

Návrh zkušebního zařízení pro určení materiálových charakteristik elastomerů

Bc. Tomáš Hájek

Diplomová práce
2005



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

ABSTRAKT

Tato práce byla vypracována na téma: Návrh zkušebního zařízení pro určení materiálových charakteristik elastomerů.

Cílem této práce bylo navrhnout zkušební metodu a zařízení pro testování dvojosého stavu napjatosti, zajistit výrobu zkušebního zařízení a vyhodnotit funkčnost zařízení, zda vyhovuje všem požadavkům. Dále navrhnout pneumatický obvod pro regulaci tlaku při měření a způsob vlastního měření.

Byly navrženy tři varianty zařízení, třetí návrh byl rozpracován do výrobních výkresů umožňujících jeho výrobu. Výroba byla zajištěna firmou Laski s.r.o. Smržice.

Metoda zkoušení spočívá v postupném plnění zkušebního vzorku vzduchem. Její průběh byl zaznamenán pomocí digitálního fotoaparátu. Výsledkem je sada obrázků na kterých je zachycena deformace vzorku a příslušný tlak. Ze získaných údajů se vypočítalo smluvní napětí.

Résumé

The topic of this dissertation was: The design of the laboratory equipment for measuring of nonlinear parameters of elastomers.

The aim of this piece of work was to design a testing method and laboratory equipment for the measuring of biaxial strain. The other task was to arrange for the manufacturing of the equipment, evaluate it whether it complies with the given requirements and to design a pneumatic circuit for pressure regulation during the measuring process itself.

Three variants were proposed in the course of the preparation phase, from which one has been developed further into the stage with all necessary drawings required for the production. The manufacturing was carried out by Laski Ltd., Smržice.

The testing method consisted of a gradual inflating of the test sample with air. The course of the action was videotaped on a digital camera. The outcome was a set of pictures with the stage of deformation and the particular pressure at the moment clearly visible. The contractual strain was then calculated from the extracted data.

Poděkování

Velmi rád bych poděkoval všem, kteří přispěli ke vzniku této diplomové práce. Zvláště vedoucímu diplomové práce Ing. Jakubovi Javoříkovi, Ph.D. za odpovědné vedení, za poskytnuté cenné rady a připomínky věnované mé diplomové práci.

Dále bych chtěl poděkovat firmě Laski s.r.o. Smržice za technickou asistenci a pomoc při výrobě zkušebního zařízení.

Prohlašuji, že jsem na celé diplomové práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval.

Ve Zlíně, 23. 05. 2005

.....

jméno diplomanta

OBSAH

ÚVOD	7
I. TEORETICKÁ ČÁST	8
1 ELASTOMERY	9
1.1 PŘÍRODNÍ KAUČUK.....	9
1.1.1 Chemické reakce přírodního kaučuku.....	9
1.1.2 Fyzikální vlastnosti přírodního kaučuku.....	11
1.2 SYNTETICKÉ KAUČUKY	11
2 VLASTNOSTI PRYŽE.....	13
2.1 PRYŽ	13
2.2 HLAVNÍ RYSY KAUČUKOVÉ ELASTICITY	13
2.3 ELASTICITA IDEÁLNÍ.....	13
2.4 KAUČUKOVÁ ELASTICITA	14
3 VÝPOČTOVÉ MODELOVÁNÍ DEFORMAČNĚ NAPĚŤOVÉHO CHOVÁNÍ ELASTOMERŮ.....	15
3.1 MODEL NEO- HOOKEAN.....	19
3.2 MODEL MOONEY	19
3.3 MODEL OGDEN	20
3.4 MODEL ARRTUDA & BOYCE.....	20
3.5 MODEL GENT:.....	22
3.6 OBECNÝ POLYNOMICKÝ MODEL	22
4 METODY TESTOVÁNÍ MATERIÁLU.....	25
4.1 TEORIE MECHANICKÝCH ZKOUŠEK	25
4.2 ZKOUŠKA JEDNOOSÉHO TAHU.....	26
4.3 ZKOUŠKA JEDNOOSÉHO TLAKU.....	27
4.4 ZKOUŠKA DVOUOSÉHO NAPĚTÍ	27
4.5 ZKOUŠKA ČISTÉHO ROVINNÉHO SMYKU	29
4.6 ZKOUŠKA OBJEMOVÉ STLAČITELNOSTI.....	30
5 MĚŘENÍ TLAKU	32
5.1 ZÁKLADNÍ POJMY	32
6 FIRMA LASKI	34
II. PRAKTICKÁ ČÁST.....	35
7 STANOVENÍ CÍLŮ DIPLOMOVÉ PRÁCE.....	36
8 NÁVRH ZKUŠEBNÍ METODY	37
9 NÁVRH ZKUŠEBNÍHO ZAŘÍZENÍ.....	41

