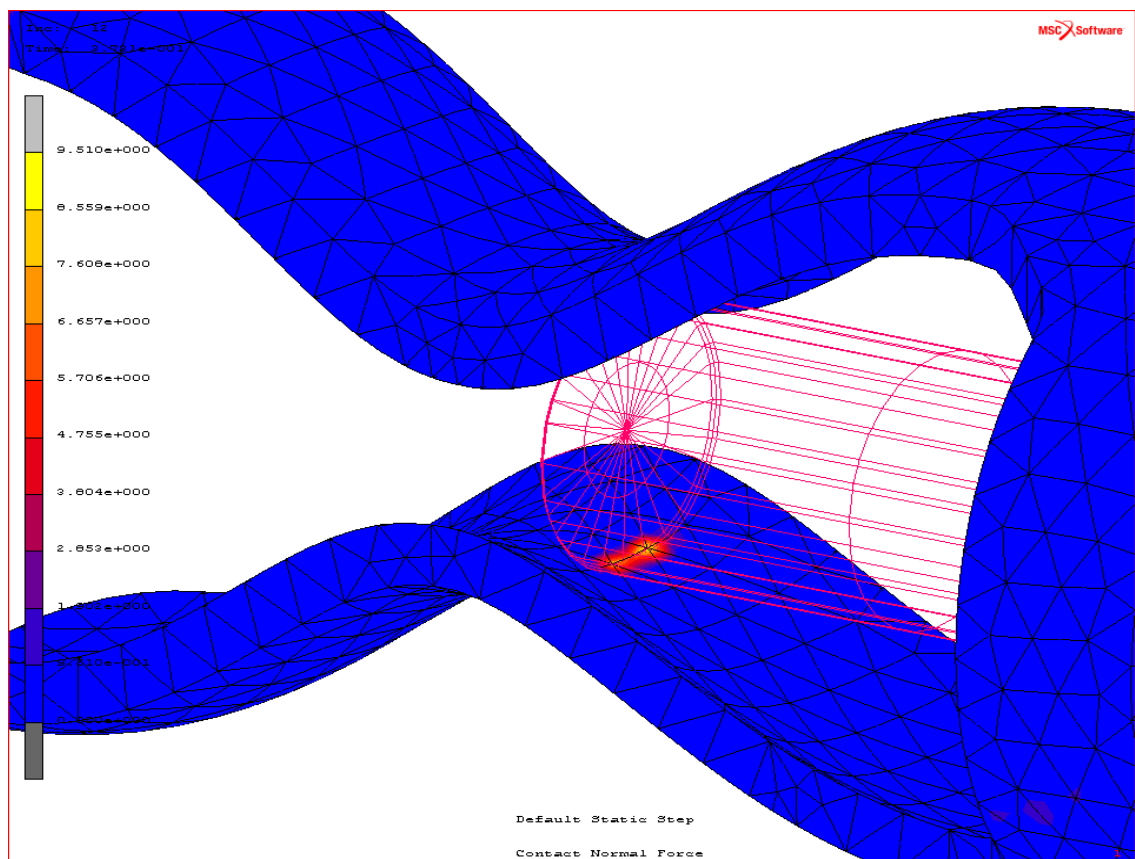
Na následujícím grafu (Obr. 27) lze vidět, jak kontaktní normálová síla prudce narůstá na svou maximální hodnotu a následně dochází k jejímu poklesu. Pokles síly je u různých koeficientů tření rozdílný, avšak pokles hodnot u koeficientu tření $f=0,2$ a $f=0,8$ je mírnější, což může být dáno mírně rozdílnou deformací pouzdra.

Na Obr. 28 je vidět rozložení kontaktní normálové síly na pouzdře při zasouvání tyče o průměru 15 mm a třecím koeficientu 0,6.

Hodnoty kontaktní normálové síly získané pomocí programu MSC Mentat jsou přidány jako Příloha P III.



Obr. 27. Graf- Kontaktní normálová síla ($\varnothing 15$ mm)



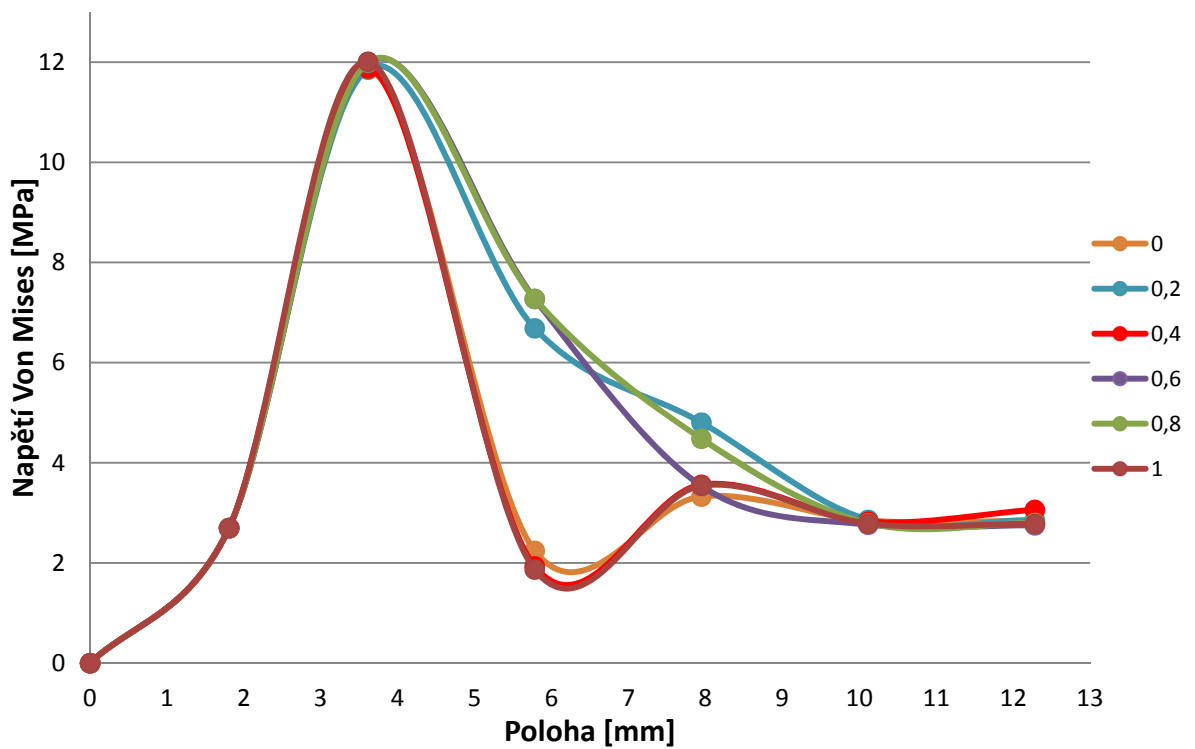
Obr. 28. Rozložení kontaktní normálové síly ($f=0,6$; $\varnothing 15$ mm)

10.1.4 Von Misesovo napětí

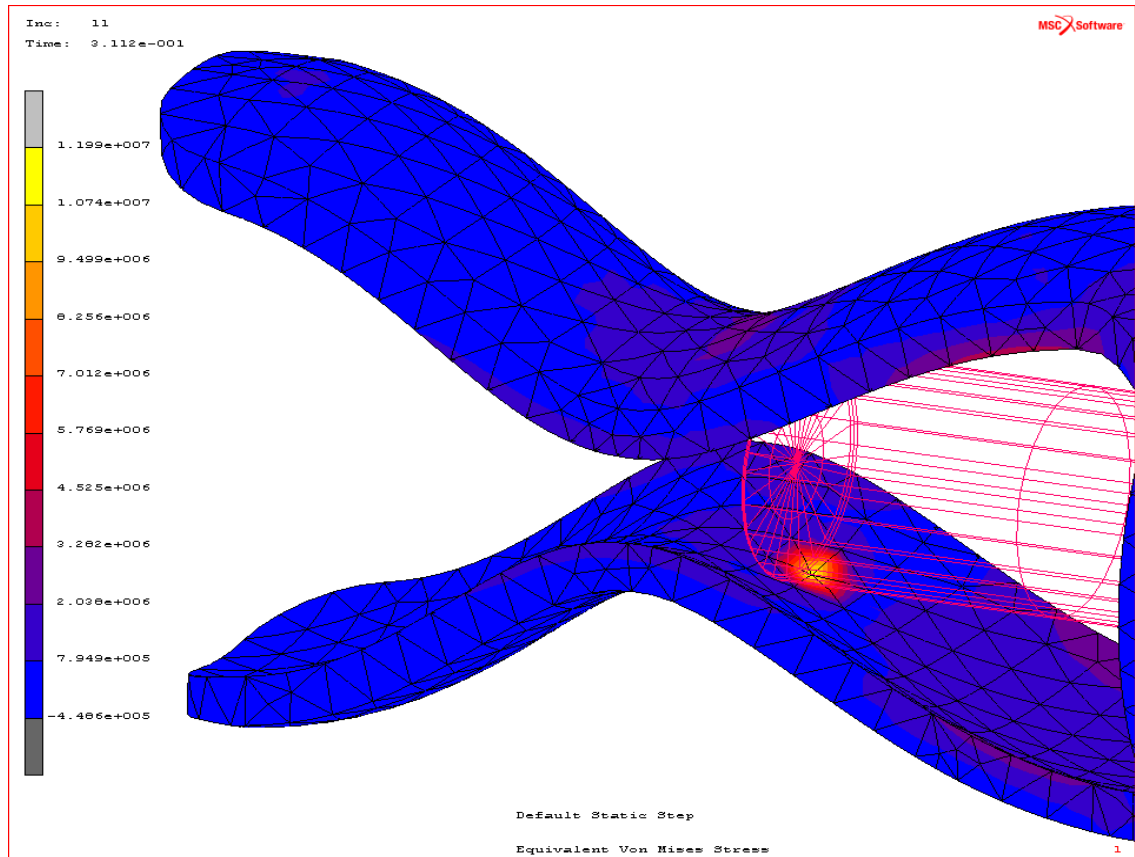
Na následujícím grafu (Obr. 29) lze vidět, jak Von Misesovo napětí prudce narůstá na svou maximální hodnotu a následně dochází k jeho poklesu. Pokles napětí je u různých koeficientů tření rozdílný, avšak pokles hodnot napětí je u koeficientů tření $f=0,2$ a $f=0,6$ a $f=0,8$ mírnější, což může být dáno rozdílnou deformací pouzdra při zasouvání tyče.

Na Obr. 30 je vidět rozložení Von Misesova napětí na pouzdře při zasouvání tyče o průměru 15 mm a třecím koeficientu 0,6.

Hodnoty Von Misesova napětí získané pomocí programu MSC Mentat jsou přidány jako Příloha P IV.



Obr. 29. Graf- Napětí Von Mises ($\varnothing 15$ mm)



Obr. 30. Rozložení Von Misesova napětí ($f=0,6$; $\varnothing 15$ mm)

10.2 Vliv tření při zasouvání tyče o průměru 20 mm

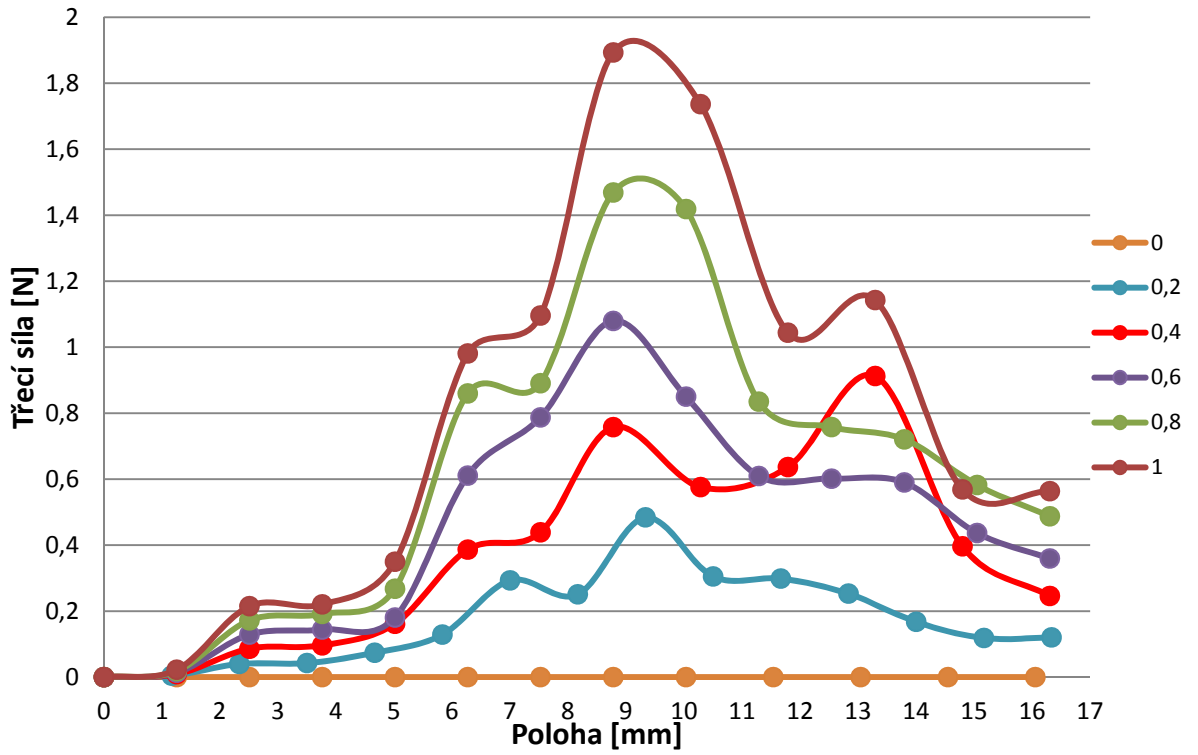
Na rozdíl od hodnot získaných při zasouvání tyče o průměru 15 mm, které se od sebe jen mírně lišily, hodnoty získané zasouváním tyče o průměru 20 mm o různém koeficientu tření byly mnohdy velmi rozdílné. Hodnoty zkoumané veličiny se ustálily zhruba po 16 mm posunu tyče.

10.2.1 Třecí síla

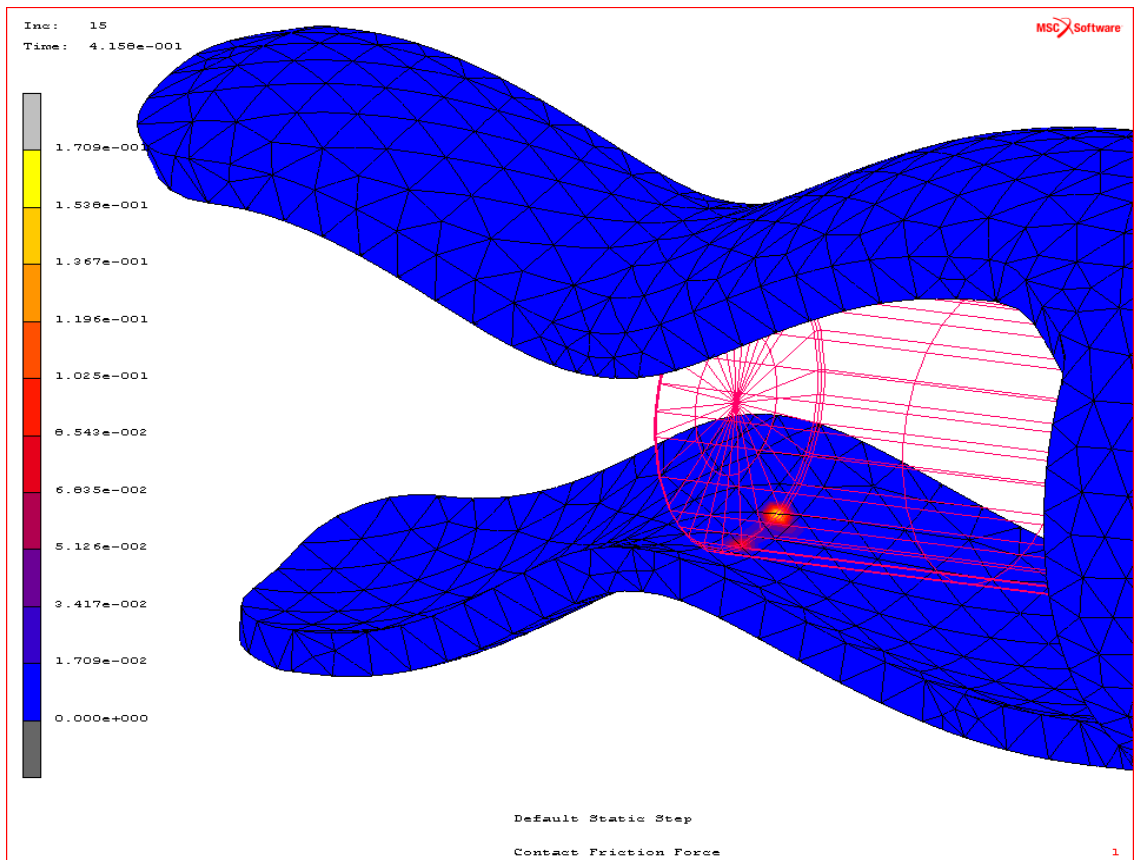
Na následujícím grafu (Obr. 31) lze vidět pozvolný nárůst třecí síly na svou maximální hodnotu a následný pokles. Maximální hodnoty třecí síly jsou seřazeny od největšího koeficientu tření po nejmenší.

Na Obr. 32 je vidět rozložení třecí síly na pouzdře při zasouvání tyče o průměru 20 mm a třecím koeficientu 0,6.

Hodnoty třecí síly získané pomocí programu MSC Mentat jsou přidány jako Příloha P V.