9.1	NÁVRH ZKUŠEBNÍHO ZAŘÍZENÍ – Č. 1.....	41
9.2	NÁVRH ZKUŠEBNÍHO ZAŘÍZENÍ – Č. 2.....	42
9.3	NÁVRH ZKUŠEBNÍHO ZAŘÍZENÍ – Č.3.....	43
9.4	PEVNOSTNÍ VÝPOČET	43
9.4.1	Šroub.....	43
9.4.2	Maximální hodnota radiálního a tečného napětí upínací desky.....	44
9.4.3	Maximální průhyb upínací desky	46
10	VÝROBA ZKUŠEBNÍHO ZAŘÍZENÍ	48
10.1	ZKUŠEBNÍ ZAŘÍZENÍ	48
10.1.1	Tlaková nádoba	48
10.1.2	Víko	49
10.1.3	Upínací kroužky	50
10.1.4	Rozpěrka	50
10.2	TECHNOLOGICKÝ POSTUP VÝROBY	52
11	PNEUMATICKÝ OBVOD.....	53
12	REALIZACE MĚŘÍČÍHO ZAŘÍZENÍ	56
13	OVĚŘOVÁNÍ FUNKČNOSTI ZAŘÍZENÍ	58
13.1	PŘÍPRAVA VZORKU	58
13.2	POPIS MĚŘENÍ	59
13.3	EXPERIMENT.....	59
13.4	VÝSLEDEK MĚŘENÍ	61
14	DISKUSE	64
14.1	NÁVRH ZKUŠEBNÍ METODY	64
14.2	NÁVRH ZKUŠEBNÍHO ZAŘÍZENÍ.....	64
14.3	REALIZACE MĚŘÍČÍHO ZAŘÍZENÍ	64
	ZÁVĚR.....	64
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	67
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	69
	SEZNAM OBRÁZKŮ.....	71
	SEZNAM TABULEK	73
	SEZNAM PŘÍLOH.....	74

ÚVOD

Vulkanizovaná kaučuková směs – pryž – patří k důležitým konstrukčním materiálům. Zvláště její elastické vlastnosti, jichž zatím jiný materiál nedosáhl, způsobily její nepostradatelnost a oblibu v technické praxi.

Stanovení fyzikálně mechanických vlastností elastomerů má proto v gumárenské technologii důležité místo. V metalurgii jsou určité fyzikálně mechanické vlastnosti jednoznačně dány druhem materiálu, avšak v gumárenském průmyslu tomu tak vždy není. Je zde nutno věnovat pozornost každé partii výrobků a nepřetržitě kontrolovat jakost pryže vycházející z výroby.

Technická pryž jako amorfnní nesíťovaný polymer nad bodem skelného přechodu je hlavním zástupcem ve skupině materiálů, které jsou obecně označovány jako elastomery. Elastomery vykazují v důsledku své specifické vnitřní struktury, která je kvalitativně odlišná od struktury běžně používaných konstrukčních materiálů, zcela unikátní mechanické vlastnosti. Pro elastomery je charakteristický zvláště široký rozsah elastické deformace, malá tuhost a schopnost tlumit rázy. Tyto vlastnosti je předurčují pro využití v řadě průmyslových aplikací (výroba pneumatik, těsnění, tlumičů vibrací, a jiné).

Snaha o zvyšování spolehlivosti technických objektů vede k potřebě určování jejich napjatosti, deformaci, popřípadě hodnocení mezních stavů již v etapě jejich návrhu. K řešení těchto problémů se v dnešní době s úspěchem v průmyslu i vědě běžně využívá výpočtového modelování a tento trend se nevyhnul ani oblasti elastomerů. Přestože výpočtové modelování napjatosti a deformace elastomerů je poměrně náročné na experimentální i výpočtové vybavení, jsou v současné době k dispozici přístupy umožňující určování napjatosti a deformace obecných elastomerových těles i průmyslových aplikací, jde především o teorii hyperelasticity.

Tato diplomová práce se zabývá návrhem zařízení pro určení materiálových charakteristik elastomerů nezbytných pro výpočtové nástroje.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 ELASTOMERY

Elastomery (kaučuky) jsou makromolekulární látky schopné přecházet vulkanizací za stavu převážně plastického do stavu převážně elastického. [4]

1.1 Přírodní kaučuk

Přírodní kaučuk je nejdůležitější z přírodních makromolekulárních látek jak svým významem, tak i množstvím, které se každoročně získává a zpracovává. Syntetické kaučuky již sice produkcí i spotřebou přírodní kaučuk předstihly, nikdy jej však zcela ze světového trhu nevytlačí. Některé pryžové výrobky mají totiž požadovanou kvalitu jen tehdy, jsou-li vyrobeny z přírodního kaučuku. Mimoto je výroba syntetických kaučuků odkázána převážně na ropu a její produkce a hlavně cena nedovolí jejich neomezenou výrobu.

Kaučuk byl zřejmě znám středoamerickým indiánům již v 11. až 13. století. S primitivními kaučukovými výrobky se setkal u domorodců i Kolumbus.

Výrobky zhotovovali domorodci z bílé šťávy, která vytékala z některých stromů při poranění kůry. Přesnější zprávy o kaučukovnicích a kaučuku přinesli do Evropy Francouzi Condamine a Fresnau v polovině 18. století.

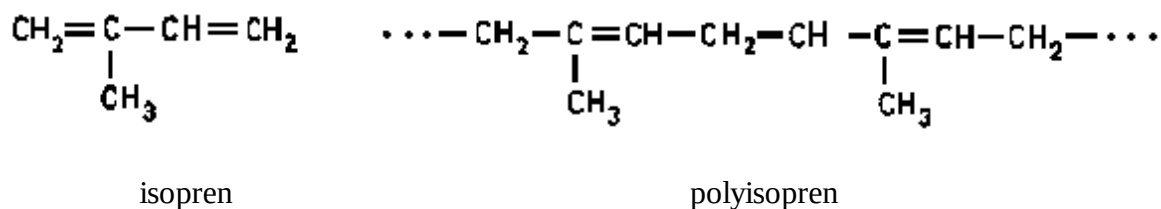
Nejznámějším kaučukovníkem pro produkci přírodního kaučuku je kaučukovník brazilský – *Hevea brasiliensis*. Vedle hevey brazilské jsou známy další kaučukovníky.