Obr. 31. Graf- Třecí síla ($\varnothing 20$ mm)



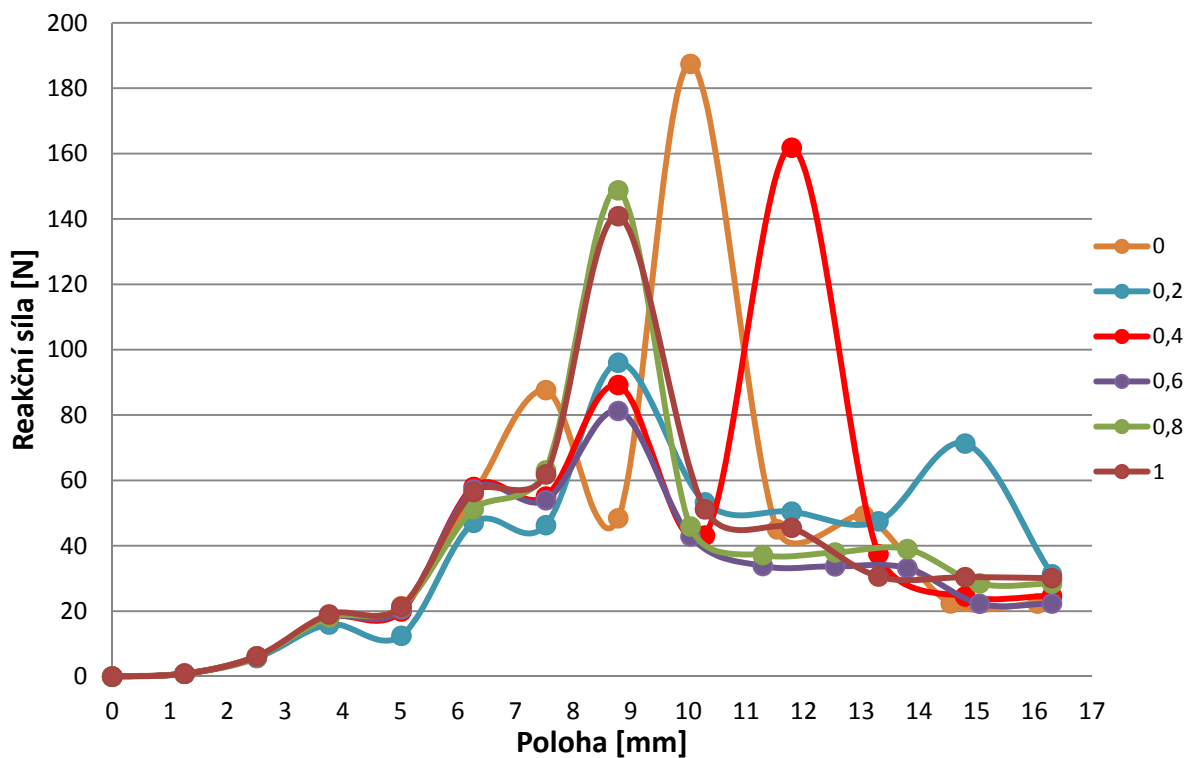
Obr. 32. Rozložení třecí síly ($f=0,6$; $\varnothing 20$ mm)

10.2.2 Reakční síla

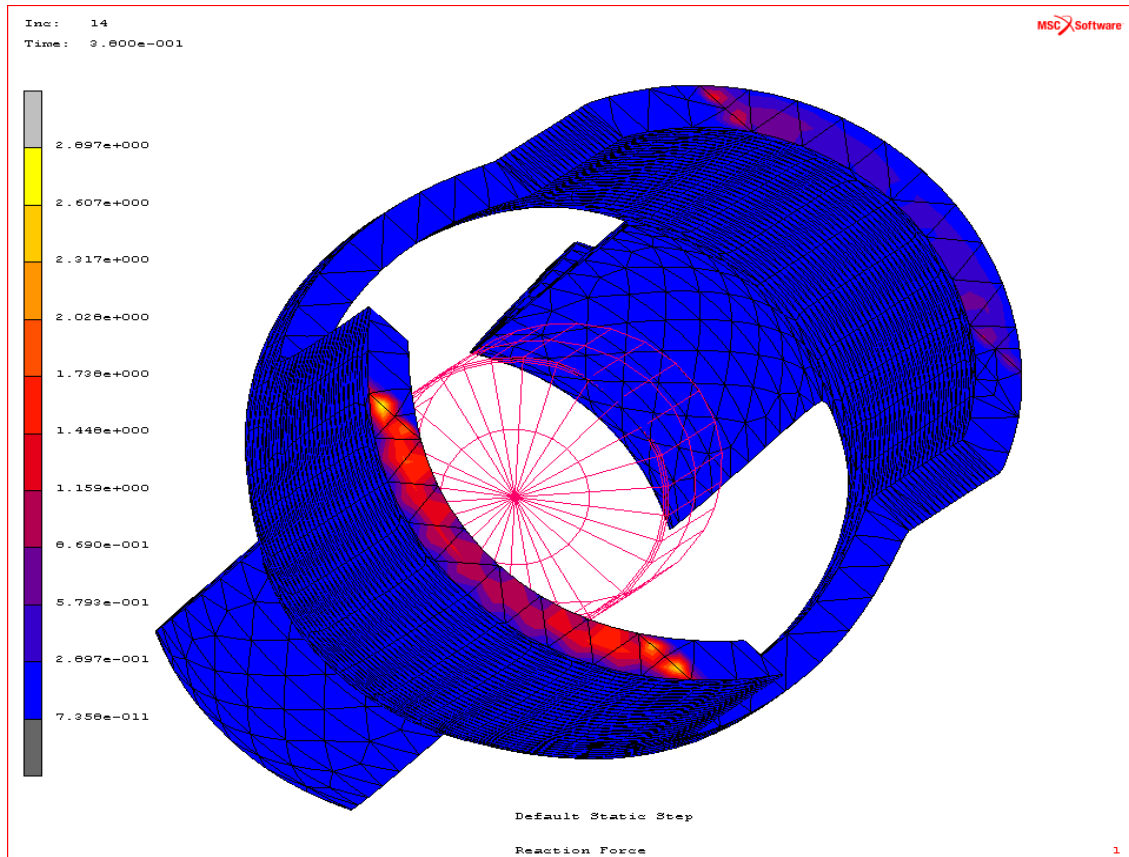
Na následujícím grafu (Obr. 33) lze vidět postupný nárůst reakční síly na svou maximální hodnotu a její následný pokles. Dále lze vyčíst prudký nárůst na maximální hodnotu, který je způsoben protahováním pouzdra ve směru zasouvání tyče.

Na Obr. 34 je vidět rozložení reakční síly na pouzdrě při zasouvání tyče o průměru 20 mm a třecím koeficientu 0,6.

Hodnoty reakční síly získané pomocí programu MSC Mentat jsou přidány jako Příloha P VI.



Obr. 33. Graf- Reakční síla ($\varnothing 20$ mm)



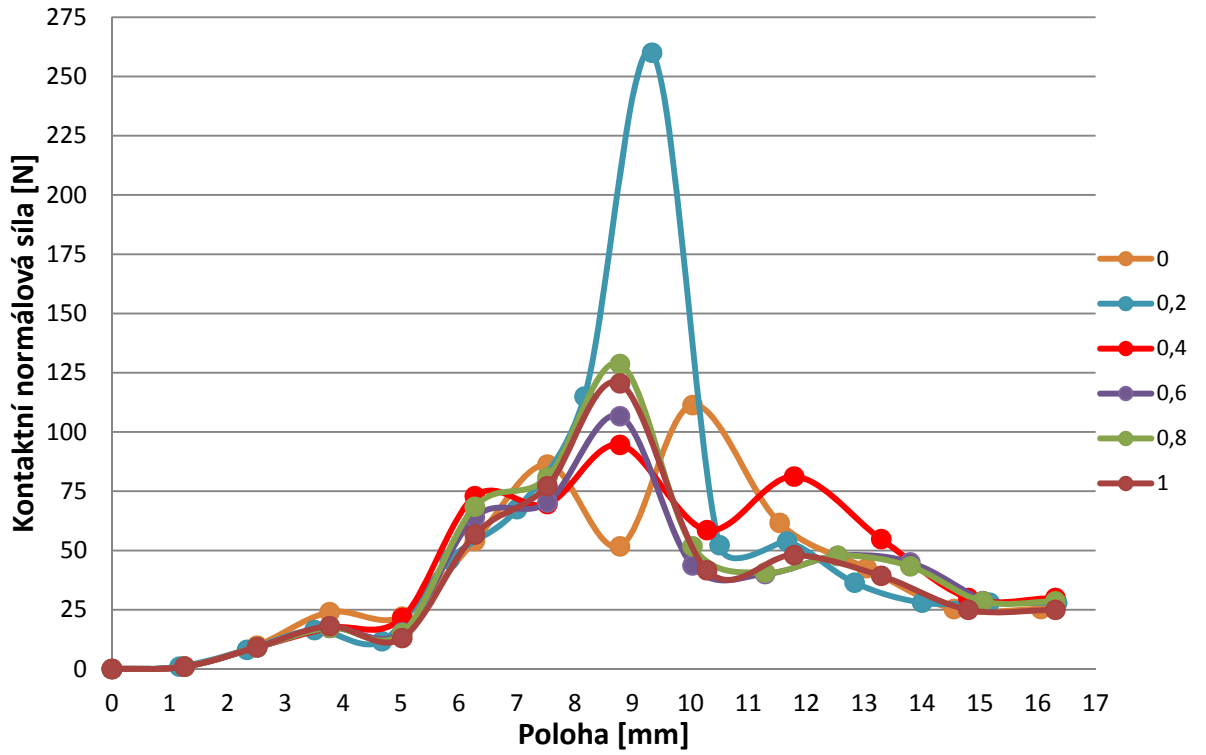
Obr. 34. Rozložení reakční síly ($f=0,6$; $\varnothing 20$ mm)

10.2.3 Kontaktní normálová síla

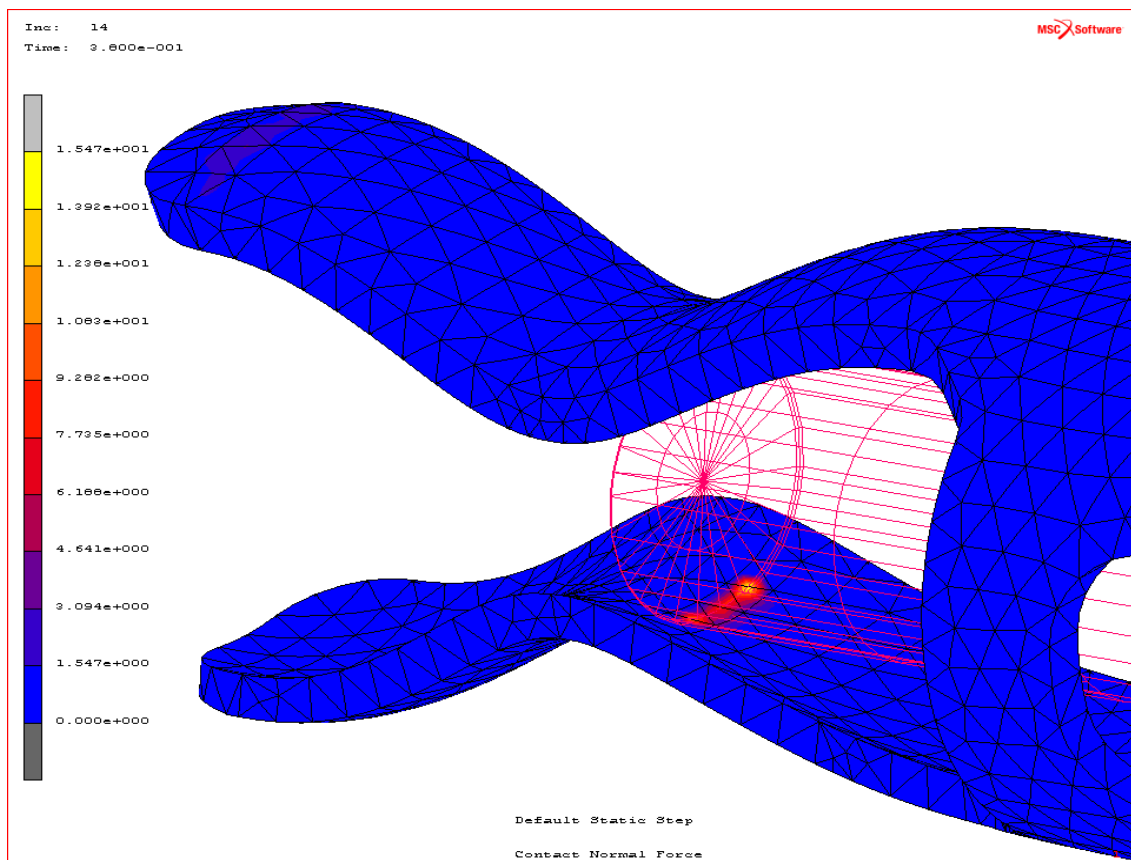
Na následujícím grafu (Obr. 35) lze vidět, jak kontaktní normálová síla různě narůstá na svou maximální hodnotu pro různé koeficienty tření a následně dochází k jejímu poklesu. Maximální hodnoty síly se pro všechny koeficienty kromě $f=0,2$ liší jen mírně. Avšak u koeficientu tření $f=0,2$ je maximální hodnota velmi odlišná, což bylo způsobeno protažením pouzdra ve směru zasouvání tyče. Deformaci pouzdra je vidět na Obr. 37, kde jsou zvýrazněny místa rozdílné deformace pouzdra.

Na Obr. 36 je vidět rozložení kontaktní normálové síly na pouzdře při zasouvání tyče o průměru 20 mm a třecím koeficientu 0,6.

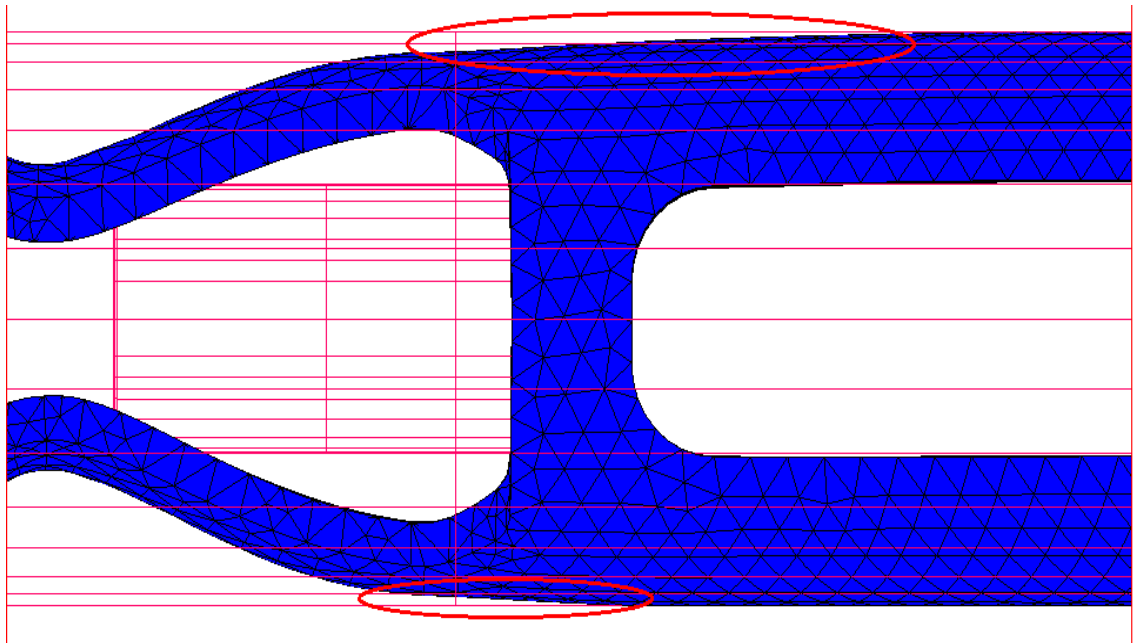
Hodnoty kontaktní normálové síly získané pomocí programu MSC Mentat jsou přidány jako Příloha P VII.



Obr. 35. Graf- Kontaktní normálová síla ($\varnothing 20$ mm)



Obr. 36. Rozložení kontaktní normálové síly ($f=0,6$; $\varnothing 20$ mm)



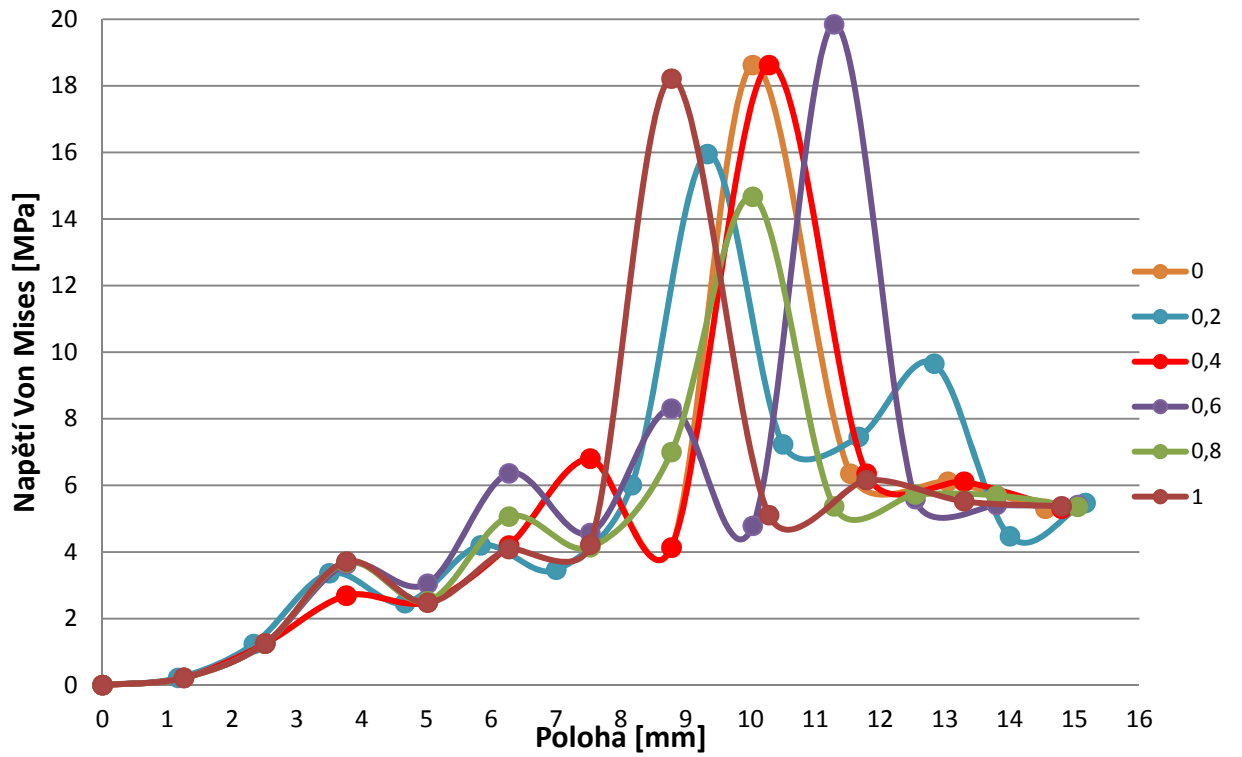
Obr. 37. Deformované pouzdro ($f=0,2$; $\varnothing 20$ mm)

10.2.4 Von Misesovo napětí

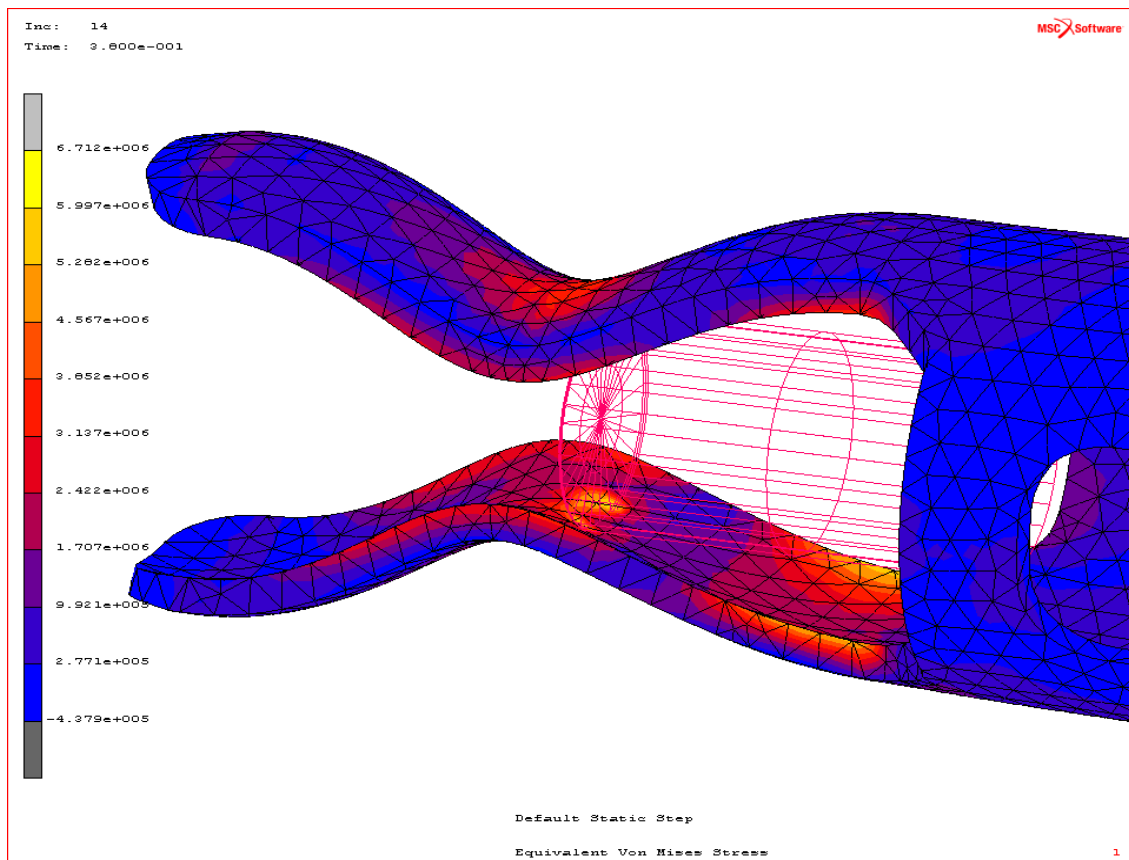
Na následujícím grafu (Obr. 38) lze vidět postupný nárůst Von Misesova napětí. Následně dochází ke skokovému nárůstu na maximální hodnotu a k poklesu na hodnoty, které odpovídají hodnotám před maximální hodnotou. Tento nárůst je dán protahováním pouzdra ve směru posunu tyče.

Na Obr. 39 je vidět rozložení Von Misesova napětí na pouzdře při zasouvání tyče o průměru 20 mm a třecím koeficientu 0,6.

Hodnoty Von Misesova napětí získané pomocí programu MSC Mentat jsou přidány jako Příloha P VIII.