Například smokvoň pružnokolejná, perčovník pravý atd.. [1]

1.1.1 Chemické reakce přírodního kaučuku

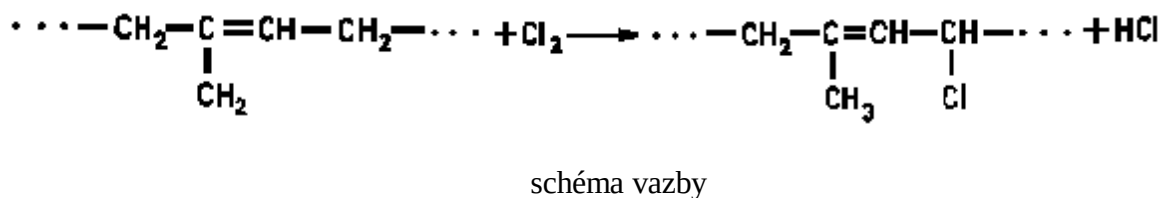
Základní stavební jednotkou makromolekul přírodního kaučuku je uhlovodík isopren,

2 – methyl-1,3 butadien, který patří mezi terpeny. Jeho sumární verze je C_5H_8 . Má v molekule dvě dvojné vazby a v přírodě z něho vzniká samovolnou polymerací polyisopren, přírodní kaučuk.



Přírodní kaučuk je tedy nenasycený polymer, z každé původní molekuly isoprenu zůstane v makromolekule jedna dvojná vazba. Nenasycenost je příčinou chemických reakcí přírodního kaučuku.

Přírodní kaučuk reaguje se všemi halogeny, praktický význam má jeho reakce s chlorem. Plynný chlor se zavádí do roztoku kaučuku v benzínu při teplotě asi 100 °C. V první fázi jsou nahrazovány chlorem některé vodíkové atomy, ve druhé se chlor váže na dvojné vazby. Na kaučuk se může vázat 62 až 65 hmotnostních % chloru.



Po oddestilování rozpouštědla zůstane práškový, bílý nebo nažloutlý chlorkaučuk. Jeho roztok se používá jako nátěrová hmota pro ochranu proti korozi a chlorkaučukový film je také spojovací vrstvou při spojování pryže s kovem. [1]

1.1.2 Fyzikální vlastnosti přírodního kaučuku

Přírodní kaučuk je elastomer a je schopen značných deformací. Vulkanizací tuto schopnost ztrácí, měkká pryž je méně deformovatelná a tvrdá se prakticky nemůže deformovat vůbec. Při tahové deformaci nastává u přírodního kaučuku krystalizace.

Při zpracovávání kaučukových směsí válcováním nebo vytlačováním se makromolekuly orientují ve směru zpracování. V tomto směru má potom materiál velkou pevnost a malou tažnost, kolmo na tento směr má menší pevnost a větší tažnost. Uvedený jev se nazývá válcovací účinek. Pro vlastnosti hotového výrobku je nepříznivý, a proto se například při míchání a ohřívání směsí musí materiál prořezávat, překládat a křížit a válce musí mít stejnou teplotu. [1]

1.2 Syntetické kaučuky

Nejdůležitější druhy v současné době používaných syntetických kaučuků s jejich charakteristickými vlastnostmi a příklady použití jsou v Tab. I. [4]

Tabulka I. Eleastomery

Název, složení (obchodní název)	Zkratka	Pevnost v tahu ¹⁾ (Mpa) / tažnost (%)	Použitelnost do teploty (°C)	Hořlavost 1 až 6	Zpracování ²⁾	Vlastnosti Příklad použití
Butadienstyren ový -Kopolymer Butadien-styren (Krallex)	S/B	25 / 450	100	2	L Vs Vy	Odolnost proti stárnutí, neodolává nízkým teplotám, malá konfekční lepidlost. Těsnění, manžety, kroužky O, pneumatiky, doprav. Pásky.
Butadienakrylo nitrilový -Kopolymer Butadien- akrylonitril (Polysar krynak)	NBR	25 / 450	130	3	L Vs Vy	Bezbarvý nebo žlutý, velká odolnost proti otěru, oleji, tepelnému stárnutí. Těsnící kroužky, hadice, těsnění Gufero, pružné podložky strojů, benzínové hadice.
Chloroprenový -polychloropren (Neoprene)	CR	24 / 450	130	5	L Vs Vy	Částečně odolný proti olejům, elektricky vodivý, samozhášivý, odolný proti stárnutí. Popřezovaný textil, spotřební zboží, lepidla, impregnace
Butylkaučuk -kopolymer izobutylene- izopren (Polysar butyl)	IIR	21 / 600	150	2	Vs Vy	Ochrana proti povětrnostním vlivům, nepropustnost pro plyny, dobrá korozivzdornost. Smě si pro duše pneumatik, obklady kovových van, povlaky na ocelové součásti
Silikonový - polydimethylsilox an, polymethylvinylf enylsiloxan (Lukopren)	SI	8 / 250	180 trvale 250 krátkodobě	3	O L Vs Vy	Vysoká izolační schopnost, odolnost proti stárnutí teplem, světlem, ozonem, UF záření, páře, olejům, fyziologicky inertní, elektroizolační vlastnosti. Pro chirurgické účely, izolace vodičů, teplovzdušná těsnění.
Etylénpropylen ový -terpolymer etylén + propylén + nekonjugovaný dien	EPM EPDM	25 až 28 / 500	120-150	2	L Vs Vy	Odolný proti korozním kapalinám, kyselinám, velmi odolný proti ozónu. Těsnění, hadice, kabely, izolační fólie.