Obr. 38. Graf- Napětí Von Mises ($\varnothing 20\text{ mm}$)



Obr. 39. Rozložení Von Misesova napětí ($f=0,6$; $\varnothing 20\text{ mm}$)

10.3 Vliv tření při zasouvání tyče o průměru 25 mm

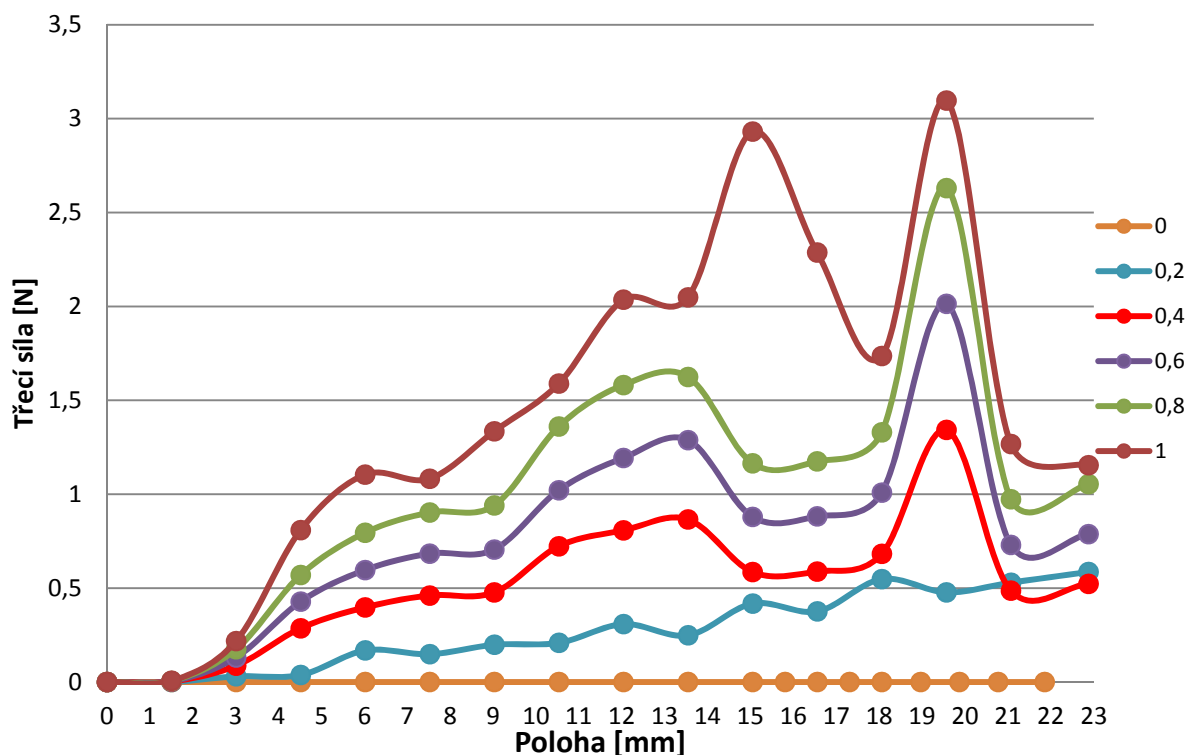
Při zasouvání tyče o průměru 25 mm se mnohdy stalo, že hodnoty zkoumané veličiny byly pro rozdílné koeficienty tření téměř totožné. Hodnoty zkoumané veličiny se ustálily zhruba po 23 mm posunu tyče.

10.3.1 Třecí síla

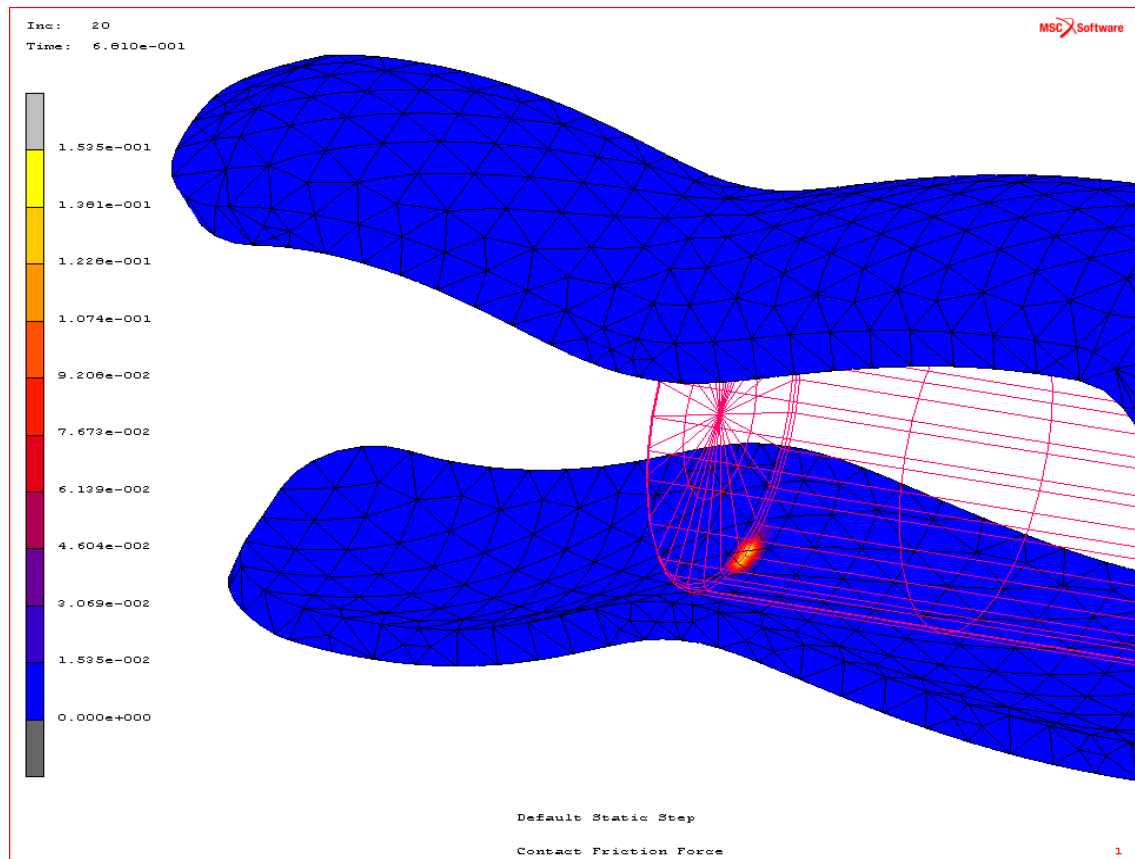
Na následujícím grafu (Obr. 40) lze vidět, jak třecí síla pozvolně narůstá, následně mírně klesá a dále roste na svou maximální hodnotu a následně dochází k poklesu. Maximální hodnoty třecí síly jsou seřazeny od největšího koeficientu tření po nejmenší.

Na Obr. 41 je vidět rozložení třecí síly na pouzdrě při zasouvání tyče o průměru 25 mm a třecím koeficientu 0,6.

Hodnoty třecí síly získané pomocí programu MSC Mentat jsou přidány jako Příloha P IX.



Obr. 40. Graf- Třecí síla ($\varnothing 25$ mm)



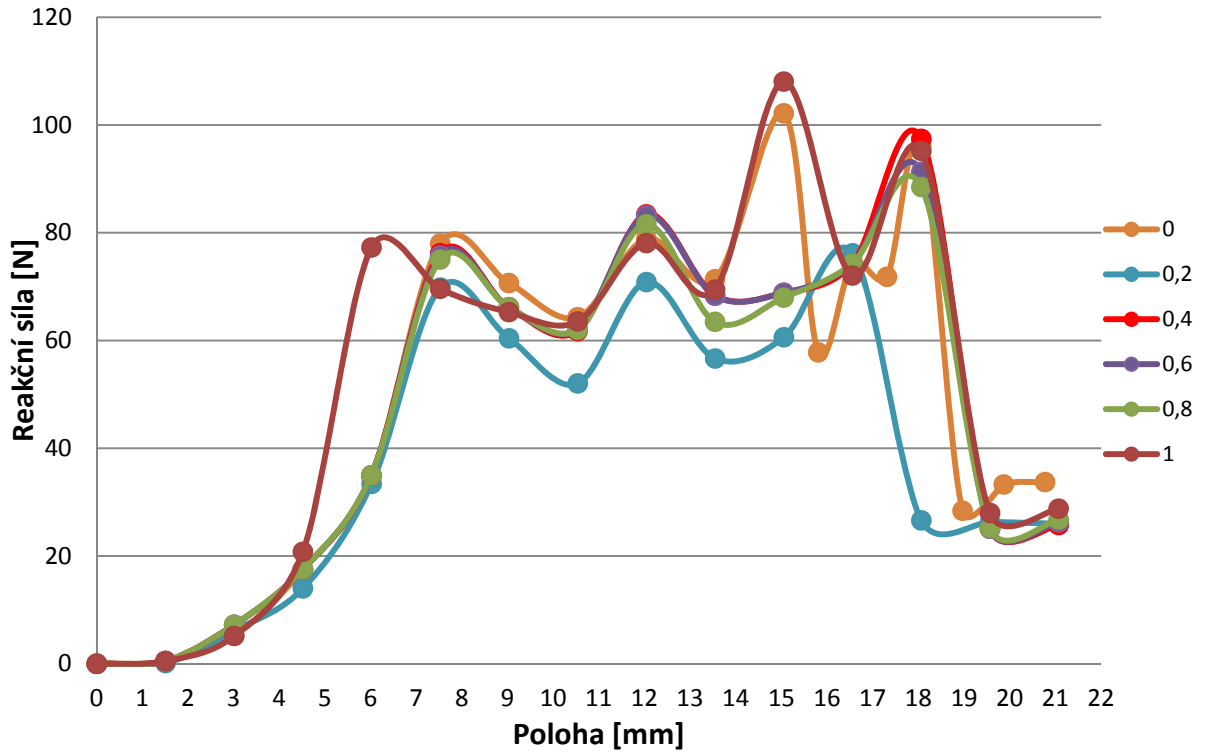
Obr. 41. Rozložení třecí síly ($f=0,6$; $\varnothing 25$ mm)

10.3.2 Reakční síla

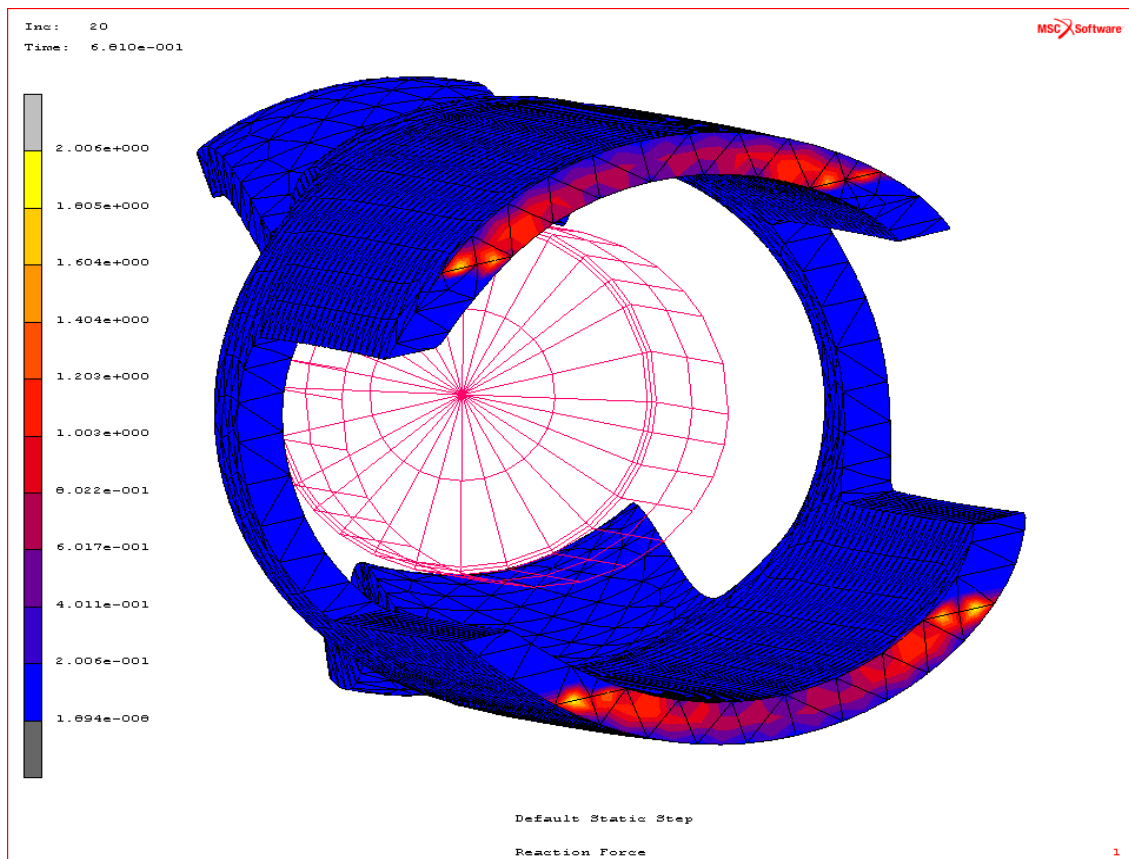
Na následujícím grafu (Obr. 42) lze vidět prudký nárůst reakční síly a následné kolísání hodnot kolem maximální hodnoty a následný prudký pokles.

Na Obr. 43 je vidět rozložení reakční síly na pouzdře při zasouvání tyče o průměru 25 mm a třecím koeficientu 0,6.

Hodnoty reakční síly získané pomocí programu MSC Mentat jsou přidány jako Příloha P X.



Obr. 42. Graf- Reakční síla ($\varnothing 25$ mm)



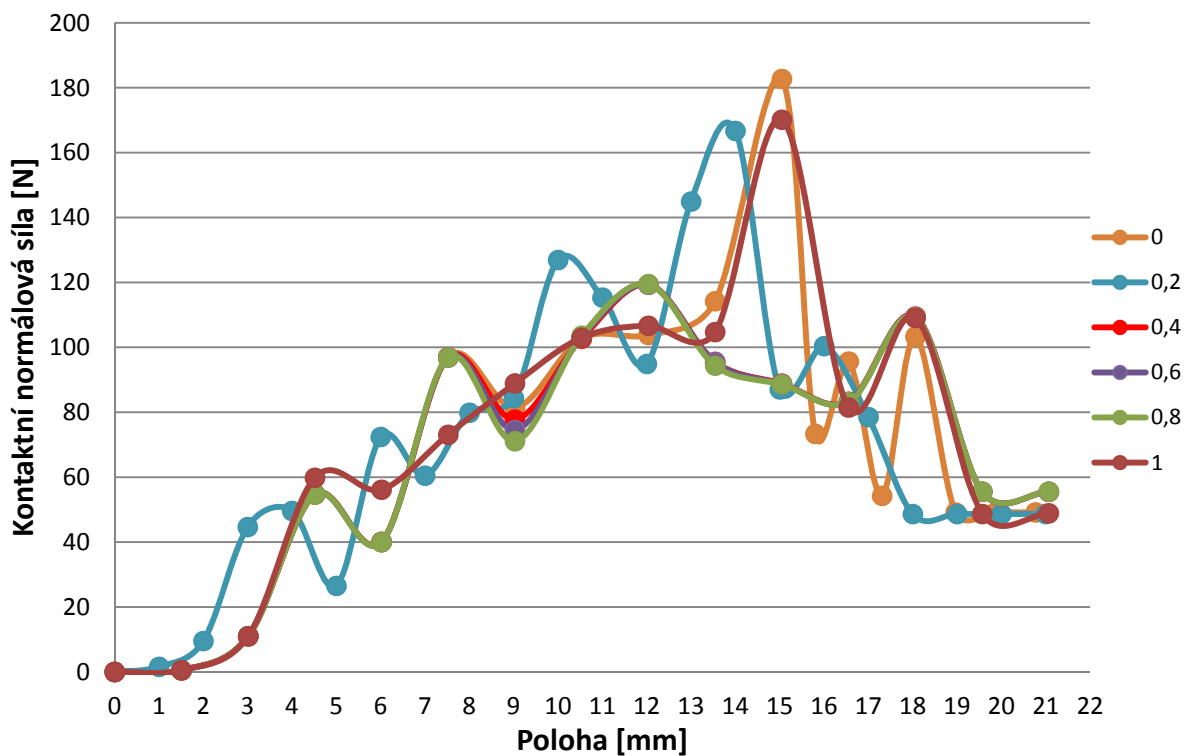
Obr. 43. Rozložení reakční síly ($f=0,6$; $\varnothing 25$ mm)

10.3.3 Kontaktní normálová síla

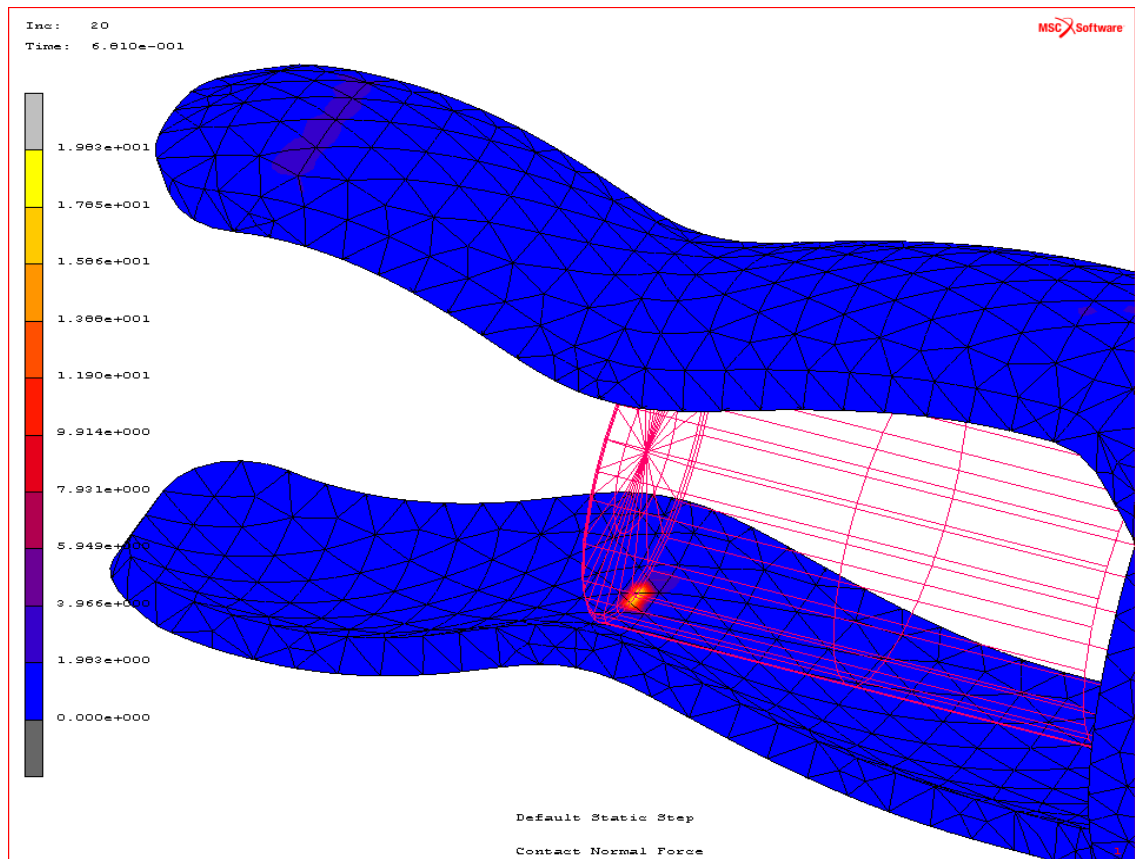
Na následujícím grafu (Obr. 44) lze vidět postupné narůstání kontaktní normálové síly na maximální hodnotu a následný pokles. Hodnoty jsou pro téměř všechny koeficienty tření po celé délce téměř totožné. K mírnému rozdílu dochází pouze u koeficientu $f=0,2$.

Na Obr. 45 je vidět rozložení kontaktní normálové síly na pouzdrě při zasouvání tyče o průměru 25 mm a třecím koeficientu 0,6.

Hodnoty kontaktní normálové síly získané pomocí programu MSC Mentat jsou přidány jako Příloha P XI.



Obr. 44. Graf- Kontaktní normálová síla ($\varnothing 25$ mm)



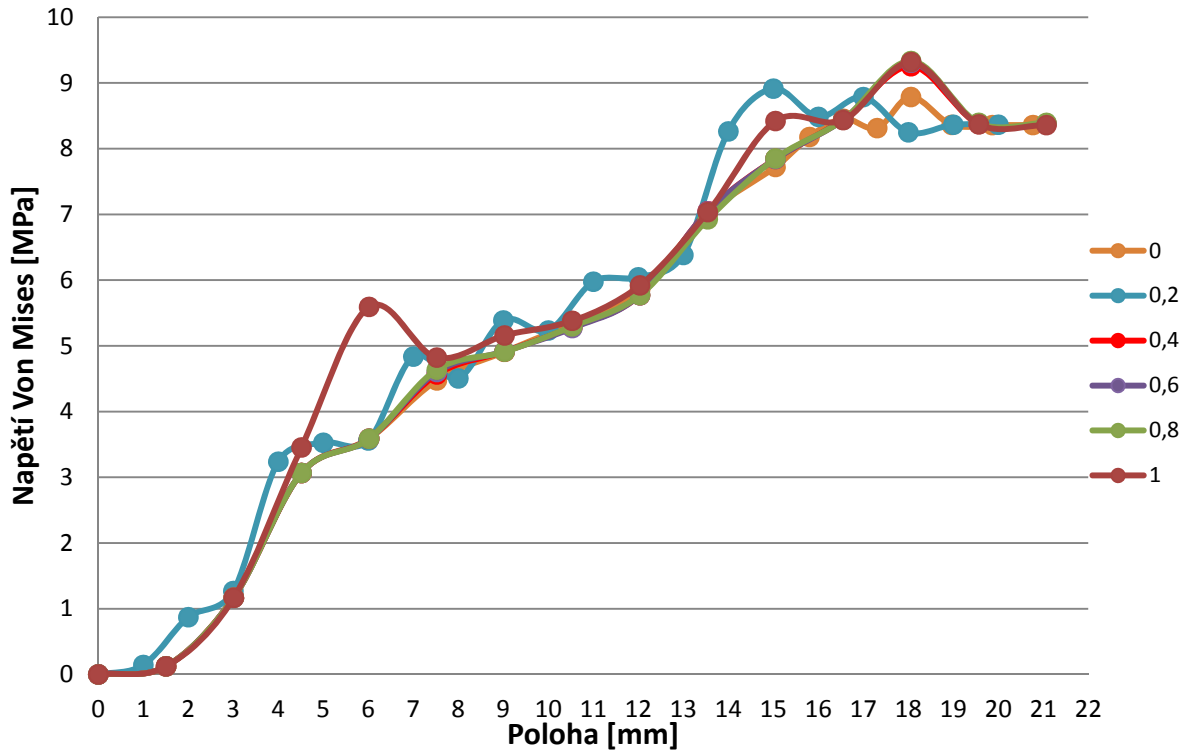
Obr. 45. Rozložení kontaktní normálové síly ($f=0,6$; $\varnothing 25$ mm)

10.3.4 Von Misesovo napětí

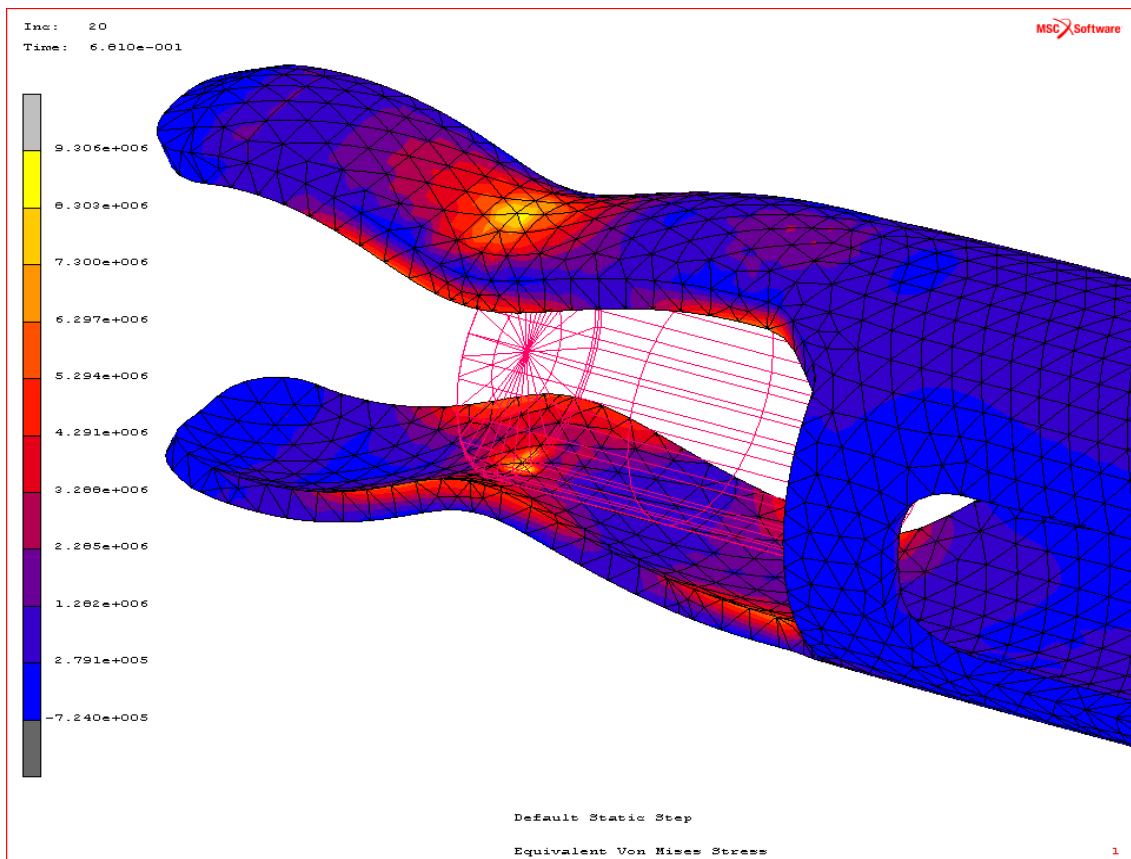
Na následujícím grafu (Obr. 46) lze vidět postupný nárůst Von Misesova napětí na maximální hodnotu. Hodnoty jsou pro téměř všechny koeficienty tření po celé délce téměř totožné.

Na Obr. 47 je vidět rozložení Von Misesova napětí na pouzdře při zasouvání tyče o průměru 25 mm a třecím koeficientu 0,6.

Hodnoty Von Misesova napětí získané pomocí programu MSC Mentat jsou přidány jako Příloha P XII.



Obr. 46. Graf- Napětí Von Mises ($\varnothing 25$ mm)



Obr. 47. Rozložení Von Misesova napětí ($f=0,6$; $\varnothing 25$ mm)

10.4 Vliv tření při zasouvání tyče o průměru 30 mm

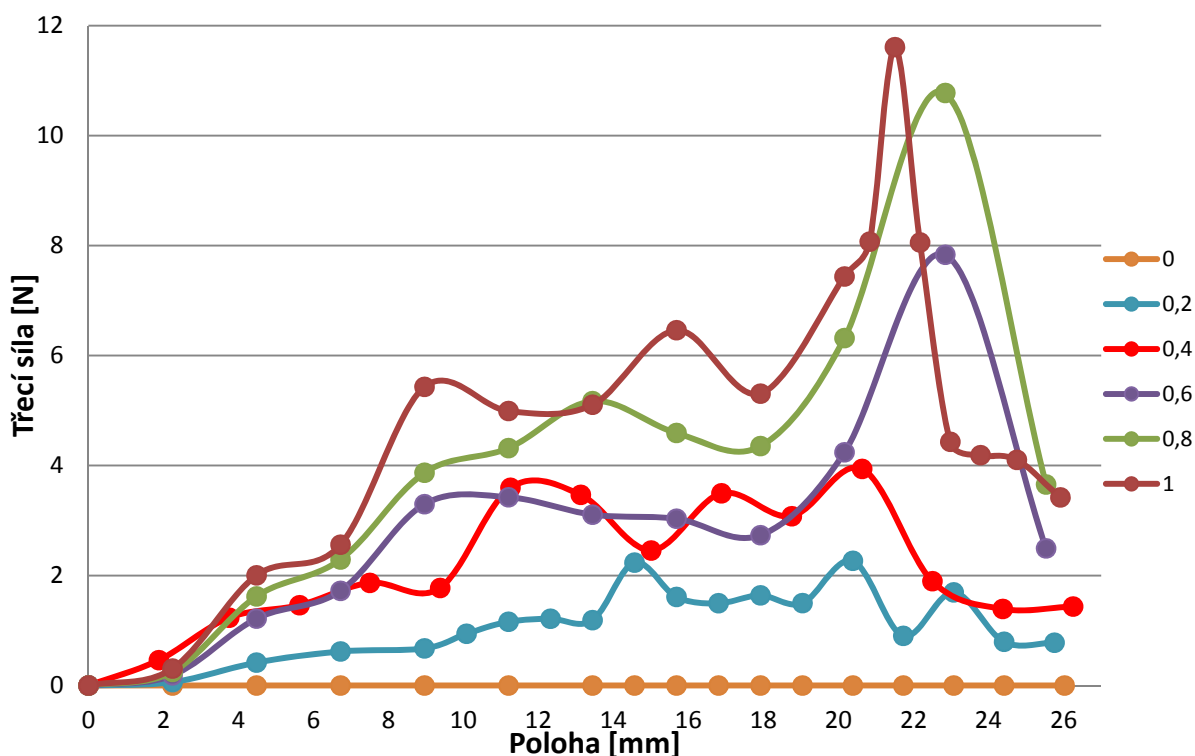
Na rozdíl od hodnot získaných při zasouvání tyče o předešlých průměrech, které jen postupně rostly pro jednotlivé průměry, došlo při zasouvání tyče o průměru 30 mm ke značnému nárůstu hodnot zkoumaných veličin. Hodnoty zkoumané veličiny se ustálily zhruba po 26 mm posunu tyče.

10.4.1 Třecí síla

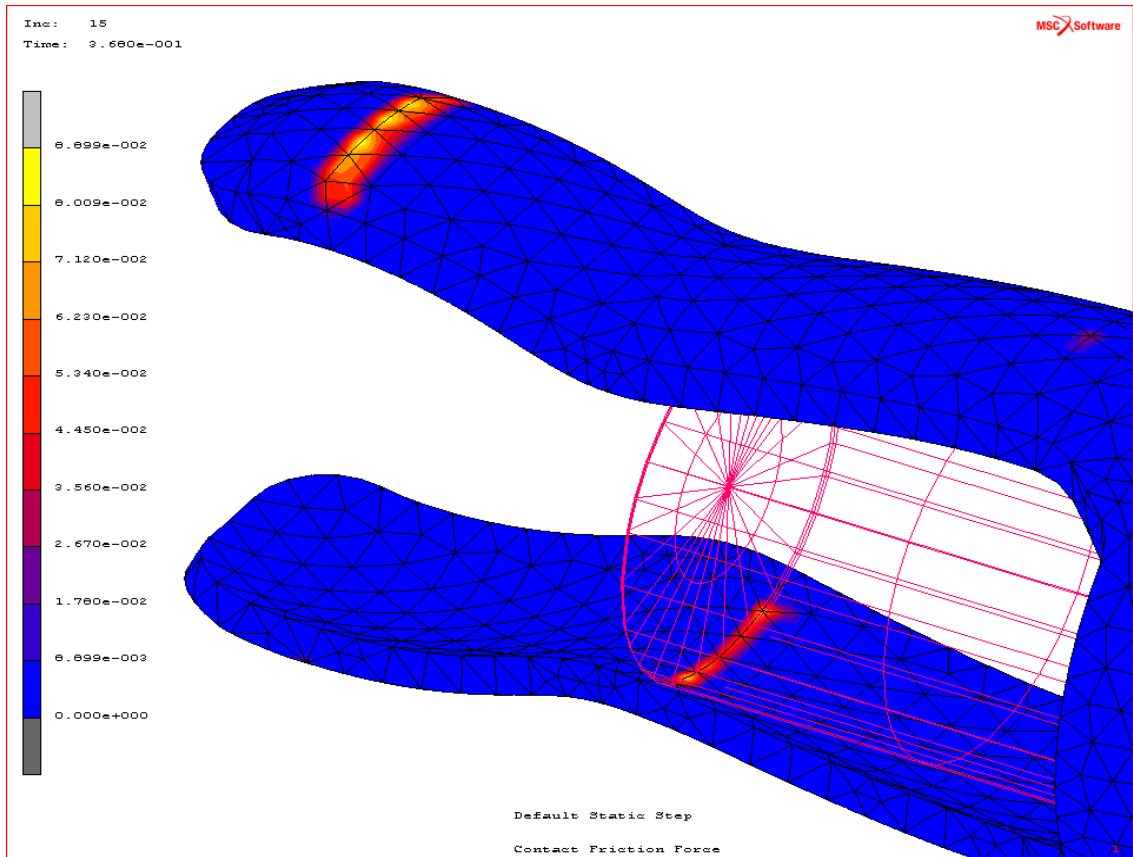
Na následujícím grafu (Obr. 48) lze vidět postupný nárůst třecí síly a její následný pokles. Hodnoty třecí síly pro jednotlivé koeficienty tření jsou seřazeny od největšího k nejmenšímu.

Na Obr. 49 je vidět rozložení třecí síly na pouzdře při zasouvání tyče o průměru 30 mm a třecím koeficientu 0,6. Můžeme vidět, že třecí síla se nachází také na horní ploše svěrky, avšak tato oblast nebyla použita pro výpočet. Pro výpočet byla použita jen oblast dotyku tyče a svěrek.

Hodnoty třecí síly získané pomocí programu MSC Mentat jsou přidány jako Příloha P XIII.



Obr. 48. Graf- Třecí síla (\varnothing 30 mm)



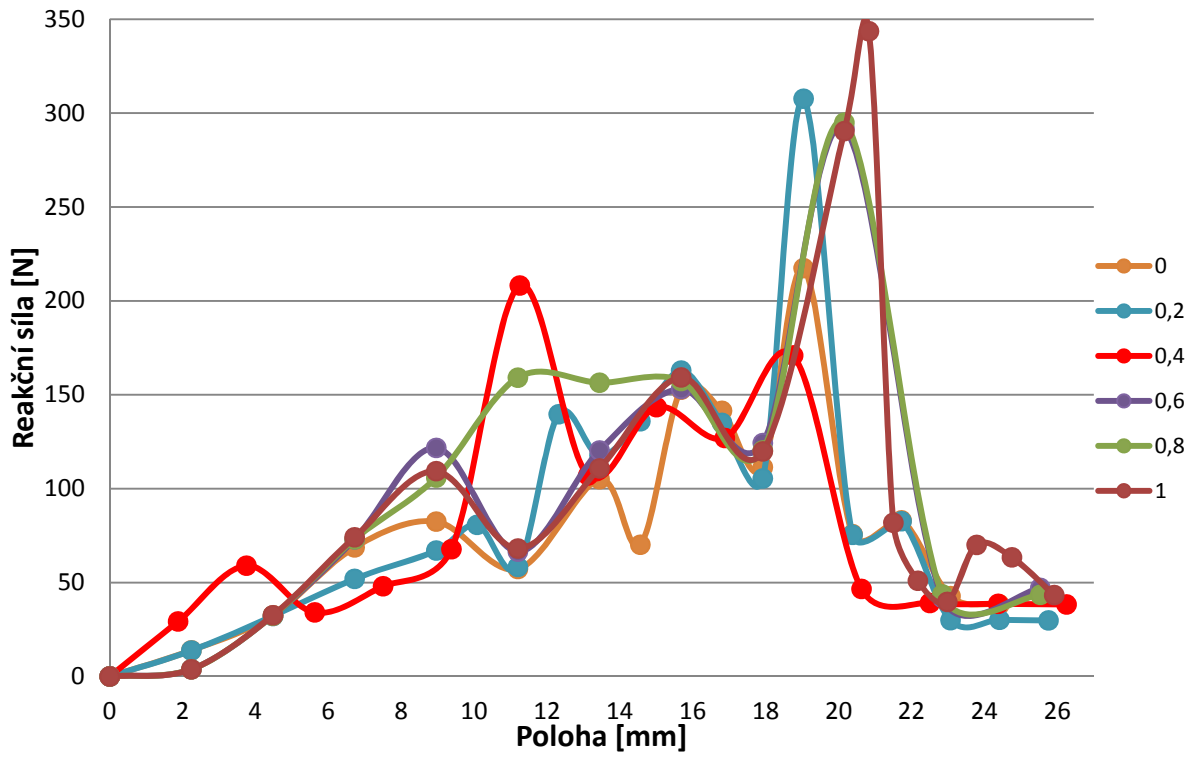
Obr. 49. Rozložení třecí síly ($f=0,6$; $\varnothing 30$ mm)

10.4.2 Reakční síla

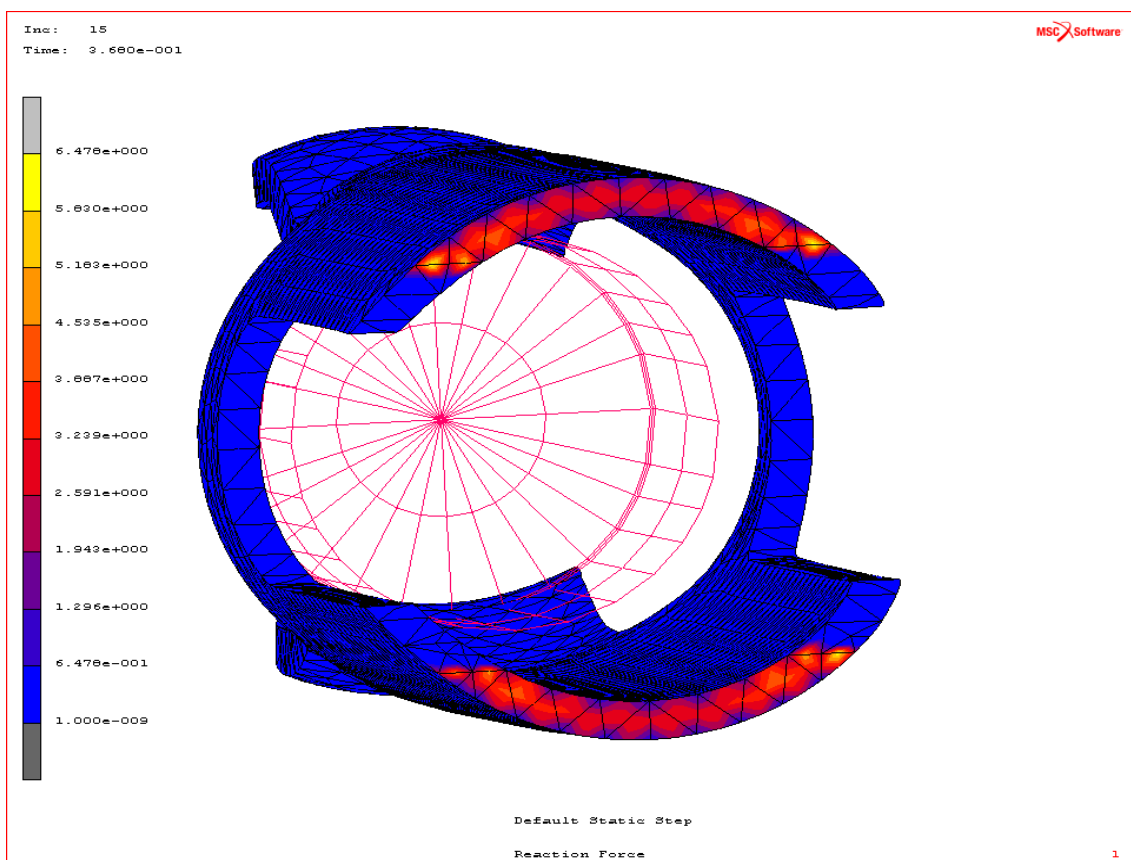
Na následujícím grafu (Obr. 50) lze vidět postupný nárůst reakční síly, následně prudký nárůst na maximální hodnotu a poté prudký pokles.

Na Obr. 51 je vidět rozložení reakční síly na pouzdře při zasouvání tyče o průměru 30 mm a třecím koeficientu 0,6.

Hodnoty reakční síly získané pomocí programu MSC Mentat jsou přidány jako Příloha P XIV.