¹⁾ Při optimálním ztužení²⁾ L – lisování, Vs – vstřikování, Vy – Vytlačování, O – odlévání

2 VLASTNOSTI PRYŽE

2.1 Pryž

Je to z vulkanizované směs kaučuku a přísad. Surový kaučuk se při zpracování přivede hnětením do plastického stavu, přidají se potřebné přísady, zpracovaná kaučuková směs se formuje do požadovaných tvarů a působením zvýšené teploty s vulkanizačním činidlem se vulkanizuje. [4]

Vlastnosti vulkanizovaných kaučuků jsou do značné míry určeny vlastnostmi polymerů, z nichž jsou vyrobeny. Vlastnosti polymerů záleží na chemické konstituci a geometrické stavbě polymerních řetězců, tedy na tom, z jakých atomů jsou makromolekuly složeny, v jakém pořadí jsou atomy seřazeny a jaký charakter mají vazby, jimiž jsou spojeny. Na těchto vlastnostech závisí jednak chemická reaktivita polymeru, jednak důležité fyzikální vlastnosti makromolekul, jako jejich ohebnost, tvar, geometrická pravidelnost a velikost mezimolekulárních soudržných sil. Velmi důležitým strukturním faktorem je délka makromolekulárních řetězců. [2]

2.2 Hlavní rysy kaučukové elasticity

Elastická tělesa se účinkem vnější síly deformují – mění svůj tvar nebo objem nebo obojí součastně, přestane-li vnější síla působit, vrací se elastické těleso do svého původního tvaru (objemu). Elasticita je tedy schopnost látek deformovat se vratně. Vnějšími projevy a molekulárním mechanismem odlišují se od sebe elasticita ideální a elasticita kaučuková. [2]

2.3 Elasticita ideální

Ideálně elastické deformační chování je charakterizováno vratnými, časově nezávislými, malými deformacemi, platností Hookova zákona a vysokou hodnotou modulu s malou teplotní závislostí. Objevuje se u látek s krystalickou strukturou. V krystalické mřížce jsou uloženy částice hmoty (molekuly, atomy, ionty), které jsou vzájemně poutány velkými silami. Při působení vnější síly se tyto částice jen nepatrně vychylují ze svých rovnovážných

poloh a po oddálení síly se velmi rychle, prakticky okamžitě do těchto poloh vracejí. Platí jen pro malé deformace. [2]

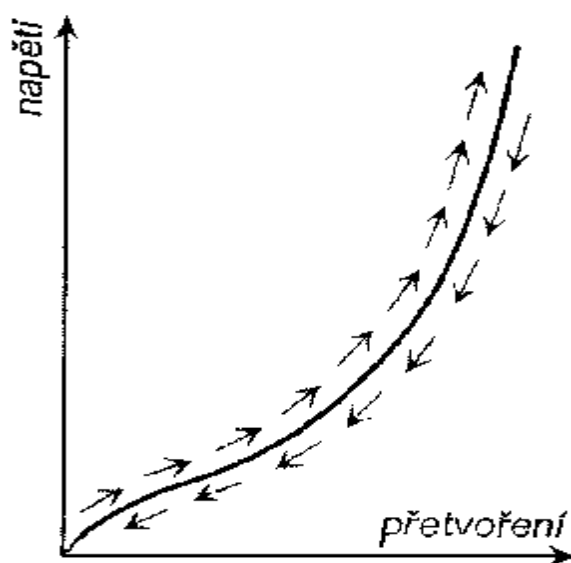
2.4 Kaučuková elasticita

Elasticita pryže se odlišuje od ideální elasticity kovů a krystalů v těchto nejvýznačnějších rysech:

1. Dosažitelné deformace jsou veliké, mnohonásobně vyšší než u ideálně elastických látek. Tažnost (protažení při přetržení) dosahuje několika set procent původní délky.
2. Závislost napětí na deformaci je lineární jen v oblasti malých deformací. Hookův zákon platí při smykové deformaci přibližně, při protahování jen v oblasti prvních několika procent. Tvar závislosti napětí na protažení má zpravidla charakteristický esovitý průběh (viz. obr. 1.)
3. Pryž se deformuje již účinkem malých sil. Poměr napětí a deformace v oblasti malých deformací (modul pružnosti) je asi desettisíckrát menší než u ideálně elastických látek.
4. Deformace pryže je časově závislá. Elastické deformační přeměny tu probíhají s určitým zpožděním, protože jsou bržděny vnitřními viskózními odpory uvnitř kaučukové hmoty. Deformační chování pryže má obecně elastické i viskózní projevy současně. Takové chování se označuje jako viskoelastické chování.
5. Objemová tuhost většiny elastomerů je obvykle o dva až tři řády větší než tuhost ve smyku. Objemový modul pružnosti dosahuje hodnot řádově stovek až tisíců MPa, čemuž (s uvažováním hodnoty E_0) odpovídá Poissonův poměr ν o hodnotě blízké 0,5 (v závislosti na obsahu plniv). Hodnota $\nu = 0,5$ přísluší objemově nestlačitelným materiálům. [5], [2]