Obr. 50. Graf- Reakční síla ($\varnothing 30$ mm)



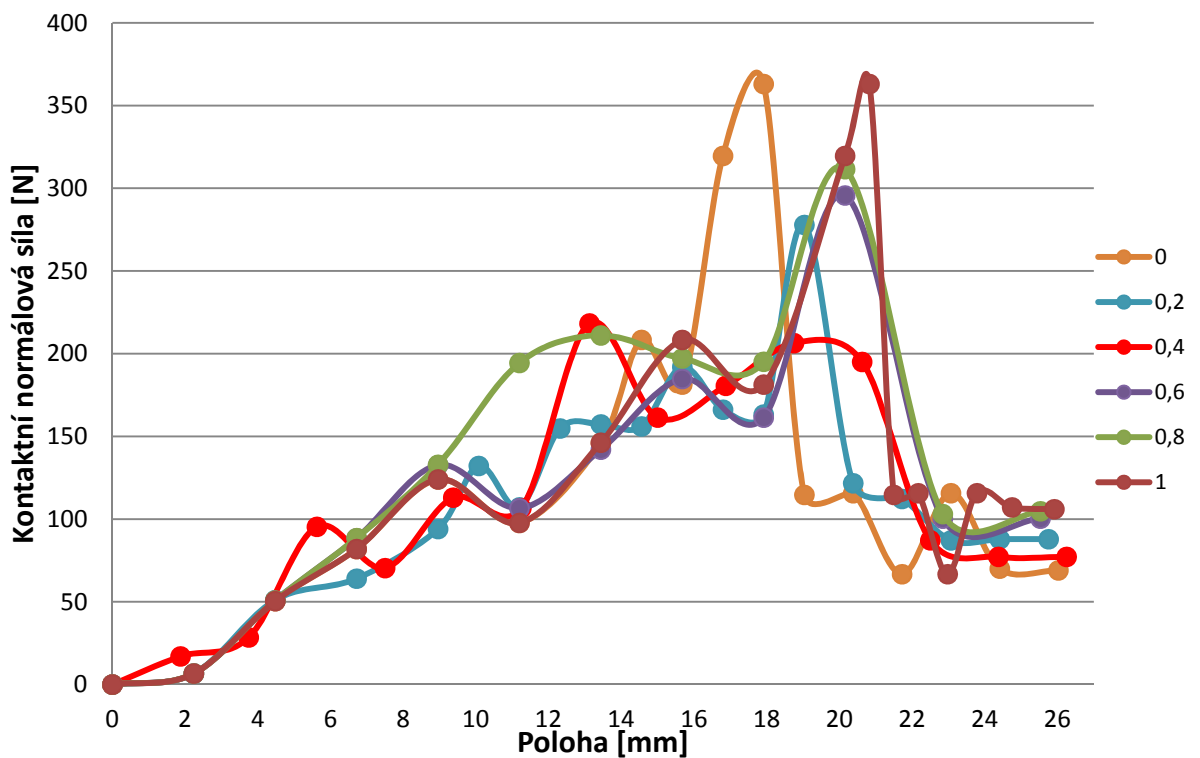
Obr. 51. Rozložení reakční síly ($f=0,6$; $\varnothing 30$ mm)

10.4.3 Kontaktní normálové napětí

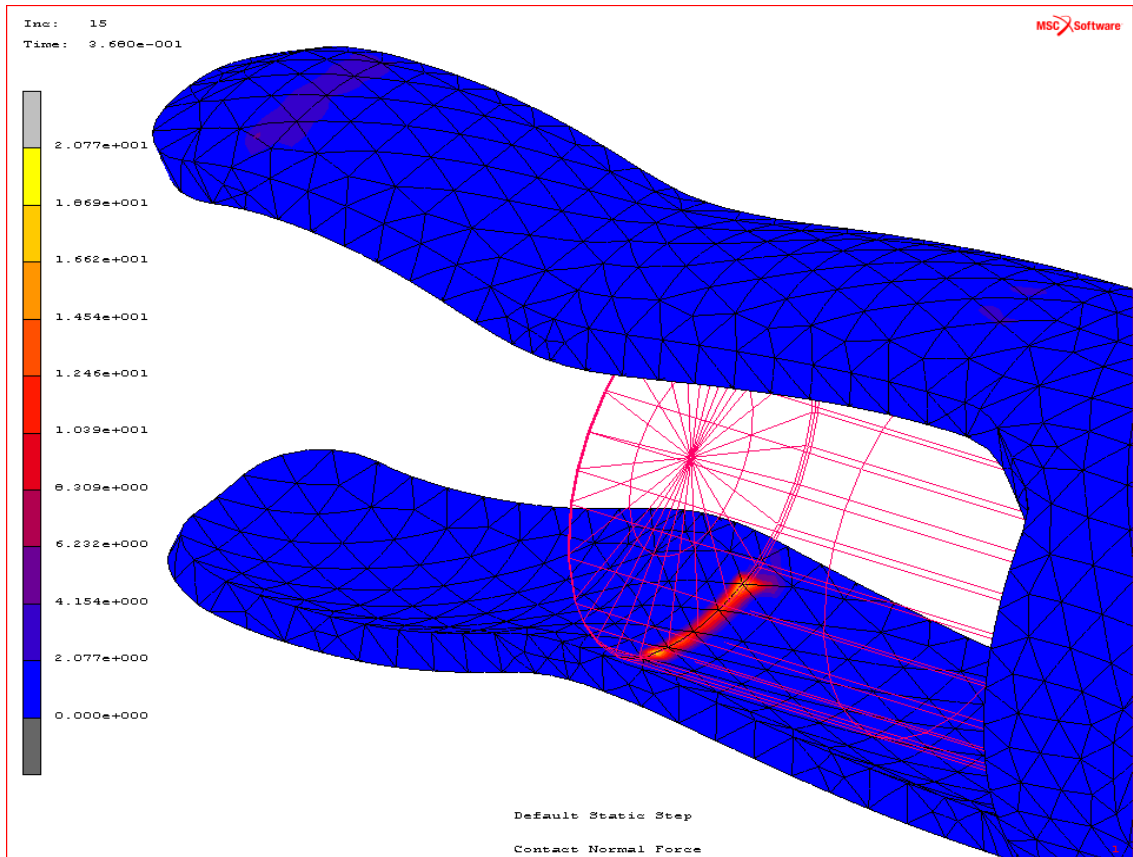
Na následujícím grafu (Obr. 52) lze vidět postupné narůstání kontaktní normálové síly na maximální hodnotu a následný pokles. Hodnoty se pro různé koeficienty tření mírně liší.

Na Obr. 53 je vidět rozložení kontaktní normálové síly na pouzdře při zasouvání tyče o průměru 30 mm a třecím koeficientu 0,6.

Hodnoty kontaktní normálové síly získané pomocí programu MSC Mentat jsou přidány jako Příloha P XV.



Obr. 52. Graf- Kontaktní normálová síla ($\varnothing 30$ mm)



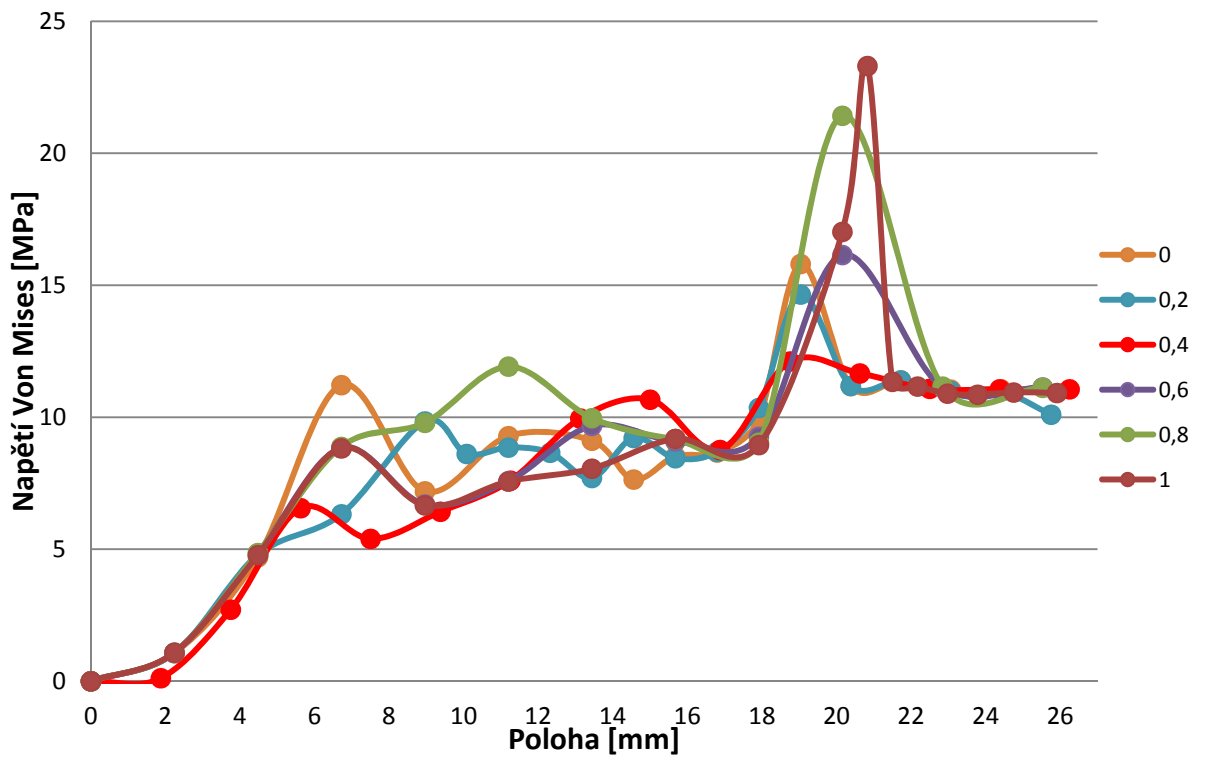
Obr. 53. Rozložení kontaktní normálové síly ($f=0,6$; $\varnothing 30$ mm)

10.4.4 Von Misesovo napětí

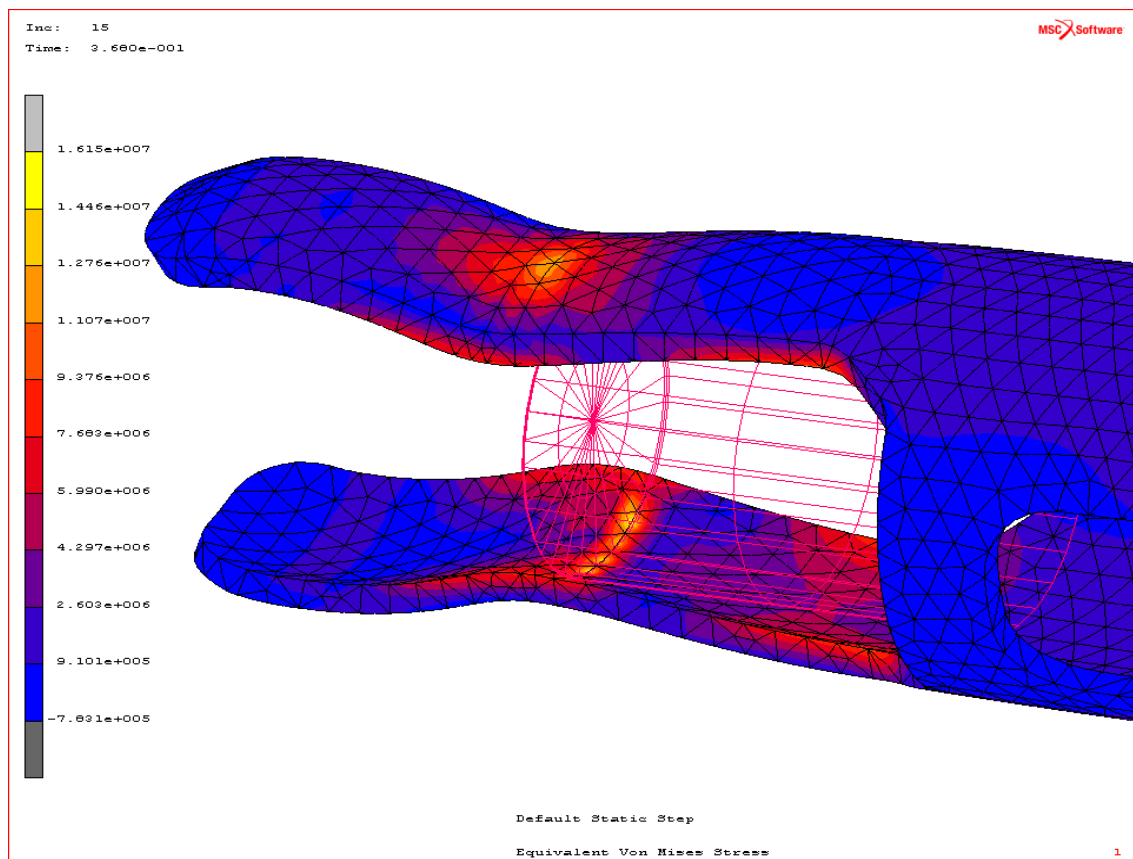
Na následujícím grafu (Obr. 54) lze na začátku vidět prudký nárůst Von Misesova napětí, dále jen pozvolný nárůst následovaný mírným poklesem a následným růstem na maximální hodnotu.

Na Obr. 55 je vidět rozložení Von Misesova napětí na pouzdře při zasouvání tyče o průměru 30 mm a třecím koeficientu 0,6.

Hodnoty Von Misesova napětí získané pomocí programu MSC Mentat jsou přidány jako Příloha P XVI.



Obr. 54. Graf- Napětí Von Mises ($\varnothing 30$ mm)



Obr. 55. Rozložení Von Misesova napětí ($f=0,6$; $\varnothing 30$ mm)

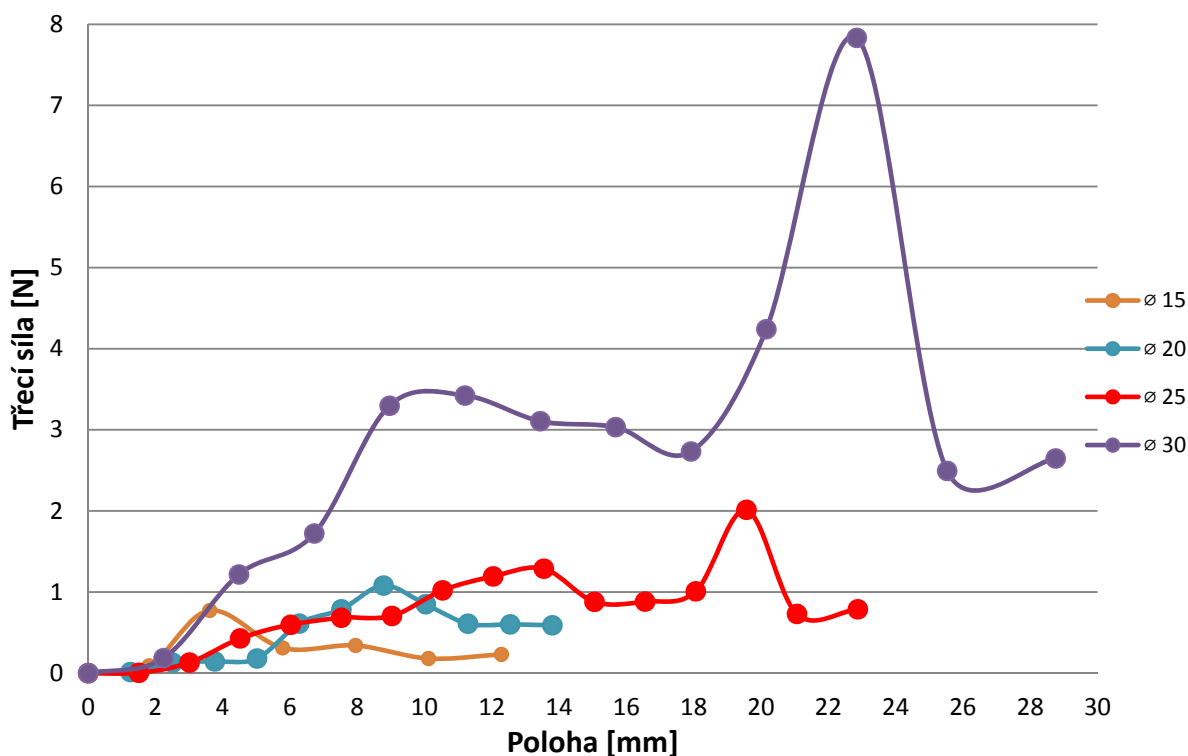
10.5 Porovnání hodnot jednotlivých průměrů tyčí

V následující kapitole je pomocí grafů zobrazen vliv změny průměru zasouvané tyče na výsledné hodnoty zkoumaných veličin.

Pro porovnávání byly vybrány tyče o koeficientu tření $f=0,6$.

10.5.1 Třecí síla

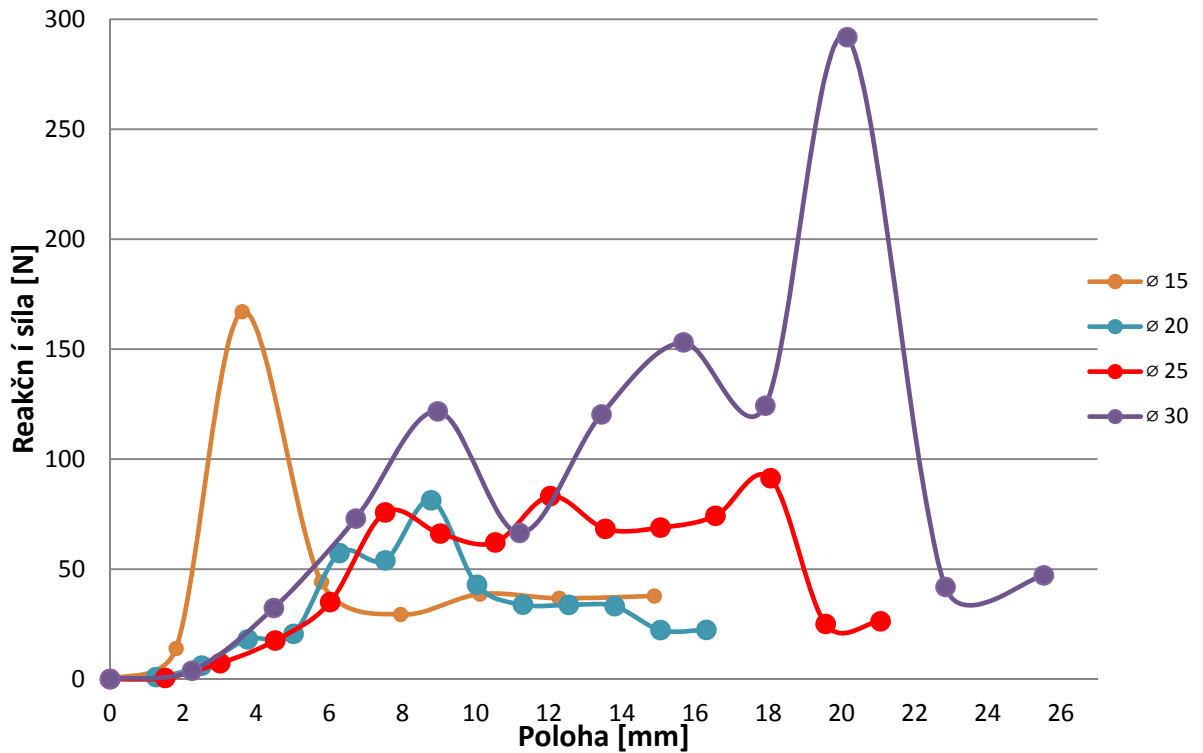
Na následujícím grafu (Obr. 56) lze vidět velmi rozdílný nárůst třecí síly při zasouvání tyče o daných průměrech. Hodnoty pro průměry 15, 20, 25 mm se od sebe liší jen mírně a hodnoty po ustálení postupně rostou. Průměr 30 mm se výrazně liší, což může být zapříčiněno větší plochou tyče, která je v kontaktu s pouzdem.



Obr. 56. Graf- Třecí síla ($f=0,6$)

10.5.2 Reakční síla

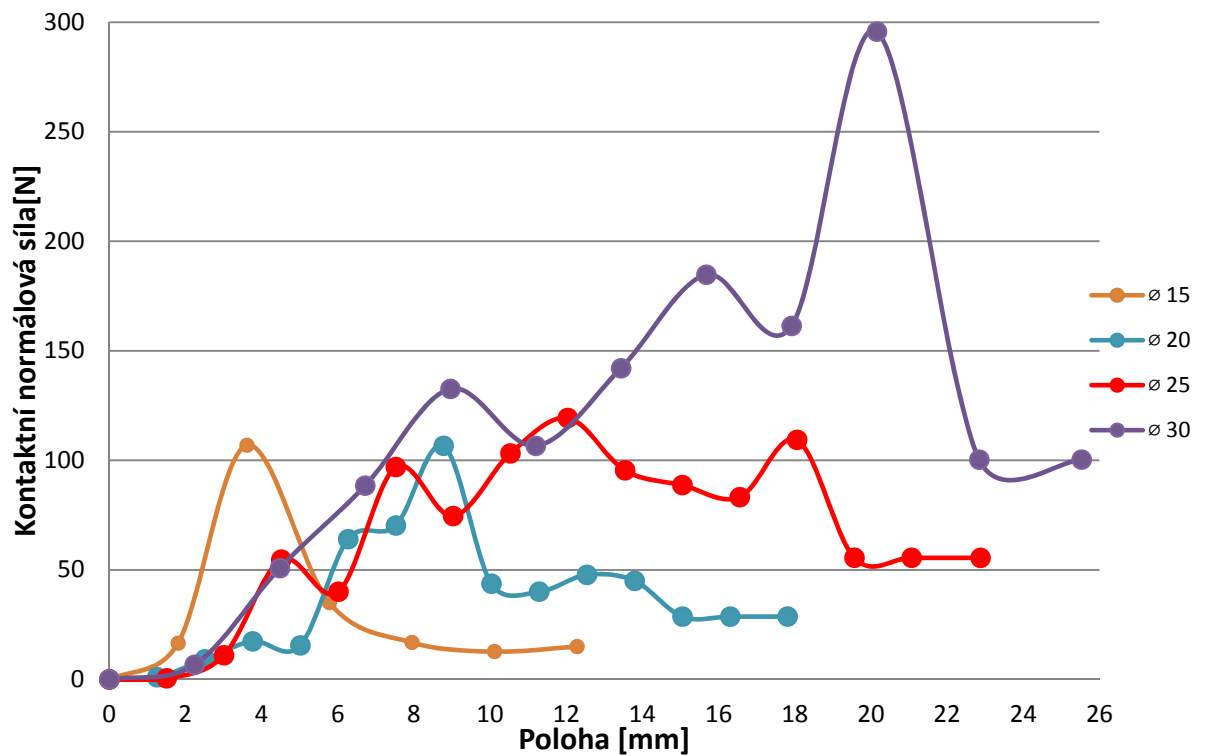
Na následujícím grafu (Obr. 57) lze vidět rozdílné chování pouzdra při zasouvání tyče o různých průměrech. Hodnoty reakční síly pro průměry tyče 20 – 30 mm postupně narůstají. U průměru 15 mm můžeme vidět, že hodnoty reakční síly jsou vyšší než u průměru 20 a 25 mm. Tento rozdíl je dán odlišnou deformací pouzdra.

Obr. 57. Graf- Reakční síla ($f=0,6$)

10.5.3 Kontaktní normálová síla

Na následujícím grafu (Obr. 58) lze vidět velmi rozdílný nárůst kontaktní normálové síly při zasouvání tyče o daných průměrech. Maximální hodnoty kontaktní normálové síly u tyčí o průměru 15 – 25 mm jsou jen mírně rozdílné. U průměru tyče 30 mm lze vidět velký rozdíl v maximální hodnotě síly.

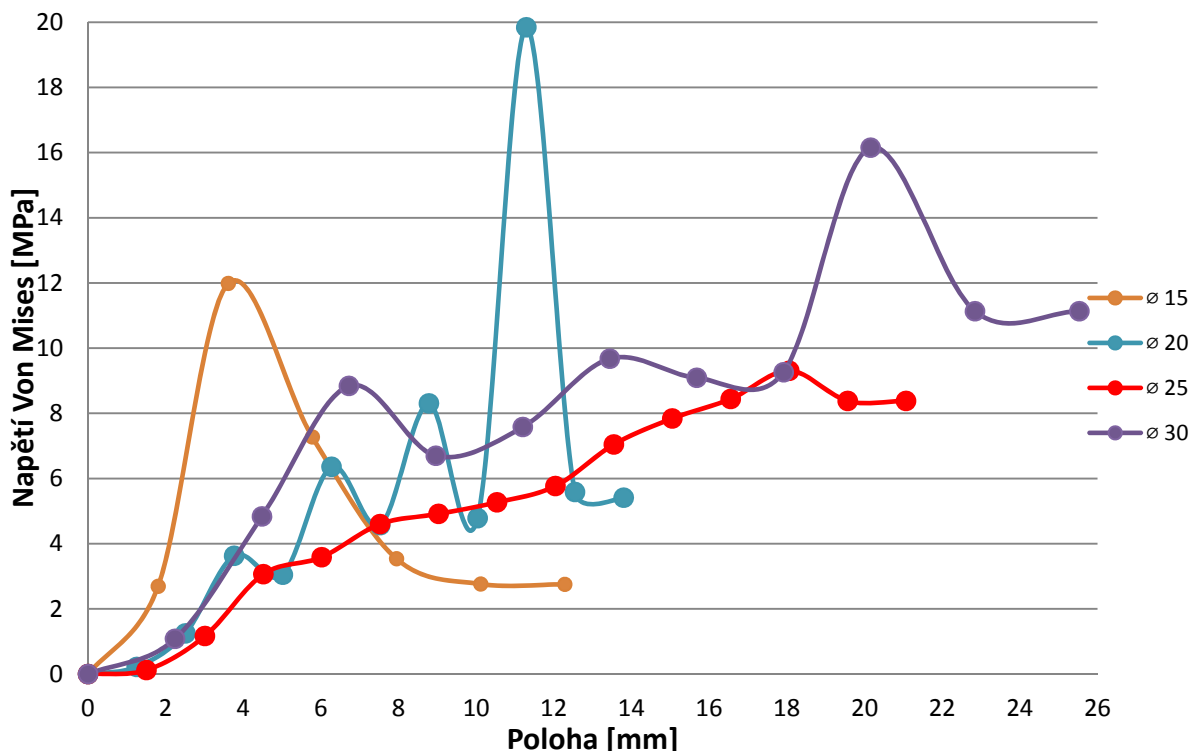
Hodnoty kontaktní normálové síly jsou po ustálení odstupňovány podle zvětšujícího průměru tyče.



Obr. 58. Graf - Kontaktní normálová síla ($f=0,6$)

10.5.4 Von Misesovo napětí

Na následujícím grafu (Obr. 59) lze vidět rozdílné chování pouzdra při zasouvání tyče o různých průměrech. U průměru tyče 25 a 30 mm je nárůst Von Misesova napětí na maximální hodnotu pozvolný, na rozdíl od průměru tyče 15 a 20 mm, kde je nárůst velmi prudký a po maximální hodnotě následně napětí výrazně klesá.



Obr. 59. Graf – Von Misesovo napětí ($f=0,6$)

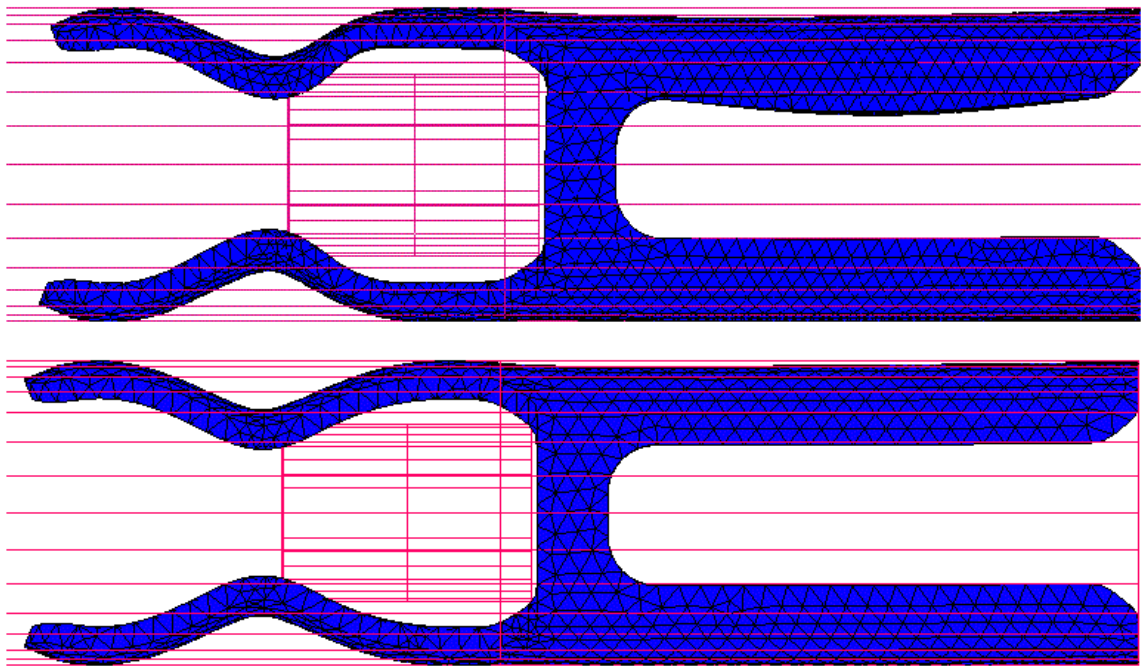
10.6 Vliv zpětného pohybu tyče na deformaci pouzdra

Jelikož při běžném používání bylo potřeba někdy zasunutou tyč vrátit zpátky do podavače, docházelo občas k neočekávané deformaci svěrek pouzdra, která způsobila převrácení svěrek, jež nadále už neplnily svou funkci. Z tohoto důvodu je v následující kapitole porovnáván vliv tření při zpětném pohybu tyče o různých průměrech na deformaci svěrek pouzdra.

Pro porovnání deformací pouzdra byla použita deformace způsobená pohybem tyče při zasouvání, kdy při normální deformaci by se dalo očekávat, že deformace pouzdra při zpětném pohybu tyče bude velmi podobná.

Cílem bylo zjistit, při kterých průměrech dojde k neočekávané deformaci pouzdra a jaký vliv má tření na tuto deformaci.

Po provedení výpočtů byl určen jako nejkritičtější průměr tyče průměr 25 mm, u kterého docházelo k největší deformaci u koeficientu tření $f=1$. Tato neočekávaná deformace se postupně se snižujícím se koeficientem tření zmenšovala a u koeficientu tření $f=0 - 0,4$ už docházelo k normální deformaci. Na Obr. 60 je zobrazeno porovnání maximální neočekávané deformace pouzdra při zpětném pohybu tyče s pouzdrem s normální deformací.



Obr. 60. Porovnání deformací pouzdra

Dále bylo z výpočtů určeno, že k mírné neočekávané deformaci pouzdra dochází u průměru tyče 23, 24, 26, 27 mm, a to vždy pro koeficient tření $f=0,8$ a $f=1$.

U průměru tyče 15-22 mm a 28-30 mm docházelo pouze k normální deformaci pouzdra, a to z důvodu nedostatku místa mezi pouzdrem a trubkou, nebo z důvodu nedostatečných sil vyvolaných zasouváním tyčí.

ZÁVĚR

V této bakalářské práci byl porovnáván vliv tření na deformaci polyuretanového pouzdra při zasouvání tyče o různém průměru.

Pro porovnání vlivu tření byl použit program MSC Patran a MSC Marc. Pomocí programu MSC Patran byl nadefinován FEM model, přiřazení vlastnosti materiálu včetně nejvhodnějšího materiálového modelu, který byl 3rd order deformation, vytvoření okrajových podmínek a zatížení. V programu MSC Marc proběhl samotný výpočet.

Zatížení bylo provedeno pomocí tyčí, které byly zasouvány do pouzdra. Tyče byly zvoleny o průměru 15, 20, 25 a 30 mm. Vliv tření byl reprezentován pomocí měnicího koeficientu tření v rozmezí 0 až 1.

Jako zkoumané veličiny, které sloužily k porovnání jednotlivých případů, byly použity třecí síla, reakční síla, kontaktní normálová síla a Von Misesovo napětí.

Po získání vypočtených hodnot byla patrná zvyšující se tendence zkoumaných veličin při rostoucím průměru tyče. Vliv tření na výsledné hodnoty veličin byl velmi značný, a to hlavně u třecí síly, která s rostoucím koeficientem tření výrazně rostla. U kontaktní normálové síly a reakční síly byl vliv tření méně výrazný. U Von Misesova napětí byl vliv tření velmi malý.

Dále byl zkoumán vliv zpětného pohybu na deformaci pouzdra. Po průběhu analýzy bylo zjištěno, že u některých průměrů byly pozorovány neočekávané deformace svěrek pouzdra. Jako nejkritičtější průměr tyče byl určen průměr 25 mm a koeficientem tření $f=0,6 - 1$, při kterém docházelo k největší deformaci pouzdra. Při nižším koeficientu tření už nadále nedocházelo k této neočekávané deformaci. Dále bylo zjištěno, že k mírné neočekávané deformaci pouzdra dochází u průměru tyče 23, 24, 26, 27 mm, a to vždy pro koeficient tření $f=0,8$ a $f=1$. Pro nižší koeficienty tření už nastává normální deformace.

Ze zjištěných hodnot je patrné, že pokud dojde ke snížení tření mezi pouzdrem a tyčí, nebude docházet k této neočekávané deformaci.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] DOMBROW, B. A. *Polyuretany*. Praha: SNTL, 1961. 149 s.
- [2] MLEZIVA, J; ŠŇUPÁREK, J. *Polymery: výroba, struktura, vlastnosti a použití*. 2. přeprac. vyd. Praha: Sobotáles, 2000. 537 s. ISBN 808592072
- [3] JAVOŘÍK, J. *Hyperelasticita*. Zlín, 2010. Učební text.
- [4] KLEDROWETZ, J. *Numerická analýza a tvarová optimalizace podávání materiálu ve víceřetenovém automatu*. Zlín, 2010. 96 s. Diplomová práce. FT UTB.
- [5] JAKEL, R. [Http://www.qucosa.de/](http://www.qucosa.de/) [online]. Technische Universität Chemnitz : 2010 [cit. 2011-12-12]. Analysis of Hyperelastic Materials. Dostupné z WWW: <http://www.qucosa.de/fileadmin/data/qucosa/documents/5995/data/Analysis_of_Hyperelastic_Materials_with_MECHANICA.pdf>.
- [6] *Wikipedie* [online]. 2011-10-09 [cit. 2011-12-14]. Tření. Dostupné z WWW: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/Tření>>.
- [7] JAVOŘÍK, J. *Aplikace výpočetních metod*. Zlín, 2009. Učební text.
- [8] JAVOŘÍK, Jakub a Miroslav MAŇAS. Hyperelasticita polyuretanového elastomeru. *Plasty a kaučuk*. Zlín: Poleng, 2011, 9-10, s. 4. ISSN 0322-7340.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

FEM	Finite Element Method (Metoda konečných prvků)
°C	Stupeň Celsia
σ	Napětí [MPa]
ε	Poměrná deformace [-]
MPa	Mega pascal (jednotka tlaku)
μ	Poissonovo číslo [-]
W	Hustota deformační energie [Pa]
I_i	Invariant pravého Cauchy-Greenova tenzoru deformace
λ_i	Poměrné protažení [-]
L_i	Deformovaná délka [m]
L_0	Původní délka [m]
S_{ij}	Složky 2. Piola-Kirchhoffova tenzoru napětí
∂	Parciální derivace
C_{ij}	Složky pravého Cauchy- Greenova deformačního tenzoru
p	Tlak [Pa]
δ_{ij}	Kronekerovo delta
s	Skutečné napětí [Pa]
c_{ij}	Materiálové konstanty [Pa]
μ	Počáteční smykový modul [Pa]
n	Počet polymerních řetězců v jednotkovém objemu
k	Boltzmannova konstanta [$J \cdot K^{-1}$]
T	Absolutní teplota [K]
λ_L	Limitní protažení sítě mikromechanického modelu struktury materiálu
E	Modul pružnosti [Pa]

I_m	Limitní hodnota členu (I_{1-3})
μ_i	Materiálová konstanta [-]
α_i	Materiálová konstanta [-]
F_T	Klidová třecí síla [N]
f_0	Součinitel klidového tření [-]
F_N	Normálová síla [N]
F_f	Třecí smyková síla [N]
f	Součinitel smykového tření [-]
F_t	Třecí síla (valivé tření) [N]
ξ	Rameno valivého odporu [m]
R	Poloměr otáčení [m]
m	Hmotnost [kg]
a	Zrychlení [m/s^2]
CAD	Computer aided design (Počítačová podpora konstrukce)
.CATPart	Nativní formát dílce v programu CATIA V5R18
.dat	Výstupní formát dat získaných ze zkoušek materiálu
Tet-10	Čtyřstěn tvořený deseti uzlovými body
σ_V	Napětí Von Mises [Mpa]
J_2	Druhý invariant deviačního napětí [MPa]
F_{Ni}	Kontaktní normálová síla, kterou působí i-tý uzel na podávanou tyč
F_{Ri}	Reakční síla působící v i-tém uzlovém bodu
F_{fi}	Třecí síla působící v i-tém uzlovém bodu
\varnothing	Průměr tyče
M	Množina materiálových konstant
G	Smykový modul pružnosti [Mpa]

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1. Základní dělení polymerů</i>	12
<i>Obr. 2. Vznik lineárního polyuretanu</i>	14
<i>Obr. 3. Typický tahový diagram elastomerních materiálů</i>	15
<i>Obr. 4. Jednoosá napjatost</i>	18
<i>Obr. 5. Čistý smyk</i>	19
<i>Obr. 6. Biaxiální napjatost</i>	20
<i>Obr. 7. Základní schéma tření</i>	25
<i>Obr. 8. Statické tření</i>	27
<i>Obr. 9. Dynamické tření</i>	27
<i>Obr. 10. Valivé tření</i>	28
<i>Obr. 11. Základní 3D elementy</i>	30
<i>Obr. 12. FEM model x Geometrický model</i>	30
<i>Obr. 13. Model pouzdra</i>	33
<i>Obr. 14. Graf- Naměřené hodnoty při zkouškách materiálu</i>	34
<i>Obr. 15. Schéma pohybu tyče</i>	36
<i>Obr. 16. Uložení pouzdra</i>	37
<i>Obr. 17. Model pro analýzu</i>	38
<i>Obr. 18. Výsledky zkoušky materiálu porovnané s 3rd order deformation modelem</i>	39
<i>Obr. 19. Tet-10 element</i>	39
<i>Obr. 20. Vytvořená síť na tělese</i>	40
<i>Obr. 21. Nehybně uchycené plochy pouzdra</i>	41
<i>Obr. 22. Zobrazení ploch pro výpočet reakční a kontaktní normálové síly</i>	43
<i>Obr. 23. Graf- Třecí síla ($\varnothing 15\text{mm}$)</i>	46
<i>Obr. 24. Rozložení třecí síly ($f=0,6$; $\varnothing 15\text{mm}$)</i>	46
<i>Obr. 25. Graf- Reakční síla ($\varnothing 15\text{ mm}$)</i>	47
<i>Obr. 26. Rozložení reakční síly ($f=0,6$; $\varnothing 15\text{ mm}$)</i>	48
<i>Obr. 27. Graf- Kontaktní normálová síla ($\varnothing 15\text{ mm}$)</i>	49
<i>Obr. 28. Rozložení kontaktní normálové síly ($f=0,6$; $\varnothing 15\text{ mm}$)</i>	49
<i>Obr. 29. Graf- Napětí Von Mises ($\varnothing 15\text{ mm}$)</i>	50
<i>Obr. 30. Rozložení Von Misesova napětí ($f=0,6$; $\varnothing 15\text{ mm}$)</i>	51
<i>Obr. 31. Graf- Třecí síla ($\varnothing 20\text{ mm}$)</i>	52
<i>Obr. 32. Rozložení třecí síly ($f=0,6$; $\varnothing 20\text{ mm}$)</i>	52

<i>Obr. 33. Graf- Reakční síla ($\varnothing 20$ mm)</i>	53
<i>Obr. 34. Rozložení reakční síly ($f=0,6$; $\varnothing 20$ mm)</i>	54
<i>Obr. 35. Graf- Kontaktní normálová síla ($\varnothing 20$ mm)</i>	55
<i>Obr. 36. Rozložení kontaktní normálové síly ($f=0,6$; $\varnothing 20$ mm)</i>	55
<i>Obr. 37. Deformované pouzdro ($f=0,2$; $\varnothing 20$ mm)</i>	56
<i>Obr. 38. Graf- Napětí Von Mises ($\varnothing 20$ mm)</i>	57
<i>Obr. 39. Rozložení Von Misesova napětí ($f=0,6$; $\varnothing 20$ mm)</i>	57
<i>Obr. 40. Graf- Třecí síla ($\varnothing 25$ mm)</i>	58
<i>Obr. 41. Rozložení třecí síly ($f=0,6$; $\varnothing 25$ mm)</i>	59
<i>Obr. 42. Graf- Reakční síla ($\varnothing 25$ mm)</i>	60
<i>Obr. 43. Rozložení reakční síly ($f=0,6$; $\varnothing 25$ mm)</i>	60
<i>Obr. 44. Graf- Kontaktní normálová síla ($\varnothing 25$ mm)</i>	61
<i>Obr. 45. Rozložení kontaktní normálové síly ($f=0,6$; $\varnothing 25$ mm)</i>	62
<i>Obr. 46. Graf- Napětí Von Mises ($\varnothing 25$ mm)</i>	63
<i>Obr. 47. Rozložení Von Misesova napětí ($f=0,6$; $\varnothing 25$ mm)</i>	63
<i>Obr. 48. Graf- Třecí síla ($\varnothing 30$ mm)</i>	64
<i>Obr. 49. Rozložení třecí síly ($f=0,6$; $\varnothing 30$ mm)</i>	65
<i>Obr. 50. Graf- Reakční síla ($\varnothing 30$ mm)</i>	66
<i>Obr. 51. Rozložení reakční síly ($f=0,6$; $\varnothing 30$ mm)</i>	66
<i>Obr. 52. Graf- Kontaktní normálová síla ($\varnothing 30$ mm)</i>	67
<i>Obr. 53. Rozložení kontaktní normálové síly ($f=0,6$; $\varnothing 30$ mm)</i>	68
<i>Obr. 54. Graf- Napětí Von Mises ($\varnothing 30$ mm)</i>	69
<i>Obr. 55. Rozložení Von Misesova napětí ($f=0,6$; $\varnothing 30$ mm)</i>	69
<i>Obr. 56. Graf- Třecí síla ($f=0,6$)</i>	70
<i>Obr. 57. Graf- Reakční síla ($f=0,6$)</i>	71
<i>Obr. 58. Graf- Kontaktní normálová síla ($f=0,6$)</i>	72
<i>Obr. 59. Graf- Von Misesovo napětí ($f=0,6$)</i>	73
<i>Obr. 60. Porovnání deformací pouzdra</i>	74