3 VÝPOČTOVÉ MODELOVÁNÍ DEFORMAČNĚ NAPĚŤOVÉHO CHOVÁNÍ ELASTOMERŮ

V praxi používané výpočtové modely deformačně napěťového chování elastomerů jsou běžně formulovány na obecné úrovni prostřednictvím vztahu pro hustotu deformační energie W . Obecně taková formulace vede k nelineární napěťově deformační závislosti. V průběhu minulého století bylo postupně různými autory navrhováno velké množství různých konstitutivních modelů. Zpočátku se autoři zaměřovali na modely nezávislé na rychlosti a historii deformace (tzv. hyperelastické) – viz obr. 2. V posledních letech však bylo publikováno také poměrně velké množství prací zabývajících se modelováním neelastických efektů. Postupně se i tyto modely prosazují do komerčně nabízených výpočtových prostředků. [5]



Obr. 1 Typický průběh závislosti napětí a deformace u pryže

Poměr protažení (nebo jen protažení) je definován jako:

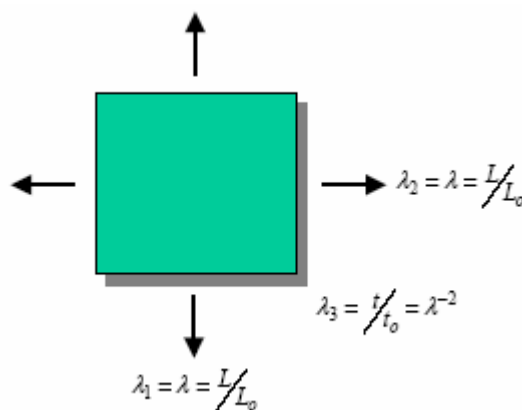
$$\lambda = \frac{L}{L_0} = \frac{L + \Delta u}{L_0} = 1 + \epsilon_E \quad (1)$$

Výše popsán je příklad poměru protažení tak, jak je definován pro jednoosé napětí kaučukového vzorku. Kde ε_E je poměrná deformace.

Jsou tři základní složky protažení λ_1 , λ_2 a λ_3 . Tyto budou použity při definování potenciálu deformační energie. [6]

Definice poměru protažení

Pro ilustraci definice základních složek protažení na příkladu si vezmeme tenkou kaučukovou desku v dvojosém napětí. Základní složky protažení λ_1 a λ_2 charakterizují rovinnou deformaci. Na druhou stranu λ_3 definuje proměnnu tloušťky t/t_0 . Dále, jestliže se předpokládá, že materiál je plně nestlačitelný, potom $\lambda_3 = \lambda^{-2}$.



Obr. 2 Základní složky protažení

Definice deformačních invariant

Tři deformační invarianty jsou obvykle používány k definování funkce hustoty deformační energie:

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

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

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

(2)

Jestliže je materiál úplně nestlačitelný $I_3=1$

- protože předpokládáme, že materiál je izotropní, některé formy potenciálu napětíové energie jsou vyjádřeny jako funkce těchto skalárních neproměnných. Jinými slovy, deformační invarianty jsou měřítka deformace, které jsou nezávislé na souřadném systému použitém k měření deformace. [6]

Definice objemového poměru

Objemový poměr je definován:

$$J = \lambda_1^2 \lambda_2^2 \lambda_3^2 = V/V_0 \quad (3)$$

Jak je výše zmíněno, J může být považováno za poměr deformovaného objemu k nedeformovanému objemu materiálu.

Definice potencionálu deformační energie.

Potenciál deformační energie je obvykle označován jako W .

Potenciál deformační energie může být buď přímá funkce poměru hlavních protažení nebo funkce deformačních invariant. [6]

$$W = W(I_1, I_2, I_3) \quad (4)$$

Nebo

$$W = W(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) \quad (5)$$

Dané formy potenciálu deformační energie budou zmíněny v kapitole 3.1 – 3.6 .

Druhý Piola-Kirchoffův napětíový tenzor je pak dán vztahem:

$$S_{ij} = dW/dE_{ij} \quad (6)$$

Některé konstitutivní modely jsou založeny na mikromechanických modelech vnitřní struktury elastomerů – na úrovni jednotlivých molekulárních řetězců (neo- Hookean, Wang&Guth, Arruda&Boyce, Wu&van der Giesen atd.), materiálové parametry vystupující v takových modelech mají jednoznačný fyzikální význam. Jiné modely byly navrženy pouze na základě pozorování deformačně napětíového chování elastomerů na mikroúrovni tak, aby výsledný model co nejlépe aproximoval toto pozorování. [6]

Takové modely (Money-Rivlin, Ogden, Yeoh, Polynomial, Gent, Lambert-Diani&Rey atd.) jsou označovány za fenomenologické a jejich materiálové parametry často konkrétní fyzikální význam postrádají. [6]

Dnes běžně užívané hyperelastické modely jsou v důsledku předpokladu o izotropii a nestlačitelnosti obecně formulovány ve tvaru:

$$W = W(I_1, I_2, I_3, \{M\}) \quad \text{nebo} \quad W = W(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \{M\}) \quad (7)$$

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

Jednotlivé typy hyperelastických modelů se vzájemně liší funkční závislostí W na I_i , resp. λ_i . Základní experimentální práce byly v minulosti proto zaměřeny právě na vyšetřování závislosti W a I_i . [6]

Níže je uveden stručný přehled nepoužívanějších hyperelastických modelů určených pro modelování odezvy tzv. nestlačitelných elastomerů:

3.1 Model Neo- Hookean

$$W = C_{10} (I_1 - 3) \quad (8)$$

Kde $C_{10} = nkt/2 = G/2$ je jediný materiálový parametr (n – počet polymerních řetězců v jednotkovém objemu, k – Boltzmanova konstanta, T – absolutní teplo, G – počáteční modul pružnosti ve smyku).