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1: Vlastnosti polyuretanu MTQ 25145 [8]</i>	<i>35</i>
---	-----------

SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha P I: Třecí síla (průměr tyče 15mm)
- Příloha P II: Reakční síla (průměr tyče 15mm)
- Příloha P III: Kontaktní normálová síla (průměr tyče 15mm)
- Příloha P IV: Napětí Von Mises (průměr tyče 15mm)
- Příloha P V: Třecí síla (průměr tyče 20mm)
- Příloha P VI: Reakční síla (průměr tyče 20mm)
- Příloha P VII: Kontaktní normálová síla (průměr tyče 20mm)
- Příloha P VIII: Napětí Von Mises (průměr tyče 20mm)
- Příloha P IX: Třecí síla (průměr tyče 25mm)
- Příloha P X: Reakční síla (průměr tyče 25mm)
- Příloha P XI: Kontaktní normálová síla (průměr tyče 25mm)
- Příloha P XII: Napětí Von Mises (průměr tyče 25mm)
- Příloha P XIII: Třecí Síla (průměr tyče 30mm)
- Příloha P XIV: Reakční síla (průměr tyče 30mm)
- Příloha P XV: Kontaktní normálové napětí (průměr tyče 30mm)
- Příloha P XVI: Napětí Von Mises (průměr tyče 30mm)
- Příloha P XVII: Výkres pouzdra

PŘÍLOHA P I: TŘECÍ SÍLA (PRŮMĚR TYČE 15MM)

koeficient tření []	0		0,2		0,4	
n	Poloha [mm]	Třecí síla [N]	Poloha [mm]	Třecí síla [N]	Poloha [mm]	Třecí síla [N]
1	0	0	0	0	0	0
2	1,806	0	1,806	0,031	1,806	0,061
3	3,612	0	3,612	0,260	3,612	0,519
4	5,779	0	5,779	0,095	5,779	0,137
5	7,946	0	7,946	0,103	7,946	0,196
6	10,113	0	10,113	0,103	10,113	0,125
7	12,280	0	12,280	0,066	12,280	0,190
8	14,881	0	14,881	0,061	14,881	0,182
9	18,002	0	18,002	0,061	18,002	0,168
10	21,746	0	21,746	0,061	21,746	0,165
11	26,240	0	26,240	0,061	26,240	0,164
12	27,720	0	27,720	0,061	27,720	0,164
koeficient tření []	0,6		0,8		1	
n	Poloha [mm]	Třecí síla [N]	Poloha [mm]	Třecí síla [N]	Poloha [mm]	Třecí síla [N]
1	0	0	0	0	0	0
2	1,806	0,090	1,806	0,120	1,806	0,149
3	3,612	0,773	3,612	1,029	3,612	1,285
4	5,779	0,311	5,779	0,415	5,779	0,313
5	7,946	0,342	7,946	0,400	7,946	0,480
6	10,113	0,181	10,113	0,402	10,113	0,302
7	12,280	0,231	12,280	0,297	12,280	0,360
8	14,881	0,209	14,881	0,293	14,881	0,332
9	18,002	0,189	18,002	0,293	18,002	0,314
10	21,746	0,187	21,746	0,293	21,746	0,310
11	26,240	0,186	26,240	0,293	26,240	0,309
12	27,720	0,186	27,720	0,293	27,720	0,309

PŘÍLOHA P II: REAKČNÍ SÍLA (PRŮMĚR TYČE 15MM)

koeficient tření []	0		0,2		0,4	
n	Poloha [mm]	Reakční síla [N]	Poloha [mm]	Reakční síla [N]	Poloha [mm]	Reakční síla [N]
1	0	0	0	0	0	0
2	1,806	13,808	1,806	13,810	1,806	13,813
3	3,612	172,582	3,612	172,831	3,612	173,106
4	5,779	31,901	5,779	48,887	5,779	31,280
5	7,946	29,814	7,946	35,416	7,946	28,103
6	10,113	37,819	10,113	37,391	10,113	37,450
7	12,280	31,176	12,280	30,011	12,280	37,831
8	14,881	30,036	14,881	30,010	14,881	37,795
9	18,002	29,854	18,002	30,005	18,002	28,639
10	21,746	29,816	21,746	30,008	21,746	28,108
11	26,240	29,803	26,240	30,011	26,240	28,102
12	27,720	29,801	27,720	30,010	27,720	28,101
koeficient tření []	0,6		0,8		1	
n	Poloha [mm]	Reakční síla [N]	Poloha [mm]	Reakční síla [N]	Poloha [mm]	Reakční síla [N]
1	0	0	0	0	0	0
2	1,806	13,908	1,806	13,910	1,806	13,906
3	3,612	167,025	3,612	167,407	3,612	167,752
4	5,779	44,174	5,779	44,245	5,779	31,992
5	7,946	29,381	7,946	35,653	7,946	29,613
6	10,113	38,627	10,113	29,742	10,113	39,275
7	12,280	36,750	12,280	29,773	12,280	49,134
8	14,881	37,761	14,881	29,686	14,881	32,881
9	18,002	29,526	18,002	29,683	18,002	29,778
10	21,746	29,518	21,746	29,683	21,746	29,704
11	26,240	29,443	26,240	29,682	26,240	29,624
12	27,720	29,426	27,720	29,682	27,720	29,604

PŘÍLOHA P III: KONTAKTNÍ NORMÁLOVÁ SÍLA (PRŮMĚR TYČE 15MM)

koeficient tření []	0		0,2		0,4	
n	Poloha [mm]	Kontaktní normálová síla [N]	Poloha [mm]	Kontaktní normálová síla [N]	Poloha [mm]	Kontaktní normálová síla [N]
1	0	0	0	0	0	0
2	1,806	16,698	1,806	16,694	1,806	16,691
3	3,612	106,493	3,612	106,521	3,612	106,549
4	5,779	19,026	5,779	32,027	5,779	14,005
5	7,946	22,202	7,946	26,292	7,946	17,202
6	10,113	13,669	10,113	21,021	10,113	13,079
7	12,280	13,441	12,280	13,652	12,280	17,852
8	14,881	13,653	14,881	13,652	14,881	18,489
9	18,002	13,564	18,002	13,653	18,002	18,432
10	21,746	13,610	21,746	13,653	21,746	18,437
11	26,240	13,587	26,240	13,653	26,240	18,437
12	27,720	13,599	27,720	13,653	27,720	18,438
koeficient tření []	0,6		0,8		1	
n	Poloha [mm]	Kontaktní normálová síla [N]	Poloha [mm]	Kontaktní normálová síla [N]	Poloha [mm]	Kontaktní normálová síla [N]
1	0	0	0	0	0	0
2	1,806	16,559	1,806	16,555	1,806	16,550
3	3,612	106,900	3,612	106,916	3,612	106,934
4	5,779	35,081	5,779	35,018	5,779	13,378
5	7,946	16,887	7,946	30,054	7,946	17,259
6	10,113	12,729	10,113	16,446	10,113	12,703
7	12,280	15,003	12,280	16,419	12,280	14,477
8	14,881	13,869	14,881	16,422	14,881	13,734
9	18,002	13,936	18,002	16,423	18,002	13,853
10	21,746	13,733	21,746	16,423	21,746	13,748
11	26,240	13,871	26,240	16,423	26,240	13,801
12	27,720	13,707	27,720	16,423	27,720	13,780

PŘÍLOHA P IV: NAPĚTÍ VON MISES (PRŮMĚR TYČE 15MM)

koeficient tření []	0		0,2		0,4	
n	Poloha [mm]	Napětí Von Mises [MPa]	Poloha [mm]	Napětí Von Mises [MPa]	Poloha [mm]	Napětí Von Mises [MPa]
1	0	0	0	0	0	0
2	1,806	2,697	1,806	2,700	1,806	2,702
3	3,612	11,847	3,612	11,862	3,612	11,876
4	5,779	2,244	5,779	6,687	5,779	1,935
5	7,946	3,326	7,946	4,804	7,946	3,563
6	10,113	2,848	10,113	2,862	10,113	2,827
7	12,280	2,842	12,280	2,857	12,280	3,062
8	14,881	2,848	14,881	2,857	14,881	2,933
9	18,002	2,845	18,002	2,857	18,002	2,929
10	21,746	2,847	21,746	2,857	21,746	2,929
11	26,240	2,846	26,240	2,857	26,240	2,929
12	27,720	2,846	27,720	2,857	27,720	2,929
koeficient tření []	0,6		0,8		1	
n	Poloha [mm]	Napětí Von Mises [MPa]	Poloha [mm]	Napětí Von Mises [MPa]	Poloha [mm]	Napětí Von Mises [MPa]
1	0	0	0	0	0	0
2	1,806	2,693	1,806	2,694	1,806	2,697
3	3,612	11,986	3,612	11,997	3,612	12,009
4	5,779	7,273	5,779	7,275	5,779	1,869
5	7,946	3,539	7,946	4,482	7,946	3,543
6	10,113	2,764	10,113	2,795	10,113	2,786
7	12,280	2,753	12,280	2,801	12,280	2,782
8	14,881	2,774	14,881	2,797	14,881	2,794
9	18,002	2,779	18,002	2,795	18,002	2,799
10	21,746	2,776	21,746	2,795	21,746	2,796
11	26,240	2,778	26,240	2,795	26,240	2,798
12	27,720	2,777	27,720	2,795	27,720	2,797

PŘÍLOHA P V: TŘECÍ SÍLA (PRŮMĚR TYČE 20MM)

koeficient tření []	0		0,2		0,4	
n	Poloha [mm]	Třecí síla [N]	Poloha [mm]	Třecí síla [N]	Poloha [mm]	Třecí síla [N]
1	0	0	0	0	0	0
2	1,254	0	1,167	0,005	1,254	0,009
3	2,508	0	2,333	0,040	2,508	0,086
4	3,762	0	3,500	0,043	3,762	0,096
5	5,017	0	4,667	0,074	5,017	0,162
6	6,271	0	5,833	0,129	6,271	0,386
7	7,525	0	7,000	0,293	7,525	0,439
8	8,779	0	8,167	0,251	8,779	0,758
9	10,033	0	9,333	0,484	10,284	0,576
10	11,538	0	10,500	0,305	11,789	0,637
11	13,043	0	11,667	0,299	13,294	0,913
12	14,548	0	12,833	0,253	14,798	0,396
13	16,053	0	14,000	0,168	16,303	0,246
14	17,858	0	15,167	0,119	18,109	0,248
15	20,026	0	16,333	0,120	20,277	0,247
koeficient tření []	0,6		0,8		1	
n	Poloha [mm]	Třecí síla [N]	Poloha [mm]	Třecí síla [N]	Poloha [mm]	Třecí síla [N]
1	0	0	0	0	0	0
2	1,254	0,014	1,254	0,018	1,254	0,023
3	2,508	0,129	2,508	0,172	2,508	0,215
4	3,762	0,144	3,762	0,192	3,762	0,221
5	5,017	0,181	5,017	0,268	5,017	0,350
6	6,271	0,611	6,271	0,860	6,271	0,981
7	7,525	0,787	7,525	0,891	7,525	1,096
8	8,779	1,079	8,779	1,469	8,779	1,893
9	10,033	0,850	10,033	1,419	10,284	1,737
10	11,287	0,610	11,287	0,835	11,789	1,044
11	12,541	0,601	12,541	0,758	13,294	1,143
12	13,795	0,590	13,795	0,721	14,798	0,569
13	15,049	0,437	15,049	0,582	16,303	0,564
14	16,303	0,359	16,303	0,487	18,109	0,562
15	17,808	0,363	17,808	0,478	20,277	0,559

PŘÍLOHA P VI: REAKČNÍ SÍLA (PRŮMĚR TYČE 20MM)

koeficient tření []	0		0,2		0,4	
n	Poloha [mm]	Reakční síla [N]	Poloha [mm]	Reakční síla [N]	Poloha [mm]	Reakční síla [N]
1	0	0	0	0	0	0
2	1,254	0,887	1,167	0,885	1,254	0,883
3	2,508	5,710	2,333	5,694	2,508	6,142
4	3,762	18,471	3,500	15,921	3,762	18,060
5	5,017	21,558	4,667	12,488	5,017	19,932
6	6,271	55,790	5,833	47,050	6,271	58,022
7	7,525	87,655	7,000	46,331	7,525	55,093
8	8,779	48,456	8,167	96,038	8,779	89,211
9	10,033	187,449	9,333	53,322	10,284	43,150
10	11,538	45,055	10,500	50,469	11,789	161,812
11	13,043	49,278	11,667	47,512	13,294	37,469
12	14,548	22,383	12,833	71,301	14,798	24,538
13	16,053	22,357	14,000	31,310	16,303	24,656
14	17,858	22,347	15,167	31,320	18,109	24,530
15	20,026	22,344	16,333	31,354	20,277	24,495
koeficient tření []	0,6		0,8		1	
n	Poloha [mm]	Reakční síla [N]	Poloha [mm]	Reakční síla [N]	Poloha [mm]	Reakční síla [N]
1	0	0	0	0	0	0
2	1,254	0,881	1,254	0,879	1,254	0,877
3	2,508	6,137	2,508	6,157	2,508	6,176
4	3,762	18,077	3,762	18,025	3,762	19,014
5	5,017	20,564	5,017	21,234	5,017	21,313
6	6,271	57,275	6,271	51,270	6,271	56,490
7	7,525	53,958	7,525	63,085	7,525	61,871
8	8,779	81,274	8,779	148,784	8,779	140,874
9	10,033	42,884	10,033	45,917	10,284	51,166
10	11,287	33,834	11,287	37,193	11,789	45,562
11	12,541	33,736	12,541	37,967	13,294	30,609
12	13,795	33,159	13,795	39,018	14,798	30,428
13	15,049	22,290	15,049	28,512	16,303	30,128
14	16,303	22,356	16,303	28,442	18,109	30,110
15	17,808	22,297	17,808	28,407	20,277	30,095

**PŘÍLOHA P VII: KONTAKTNÍ NORMÁLOVÁ SÍLA (PRŮMĚR
TYČE 20MM)**

koeficient tření []	0		0,2		0,4	
n	Poloha [mm]	Kontaktní normálová síla [N]	Poloha [mm]	Kontaktní normálová síla [N]	Poloha [mm]	Kontaktní normálová síla [N]
1	0	0	0	0	0	0
2	1,254	0,988	1,167	0,987	1,254	0,977
3	2,508	9,850	2,333	8,080	2,508	9,178
4	3,762	23,994	3,500	16,410	3,762	17,335
5	5,017	22,087	4,667	11,702	5,017	21,508
6	6,271	53,990	5,833	46,141	6,271	72,914
7	7,525	86,248	7,000	67,448	7,525	69,578
8	8,779	51,734	8,167	114,949	8,779	94,553
9	10,033	111,336	9,333	260,010	10,284	58,580
10	11,538	61,651	10,500	52,221	11,789	81,186
11	13,043	42,547	11,667	53,782	13,294	54,798
12	14,548	25,307	12,833	36,406	14,798	29,949
13	16,053	25,303	14,000	27,986	16,303	29,955
14	17,858	25,303	15,167	27,978	18,109	29,898
15	20,026	25,303	16,333	27,909	20,277	29,976
koeficient tření []	0,6		0,8		1	
n	Poloha [mm]	Kontaktní normálová síla [N]	Poloha [mm]	Kontaktní normálová síla [N]	Poloha [mm]	Kontaktní normálová síla [N]
1	0	0	0	0	0	0
2	1,254	0,986	1,254	0,986	1,254	0,985
3	2,508	9,166	2,508	9,165	2,508	9,164
4	3,762	17,376	3,762	17,396	3,762	18,088
5	5,017	15,510	5,017	15,076	5,017	13,053
6	6,271	64,009	6,271	68,434	6,271	56,716
7	7,525	70,257	7,525	80,801	7,525	77,120
8	8,779	106,629	8,779	128,689	8,779	120,507
9	10,033	43,681	10,033	51,770	10,284	41,624
10	11,287	40,052	11,287	40,653	11,789	48,039
11	12,541	47,727	12,541	47,765	13,294	39,308
12	13,795	44,983	13,795	43,313	14,798	24,968
13	15,049	28,660	15,049	28,515	16,303	24,967
14	16,303	28,659	16,303	28,559	18,109	24,959
15	17,808	28,697	17,808	28,552	20,277	24,959

PŘÍLOHA P VIII: NAPĚTÍ VON MISES (PRŮMĚR TYČE 20MM)

koeficient tření []	0		0,2		0,4	
n	Poloha [mm]	Napětí Von Mises [MPa]	Poloha [mm]	Napětí Von Mises [MPa]	Poloha [mm]	Napětí Von Mises [MPa]
1	0	0	0	0	0	0
2	1,254	0,219	1,167	0,219	1,254	0,219
3	2,508	1,250	2,333	1,235	2,508	1,250
4	3,762	2,686	3,500	3,359	3,762	2,686
5	5,017	2,501	4,667	2,461	5,017	2,501
6	6,271	4,190	5,833	4,196	6,271	4,190
7	7,525	6,802	7,000	3,466	7,525	6,802
8	8,779	4,130	8,167	6,005	8,779	4,130
9	10,033	18,622	9,333	15,949	10,284	18,622
10	11,538	6,351	10,500	7,229	11,789	6,351
11	13,043	6,111	11,667	7,456	13,294	6,111
12	14,548	5,296	12,833	9,654	14,798	5,296
13	16,053	5,295	14,000	4,471	16,303	5,295
14	17,858	5,295	15,167	5,471	18,109	5,295
15	20,026	5,295	16,333	5,471	20,277	5,295
koeficient tření []	0,6		0,8		1	
n	Poloha [mm]	Napětí Von Mises [MPa]	Poloha [mm]	Napětí Von Mises [MPa]	Poloha [mm]	Napětí Von Mises [MPa]
1	0	0	0	0	0	0
2	1,254	0,219	1,254	0,220	1,254	0,220
3	2,508	1,249	2,508	1,248	2,508	1,248
4	3,762	3,629	3,762	3,685	3,762	3,712
5	5,017	3,048	5,017	2,521	5,017	2,474
6	6,271	6,360	6,271	5,061	6,271	4,086
7	7,525	4,569	7,525	4,141	7,525	4,218
8	8,779	8,305	8,779	6,998	8,779	18,214
9	10,033	4,784	10,033	14,666	10,284	5,105
10	11,287	19,845	11,287	5,368	11,789	6,158
11	12,541	5,586	12,541	5,724	13,294	5,523
12	13,795	5,411	13,795	5,696	14,798	5,372
13	15,049	5,411	15,049	5,354	16,303	5,371
14	16,303	5,411	16,303	5,353	18,109	5,373
15	17,808	5,411	17,808	5,353	20,277	5,372

PŘÍLOHA P IX: TŘECÍ SÍLA (PRŮMĚR TYČE 25MM)

koeficient tření []	0		0,2		0,4	
n	Poloha [mm]	Třecí síla [N]	Poloha [mm]	Třecí síla [N]	Poloha [mm]	Třecí síla [N]
1	0	0	0	0	0	0
2	1,505	0	0,997	0,001	1,505	0,003
3	3,010	0	1,999	0,031	3,010	0,087
4	4,515	0	2,992	0,037	4,515	0,286
5	6,017	0	3,996	0,168	6,017	0,397
6	7,522	0	4,995	0,148	7,522	0,460
7	9,027	0	5,996	0,199	9,027	0,477
8	10,532	0	6,992	0,209	10,532	0,723
9	12,037	0	7,995	0,308	12,037	0,807
10	13,542	0	8,999	0,249	13,542	0,866
11	15,047	0	9,999	0,418	15,047	0,586
12	15,802	0	10,995	0,376	16,552	0,588
13	16,554	0	11,993	0,548	18,059	0,682
14	17,307	0	12,996	0,477	19,564	1,343
15	18,057	0	13,994	0,528	21,067	0,487
16	18,962	0	14,990	0,586	22,875	0,523
17	19,865	0	15,993	0,540	25,042	0,501
18	20,768	0	16,998	0,562	27,643	0,504
19	21,852	0	17,992	0,536	29,225	0,507
koeficient tření []	0,6		0,8		1	
n	Poloha [mm]	Třecí síla [N]	Poloha [mm]	Třecí síla [N]	Poloha [mm]	Třecí síla [N]
1	0	0	0	0	0	0
2	1,505	0,004	1,505	0,005	1,505	0,007
3	3,010	0,131	3,010	0,174	3,010	0,218
4	4,515	0,428	4,515	0,570	4,515	0,809
5	6,017	0,596	6,017	0,795	6,017	1,104
6	7,522	0,683	7,522	0,903	7,522	1,082
7	9,027	0,705	9,027	0,940	9,027	1,335
8	10,532	1,021	10,532	1,361	10,532	1,589
9	12,037	1,193	12,037	1,581	12,037	2,036
10	13,542	1,288	13,542	1,624	13,542	2,048
11	15,047	0,879	15,047	1,165	15,047	2,931
12	16,552	0,882	16,552	1,175	16,552	2,287
13	18,059	1,008	18,059	1,330	18,059	1,736
14	19,564	2,014	19,564	2,630	19,564	3,096
15	21,067	0,730	21,067	0,973	21,067	1,267
16	22,875	0,787	22,875	1,054	22,875	1,154

PŘÍLOHA P X: REAKČNÍ SÍLA (PRŮMĚR TYČE 25MM)

koeficient tření []	0		0,2		0,4	
n	Poloha [mm]	Reakční síla [N]	Poloha [mm]	Reakční síla [N]	Poloha [mm]	Reakční síla [N]
1	0	0	0	0	0	0
2	1,505	0,504	0,997	0,132	1,505	0,508
3	3,010	5,235	1,999	6,140	3,010	7,212
4	4,515	17,461	2,992	13,999	4,515	17,503
5	6,017	34,931	3,996	33,401	6,017	34,967
6	7,522	77,994	4,995	69,824	7,522	76,209
7	9,027	70,667	5,996	60,406	9,027	66,153
8	10,532	64,322	6,992	52,035	10,532	61,764
9	12,037	78,872	7,995	70,839	12,037	83,409
10	13,542	71,373	8,999	56,656	13,542	68,364
11	15,047	102,172	9,999	60,607	15,047	68,842
12	15,802	57,798	10,995	76,185	16,552	74,238
13	16,554	74,409	11,993	26,609	18,059	97,429
14	17,307	71,823	12,996	26,339	19,564	25,071
15	18,057	96,016	13,994	25,998	21,067	25,756
16	18,962	28,411	14,990	25,993	22,875	25,335
17	19,865	33,282	15,993	26,301	25,042	24,972
18	20,768	33,728	16,998	25,721	27,643	25,107
19	21,852	34,329	17,992	26,061	29,225	24,951
koeficient tření []	0,6		0,8		1	
n	Poloha [mm]	Reakční síla [N]	Poloha [mm]	Reakční síla [N]	Poloha [mm]	Reakční síla [N]
1	0	0	0	0	0	0
2	1,505	0,510	1,505	0,511	1,505	0,513
3	3,010	7,225	3,010	7,248	3,010	5,170
4	4,515	17,524	4,515	17,545	4,515	20,785
5	6,017	34,987	6,017	34,990	6,017	77,270
6	7,522	75,774	7,522	75,023	7,522	69,593
7	9,027	66,169	9,027	66,191	9,027	65,272
8	10,532	62,114	10,532	62,003	10,532	63,538
9	12,037	83,215	12,037	81,576	12,037	78,081
10	13,542	68,300	13,542	63,468	13,542	69,449
11	15,047	68,863	15,047	67,965	15,047	108,054
12	16,552	74,245	16,552	74,279	16,552	72,063
13	18,059	91,307	18,059	88,496	18,059	95,193
14	19,564	25,054	19,564	25,187	19,564	27,991
15	21,067	26,254	21,067	26,762	21,067	28,792
16	22,875	25,435	22,875	25,661	22,875	28,108

PŘÍLOHA P XI: KONTAKTNÍ NORMÁLOVÁ SÍLA (PRŮMĚR TYČE 25MM)

koeficient tření []	0		0,2		0,4	
n	Poloha [mm]	Kontaktní normálová síla [N]	Poloha [mm]	Kontaktní normálová síla [N]	Poloha [mm]	Kontaktní normálová síla [N]
1	0	0	0	0	0	0
2	1,505	0,506	0,997	1,574	1,505	0,508
3	3,010	10,987	1,999	9,526	3,010	10,996
4	4,515	54,767	2,992	44,650	4,515	54,711
5	6,017	40,102	3,996	49,608	6,017	40,059
6	7,522	97,036	4,995	26,523	7,522	96,972
7	9,027	81,432	5,996	72,405	9,027	77,754
8	10,532	102,710	6,992	60,476	10,532	102,772
9	12,037	103,845	7,995	79,878	12,037	119,357
10	13,542	114,234	8,999	84,367	13,542	95,545
11	15,047	182,714	9,999	126,933	15,047	88,846
12	15,802	73,348	10,995	115,356	16,552	83,247
13	16,554	95,654	11,993	94,911	18,059	109,515
14	17,307	54,273	12,996	144,954	19,564	55,493
15	18,057	103,330	13,994	166,710	21,067	55,493
16	18,962	49,126	14,990	87,065	22,875	55,469
17	19,865	49,134	15,993	100,402	25,042	55,459
18	20,768	49,158	16,998	78,541	27,643	55,469
19	21,852	49,133	17,992	48,644	29,225	55,460
koeficient tření []	0		0,2		0,4	
n	Poloha [mm]	Kontaktní normálová síla [N]	Poloha [mm]	Kontaktní normálová síla [N]	Poloha [mm]	Kontaktní normálová síla [N]
1	0	0	0	0	0	0
2	1,505	0,510	1,505	0,511	1,505	0,512
3	3,010	11,023	3,010	11,049	3,010	11,020
4	4,515	54,684	4,515	54,656	4,515	59,823
5	6,017	40,037	6,017	40,003	6,017	56,156
6	7,522	96,937	7,522	96,908	7,522	73,083
7	9,027	74,559	9,027	71,085	9,027	88,909
8	10,532	103,170	10,532	103,599	10,532	102,965
9	12,037	119,330	12,037	119,495	12,037	106,672
10	13,542	95,439	13,542	94,385	13,542	104,733
11	15,047	88,703	15,047	88,624	15,047	170,153
12	16,552	83,200	16,552	83,126	16,552	81,477
13	18,059	109,358	18,059	109,234	18,059	109,094
14	19,564	55,535	19,564	55,539	19,564	48,663
15	21,067	55,535	21,067	55,538	21,067	48,893
16	22,875	55,491	22,875	55,476	22,875	48,912

PŘÍLOHA P XII: NAPĚTÍ VON MISES (PRŮMĚR TYČE 25MM)

koeficient tření []	0		0,2		0,4	
n	Poloha [mm]	Napětí Von Mises [MPa]	Poloha [mm]	Napětí Von Mises [MPa]	Poloha [mm]	Napětí Von Mises [MPa]
1	0	0	0	0	0	0
2	1,505	0,123	0,997	0,144	1,505	0,123
3	3,010	1,170	1,999	0,871	3,010	1,168
4	4,515	3,064	2,992	1,269	4,515	3,065
5	6,017	3,586	3,996	3,237	6,017	3,586
6	7,522	4,473	4,995	3,525	7,522	4,564
7	9,027	4,908	5,996	3,559	9,027	4,913
8	10,532	5,346	6,992	4,836	10,532	5,282
9	12,037	5,848	7,995	4,503	12,037	5,769
10	13,542	7,004	8,999	5,386	13,542	7,047
11	15,047	7,721	9,999	5,233	15,047	7,844
12	15,802	8,177	10,995	5,976	16,552	8,441
13	16,554	8,455	11,993	6,043	18,059	9,254
14	17,307	8,312	12,996	6,382	19,564	8,376
15	18,057	8,786	13,994	8,262	21,067	8,376
16	18,962	8,362	14,990	8,913	22,875	8,371
17	19,865	8,358	15,993	8,484	25,042	8,371
18	20,768	8,358	16,998	8,785	27,643	8,371
19	21,852	8,358	17,992	8,248	29,225	8,371
koeficient tření []	0,6		0,8		1	
n	Poloha [mm]	Napětí Von Mises [MPa]	Poloha [mm]	Napětí Von Mises [MPa]	Poloha [mm]	Napětí Von Mises [MPa]
1	0	0	0	0	0	0
2	1,505	0,123	1,505	0,123	1,505	0,123
3	3,010	1,168	3,010	1,167	3,010	1,166
4	4,515	3,065	4,515	3,066	4,515	3,454
5	6,017	3,586	6,017	3,587	6,017	5,592
6	7,522	4,602	7,522	4,638	7,522	4,821
7	9,027	4,916	9,027	4,911	9,027	5,157
8	10,532	5,270	10,532	5,295	10,532	5,380
9	12,037	5,769	12,037	5,771	12,037	5,919
10	13,542	7,045	13,542	6,924	13,542	7,034
11	15,047	7,842	15,047	7,850	15,047	8,420
12	16,552	8,440	16,552	8,440	16,552	8,434
13	18,059	9,306	18,059	9,333	18,059	9,317
14	19,564	8,381	19,564	8,393	19,564	8,370
15	21,067	8,381	21,067	8,392	21,067	8,358
16	22,875	8,372	22,875	8,381	22,875	8,357

PŘÍLOHA P XIII: TŘECÍ SÍLA (PRŮMĚR TYČE 30MM)

koeficient tření []	0		0,2		0,4	
n	Poloha [mm]	Třecí síla [N]	Poloha [mm]	Třecí síla [N]	Poloha [mm]	Třecí síla [N]
1	0	0	0	0	0	0
2	2,240	0	2,240	0,062	1,875	0,461
3	4,479	0	4,479	0,417	3,750	1,233
4	6,719	0	6,719	0,619	5,625	1,460
5	8,958	0	8,958	0,675	7,500	1,866
6	11,198	0	10,078	0,941	9,375	1,773
7	13,437	0	11,198	1,159	11,250	3,595
8	14,557	0	12,317	1,214	13,125	3,467
9	15,677	0	13,437	1,189	15,000	2,455
10	16,796	0	14,557	2,235	16,875	3,495
11	17,916	0	15,677	1,611	18,750	3,079
12	19,036	0	16,796	1,497	20,625	3,939
13	20,379	0	17,916	1,639	22,500	1,897
14	21,723	0	19,036	1,499	24,375	1,392
15	23,067	0	20,379	2,267	26,250	1,436
16	24,410	0	21,723	0,903	28,125	1,412
17	26,023	0	23,067	1,693	30,000	1,426
18	27,958	0	24,410	0,796	31,875	1,418
koeficient tření []	0,6		0,8		1	
n	Poloha [mm]	Třecí síla [N]	Poloha [mm]	Třecí síla [N]	Poloha [mm]	Třecí síla [N]
1	0	0	0	0	0	0
2	2,240	0,185	2,240	0,247	0,309	0,309
3	4,479	1,217	4,479	1,621	2,004	2,004
4	6,719	1,722	6,719	2,291	2,561	2,561
5	8,958	3,297	8,958	3,869	5,431	5,431
6	11,198	3,423	11,198	4,317	4,992	4,992
7	13,437	3,106	13,437	5,172	5,106	5,106
8	15,677	3,033	15,677	4,593	6,461	6,461
9	17,916	2,733	17,916	4,354	5,308	5,308
10	20,156	4,241	20,156	6,318	7,438	7,438
11	22,843	7,833	22,843	10,775	8,072	8,072
12	25,530	2,493	25,530	3,655	11,609	11,609
13	28,755	2,647	28,755	3,479	8,057	8,057
14	32,625	2,558	32,625	3,457	4,432	4,432
15	37,268	2,574	37,268	3,458	4,189	4,189
16	42,842	2,560	42,842	3,457	4,104	4,104

PŘÍLOHA P XIV: REAKČNÍ SÍLA (PRŮMĚR TYČE 30MM)

koeficient tření []	0		0,2		0,4	
n	Poloha [mm]	Reakční síla [N]	Poloha [mm]	Reakční síla [N]	Poloha [mm]	Reakční síla [N]
1	0	0	0	0	0	0
2	2,240	13,902	2,240	13,806	1,875	29,284
3	4,479	32,557	4,479	32,208	3,750	58,986
4	6,719	68,724	6,719	51,949	5,625	34,108
5	8,958	82,451	8,958	67,041	7,500	48,026
6	11,198	57,217	10,078	80,731	9,375	67,752
7	13,437	105,026	11,198	58,324	11,250	208,168
8	14,557	70,140	12,317	139,624	13,125	107,030
9	15,677	152,688	13,437	117,687	15,000	143,384
10	16,796	141,453	14,557	135,886	16,875	126,986
11	17,916	111,403	15,677	162,882	18,750	170,932
12	19,036	217,420	16,796	135,028	20,625	46,580
13	20,379	75,759	17,916	105,411	22,500	39,092
14	21,723	83,129	19,036	307,640	24,375	38,664
15	23,067	42,766	20,379	75,400	26,250	38,317
16	24,410	38,325	21,723	82,640	28,125	38,217
17	26,023	37,944	23,067	29,941	30,000	38,254
18	27,958	38,534	24,410	30,172	31,875	38,230
koeficient tření []	0,6		0,8		1	
n	Poloha [mm]	Reakční síla [N]	Poloha [mm]	Reakční síla [N]	Poloha [mm]	Reakční síla [N]
1	0	0	0	0	0	0
2	2,240	3,803	2,240	3,791	2,240	3,781
3	4,479	32,296	4,479	32,297	4,479	32,584
4	6,719	72,964	6,719	73,004	6,719	74,097
5	8,958	121,707	8,958	105,920	8,958	109,312
6	11,198	66,449	11,198	159,095	11,198	68,113
7	13,437	120,322	13,437	156,418	13,437	110,793
8	15,677	153,062	15,677	157,322	15,677	159,220
9	17,916	124,275	17,916	120,353	17,916	119,836
10	20,156	291,822	20,156	294,925	20,156	290,407
11	22,843	41,882	22,843	43,663	20,828	343,583
12	25,530	47,158	25,530	43,435	21,499	81,830
13	28,755	41,855	28,755	42,920	22,171	50,951
14	32,625	41,298	32,625	42,795	22,977	39,704
15	37,268	41,402	37,268	42,757	23,783	70,046
16	42,842	41,423	42,842	42,756	24,751	63,432

**PŘÍLOHA P XV: KONTAKTNÍ NORMÁLOVÉ NAPĚTÍ (PRŮMĚR
TYČE 30MM)**

koeficient tření []	0		0,2		0,4	
n	Poloha [mm]	Kontaktní normálová síla [N]	Poloha [mm]	Kontaktní normálová síla [N]	Poloha [mm]	Kontaktní normálová síla [N]
1	0	0	0	0	0	0
2	2,240	6,662	2,240	6,637	1,875	17,024
3	4,479	50,456	4,479	51,021	3,750	28,483
4	6,719	81,939	6,719	64,027	5,625	95,374
5	8,958	124,021	8,958	94,019	7,500	70,399
6	11,198	97,726	10,078	132,159	9,375	113,005
7	13,437	146,222	11,198	107,147	11,250	106,686
8	14,557	208,337	12,317	154,814	13,125	218,319
9	15,677	181,334	13,437	157,289	15,000	161,383
10	16,796	319,582	14,557	156,049	16,875	180,616
11	17,916	363,035	15,677	192,022	18,750	206,414
12	19,036	114,650	16,796	166,190	20,625	195,043
13	20,379	115,637	17,916	163,232	22,500	87,219
14	21,723	66,722	19,036	277,846	24,375	77,208
15	23,067	115,687	20,379	121,674	26,250	77,186
16	24,410	70,103	21,723	112,222	28,125	77,478
17	26,023	69,011	23,067	87,150	30,000	77,601
18	27,958	68,639	24,410	87,823	31,875	77,644
koeficient tření []	0,6		0,8		1	
n	Poloha [mm]	Kontaktní normálová síla [N]	Poloha [mm]	Kontaktní normálová síla [N]	Poloha [mm]	Kontaktní normálová síla [N]
1	0	0	0	0	0	0
2	2,240	6,661	2,240	6,661	2,240	6,662
3	4,479	50,767	4,479	50,792	4,479	50,456
4	6,719	88,433	6,719	88,559	6,719	81,939
5	8,958	132,606	8,958	132,871	8,958	124,021
6	11,198	106,603	11,198	194,402	11,198	97,726
7	13,437	142,025	13,437	211,048	13,437	146,222
8	15,677	184,730	15,677	197,152	15,677	208,337
9	17,916	161,363	17,916	195,138	17,916	181,334
10	20,156	295,675	20,156	311,560	20,156	319,582
11	22,843	100,302	22,843	103,065	20,828	363,035
12	25,530	100,324	25,530	104,758	21,499	114,650
13	28,755	101,875	28,755	105,661	22,171	115,637
14	32,625	102,011	32,625	105,664	22,977	66,722
15	37,268	102,171	37,268	105,671	23,783	115,687
16	42,842	102,021	42,842	105,676	24,751	107,103

PŘÍLOHA P XVI: NAPĚTÍ VON MISES (PRŮMĚR TYČE 30MM)

koeficient tření []	0		0,2		0,4	
n	Poloha [mm]	Napětí Von Mises [MPa]	Poloha [mm]	Napětí Von Mises [MPa]	Poloha [mm]	Napětí Von Mises [MPa]
1	0	0	0	0	0	0
2	2,240	1,068	2,240	1,068	1,875	0,116
3	4,479	4,702	4,479	4,779	3,750	2,712
4	6,719	11,220	6,719	6,327	5,625	6,558
5	8,958	7,197	8,958	9,845	7,500	5,395
6	11,198	9,286	10,078	8,613	9,375	6,423
7	13,437	9,115	11,198	8,852	11,250	7,601
8	14,557	7,644	12,317	8,657	13,125	9,955
9	15,677	8,514	13,437	7,702	15,000	10,669
10	16,796	8,668	14,557	9,216	16,875	8,762
11	17,916	9,945	15,677	8,452	18,750	12,115
12	19,036	15,808	16,796	8,695	20,625	11,663
13	20,379	11,185	17,916	10,355	22,500	11,079
14	21,723	11,400	19,036	14,651	24,375	11,060
15	23,067	11,049	20,379	11,190	26,250	11,060
16	24,410	11,062	21,723	11,397	28,125	11,059
17	26,023	11,062	23,067	10,994	30,000	11,060
18	27,958	11,062	24,410	10,990	31,875	11,059
koeficient tření []	0,6		0,8		1	
n	Poloha [mm]	Napětí Von Mises [MPa]	Poloha [mm]	Napětí Von Mises [MPa]	Poloha [mm]	Napětí Von Mises [MPa]
1	0	0	0	0	0	0
2	2,240	1,082	2,240	1,082	2,240	1,082
3	4,479	4,837	4,479	4,860	4,479	4,781
4	6,719	8,842	6,719	8,879	6,719	8,822
5	8,958	6,698	8,958	9,792	8,958	6,663
6	11,198	7,581	11,198	11,922	11,198	7,565
7	13,437	9,676	13,437	9,967	13,437	8,055
8	15,677	9,091	15,677	9,175	15,677	9,184
9	17,916	9,260	17,916	9,041	17,916	8,948
10	20,156	16,150	20,156	21,424	20,156	17,025
11	22,843	11,132	22,843	11,166	20,828	23,308
12	25,530	11,132	25,530	11,117	21,499	11,344
13	28,755	11,098	28,755	11,123	22,171	11,166
14	32,625	11,097	32,625	11,123	22,977	10,896
15	37,268	11,096	37,268	11,123	23,783	10,857
16	42,842	11,097	42,842	11,123	24,751	10,940

PŘÍLOHA P XVII: VÝKRES POUZDRA