Model patří mezi nejjednodušší a nejstarší. Vychází z termodynamických principů a ze statistického přístupu k modelování vnitřní struktury elastomerů. K vyjádření konfigurační entropie makromolekulárního řetězce je využita tzv. Gaussovska statistická teorie, která však není schopna zohlednit omezenou „protažitelnost“ těchto řetězců. Proto model není schopen věrohodně postihnout závěrečnou vyztužovací fázi napětíově deformační odezvy elastomerů. Model vykazuje lineární chování při smykové deformaci. Běžně je dostatečně věrohodný v rozsahu do cca 40% přetvoření při jednoosém tahovém zatížení. [5]

3.2 Model Mooney

$$W = C_{10} (I_1 - 3) + C_{01} (I_2 - 3) \quad (9)$$

kde $W = C_{10}$ a C_{01} jsou materiálové parametry bez jednoznačného fyzikálního významu.

Model v původní podobě původně navrhl Mooney r. 1940. Model, stejně jako předchozí, vykazuje lineární chování při smykové deformaci a není schopen popsat závěrečnou vyztužovací fázi napěťově deformační odezvy. Model zohledňuje závislost hustoty energie napjatosti W na druhém invariantu I_2 , podstatnost této závislosti je však dosud diskutována a názor na ni není jednoznačný. Model je doporučován do cca 100% přetvoření při jednoosém tahovém zatížení. [5]

3.3 Model Ogden

$$W = \sum_{i=1}^N \frac{\mu_i}{\alpha_i} (\lambda_1^{\alpha_i} + \lambda_2^{\alpha_i} + \lambda_3^{\alpha_i} - 3) \quad (10)$$

kde α_i a μ_i jsou materiálové parametry bez konkrétního fyzikálního významu (μ_i mají však obecně význam počáteční tuhosti), N je volitelný parametr.

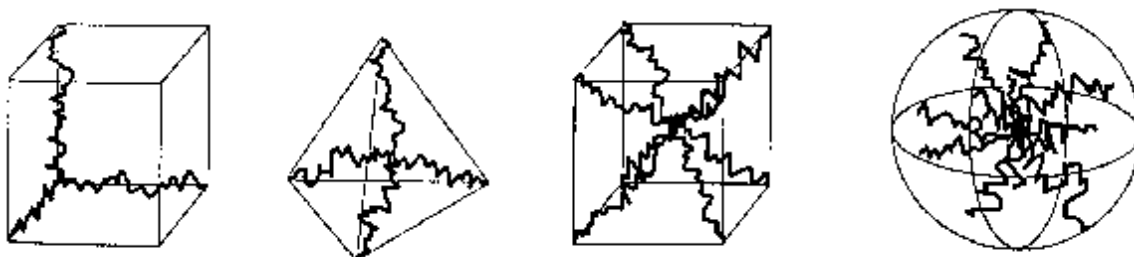
Model navrhl a verifikoval Ogden r. 1972. Tento model je dnes poměrně široce používán, věrohodně postihuje i závěrečnou vyztužovací fázi odezvy elastomerů. Běžně se uvádí, že model je použitelný až do 700% přetvoření při jednoosém tahovém zatížení. [5]

3.4 Model Arruda & Boyce

$$W = G \cdot \left[\frac{1}{2} (I_1 - 3) + \frac{1}{20N} (I_1^2 - 9) + \frac{1}{1050N^2} (I_1^3 - 27) + \right. \\ \left. + \frac{1}{7000N^3} (I_1^4 - 81) + \frac{1}{673750N^4} (I_1^5 - 243) + \dots \right] \quad (11)$$

kde $G = nkT$ je počátečný modul pružnosti ve smyku (n , k , T viz model Neo-Hookean), N je počet segmentů modelu úseku makromolekulárního řetězce mezi příčnými můstky a souvisí s limitovanou protažitelností modelu tohoto řetězce.

Model navrhly Arruda a Boyce r. 1993. Vychází z modelu mikrostruktury elastomeru, jehož základní buňka obsahuje 8 makromolekulárních řetězců - viz obr. 3, proto se model velmi často označuje jako „osmiřetězcový“. Autorky navázaly na práce předchozích teoretiků (Kuhn a Grun), kteří odvodili vztah pro konfigurační entropii makromolekulárního řetězce s využitím tzv. Langevinovské statistiky což umožňuje matematicky postihnout omezenou natažitelnost těchto řetězců. Výsledkem je však matematicky komplikovaný vztah pro výslednou hustotu energie napjatosti W , kde figuruje inverzní Langevinova funkce, která nemá analytické vyjádření. Často se proto užívá rozvoje této funkce do nekonečné číselné řady, běžně se však uvažuje pouze několik jejích prvních členů.



Obr. 3 Elementární buňky a uspořádání molekulárních řetězců jednotlivých modelů elastomerů (zleva: tzv. třířetězcový model, čtyřřetězcový model, čtyřřetězcový model, osmiřetězcový model a model s náhodnou orientací).

Model Arruda & Boyce navazuje na dřívější modely, které se odlišovaly vzájemným uspořádáním jednotlivých řetězců v modelové buňce molekulární sítě. Za povšimnutí stojí model navržený Wan&Guth – tzv. třířetězcový – viz obr 3. Jiní autoři věnovali pozornost neortogonálnímu tvaru modelové buňky – viz. např. tvaru čtyřstěnu obsahující čtyři řetězce (obr. 3). V literatuře jsou také prezentovány modely vycházející z náhodně orientovaných molekulárních řetězců – tj. „full network models“ (obr 3). Všeobecně se očekává, že právě takové modely jsou nejvíce věrohodné, jejich matematický popis je však složitý, a proto nevhodný pro běžné používání v současných výpočtových systémech. Wu & van der

Giesen však ve své práci demonstrovali, že model s náhodně orientovanými řetězci lze poměrně úspěšně aproximovat jednoduchou lineární kombinací osmi- a tří- řetězcového modelu. [5]

3.5 Model Gent:

$$W = -\frac{EI_m}{6} \ln \left[1 - \frac{I_1^*}{I_m} \right], \quad I_1^* = I_1 - 3 \quad (12)$$

kde E je počáteční modul pružnosti v tahu, I_m je maximální hodnota I_1^* , při které roste velikost W do nekonečna.

Model navrhl Gent v r. 1996. Model má vlastnosti podobné formulačně složitějšímu modelu typu „Arruda –Boyce“, nevychází však z modelu vnitřní struktury elastomerů- tento vztah je empirický. Jeho výhody spočívají ve formulační jednoduchosti, malém počtu parametrů (dva) a schopnosti postihnout závěrečnou vyztužovací fázi napětově deformační odezvy.

Mnoho jiných autorů navrhlo jiné modely, které však již v dnešní době nenacházejí tak široké využití jako výše uvedené. [5]

3.6 Obecný polynomický model

$$W = \sum_{i+j=1}^N C_{ij} (I_1 - 3)^i (I_2 - 3)^j \quad (13)$$

kde C_{ij} jsou materiálové parametry bez fyzikálního významu, N je volitelný parametr určující stupeň polynomu.

Model je pro $N = 1, 2$ a 3 nazýván Mooney-Rivlin.

Vztah

$$W = \sum_{i+j=1}^N C_{ij} (I_1 - 3)^i (I_2 - 3)^j \quad (14)$$

zahrnuje více konkrétních variant modelů, včetně již popsaného modelu Noe-Hookean a Mooney.

Níže je uvedeno několik jiných využívaných variant:

YEOH:

$$W = C_{10} (I_1 - 3) + C_{20} (I_1 - 3)^2 + C_{30} (I_1 - 3)^3 \quad (15)$$

Model byl verifikován pro pryže s plnivý.

JAMES-GREEN-SIMPSON:

$$W = C_{10} (I_1 - 3) + C_{01} (I_2 - 3) + C_{11} (I_1 - 3)(I_2 - 3) + C_{20} (I_1 - 3)^2 + C_{30} (I_1 - 3)^3 \quad (16)$$

SIGNIORINI:

$$W = C_{10} (I_1 - 3) + C_{01} (I_2 - 3) + C_{20} (I_1 - 3)^2 \quad (17)$$

K získání přesných konstant do těchto modelů je nutné otestovat chování materiálu v jednoosém tahu, v dvojosém tahu a v čistém smyku. Zkoušky v jednoosém tahu se provádějí na trhacích přístrojích, které jsou běžně dostupné. Jejich provedení není složité. Zkoušky v dvojosém tahu jsou již složitější, tyto zkoušky jsou náročné na přístrojové vybavení. Tato diplomová práce je zaměřena na zkoušky v dvojosém namáhání. Kde se sleduje tlak působící na zkušební vzorek a deformace vzorku.

4 METODY TESTOVÁNÍ MATERIÁLŮ

4.1 Teorie mechanických zkoušek

Mechanické zkoušky slouží ke zjišťování mechanických vlastností, které charakterizují chování materiálu za působení vnějších sil. Jsou základní informací pro dimenzování součástí a poskytují hodnoty nezbytné při návrhu konstruktéra i pro dodatečnou kontrolu.

Jsou to převážně zkoušky destruktivní, při nichž dochází k porušení zkušebního tělíska, proto se provádí na zkušebních vzorcích. Provedení zkoušek je většinou normalizováno, podobně jako tvar a rozměry zkušebních těles.

Z fyzikálních podmínek má pro mechanické zkoušky největší význam teplota. Většina zkoušek se provádí při teplotě (10 – 35)°C, ale některé mechanické zkoušky jsou určeny jen pro vysoké nebo záporné teploty.

Podle způsobu zatěžování dělíme mechanické zkoušky na statické a dynamické:

- statické zkoušky jsou charakterizovány konstantní nebo klidně vzrůstající silou, která vyvolává postupně vzrůstající deformaci a vede většinou až k porušení zkušebního tělesa. Podle druhu namáhání, kterému je materiál vystaven, to mohou být zkoušky tahem, tlakem, ohybem, krutem nebo stříhem.
- při dynamických zkouškách roste zatěžující síla z nulové hodnoty na maximální ve velmi krátkém čase (skokem). Materiál je vystaven rázovému zatížení nebo se síla může v průběhu času opakovaně měnit a potom mluvíme o zatěžování cyklickém. Mezi tyto zkoušky patří například zkouška ohybem. [5]

4.2 Zkouška jednoosého tahu

Experimenty jednoosé napjatosti jsou velmi časté u elastomerů. Nejdůležitější požadavek je ten, aby se dosáhlo čistého napětí v tahu.

Stav deformace:

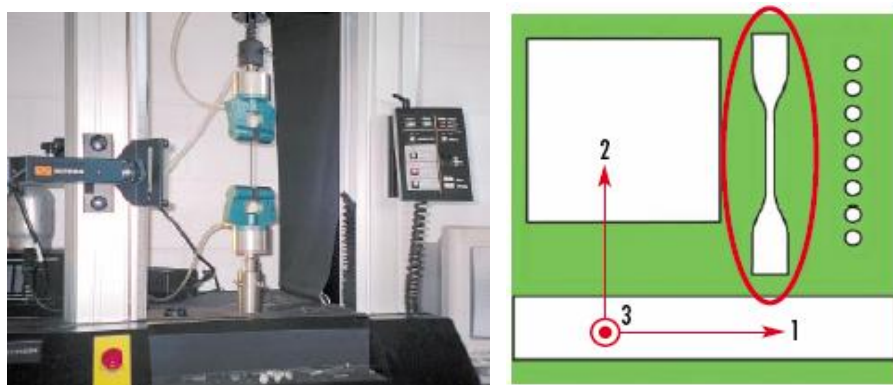
$$\lambda_2 = \lambda = L / L_0, \lambda_1 = \lambda_3 = \sqrt{A / A_0} \quad (18)$$

Stav napětí:

$$\sigma_2 = \sigma = P / A_0, \sigma_1 = \sigma_3 = 0 \quad (19)$$

Vzorek musí být o mnoho delší ve směru tahu než je jeho šířka, tloušťka.

Cílem je vytvořit pokus kde se nevyskytují boční vlivy pro zužování vzorku. Vzorek by měl být nejméně 10x delší než je šířka nebo tloušťka. Uchycení vzorku utváří neurčitý stav napětí a tlaku v oblasti čelistí v průběhu uchycení. Proto deformace vzorku L/L_0 se musí měřit na vzorku kde se vyskytuje čisté napětí v tahu, a ne v blízkosti čelistí. [7]



Obr. 4 Zkouška jednoosého tahu

4.3 Zkouška jednoosého tlaku

Stav deformace:

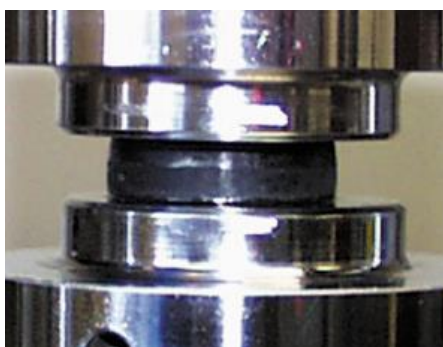
$$\lambda_2 = \lambda = L / L_0, \lambda_1 = \lambda_3 = \sqrt{A / A_0} \quad (20)$$

Stav napětí:

$$\sigma_2 = \sigma = P / A_0, \sigma_1 = \sigma_3 = 0 \quad (21)$$

Je velmi složité experimentálně dosáhnout rovnoměrné deformace při stlačení. Existují dva základní důvody proč jsou testy tlaku složité.

- zvolení tvaru vzorku tak, aby měl dostatečnou tloušťku na měření (optimální zvolení tloušťky vzorku).
- z důvodu tření mezi testovaným vzorkem a čelistmi stroje se vzorek nemůže úplně roztáhnout do boku během stlačování. I velmi malý koeficient tření, např. 0,1 mezi vzorkem a pláty může způsobit podstatné smykové napětí, které změni napětí na deformaci, často maximální smykové napětí přesahuje maximální napětí při tlaku. [7]



Obr. 5 Zkouška jednoosého tlaku

4.4 Zkouška dvojosého napětí

Dvojosé deformace může být dosaženo radiálním protažením nebo nafukováním kulatého či čtvercového vzorku.

Kruh

Stav deformace:

$$\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda = L / L_0, \quad \lambda_3 = t / t_0 \quad (22)$$

Stav napětí:

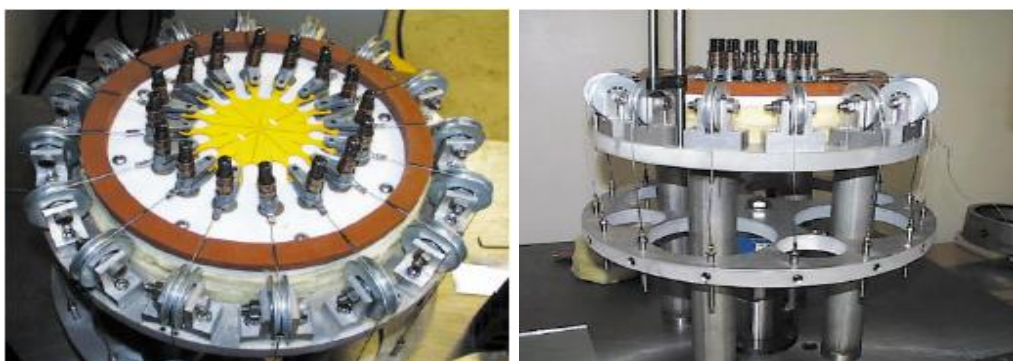
$$\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma, \quad \sigma_3 = 0 \quad (23)$$

Nominální rovnoměrné dvojosé napětí obsažené ve vnitřním průměru vzorku se vypočítá:

$$\sigma = P_s / A_0 \quad (24)$$

kde $A_0 = \pi D_1 t_0$, D_1 kde je původní průměr vzorku, P_s suma radiálních sil, t_0 je původní tloušťka. (7)

Materiál se považuje za nestlačitelný jestliže se neměří okamžitá tloušťka t .



Obr. 6 Zkouška dvojosého napětí - kruh

Čtverec

Stav deformace:

$$\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda = L / L_0 , \quad \lambda_3 = t / t_0 \quad (25)$$

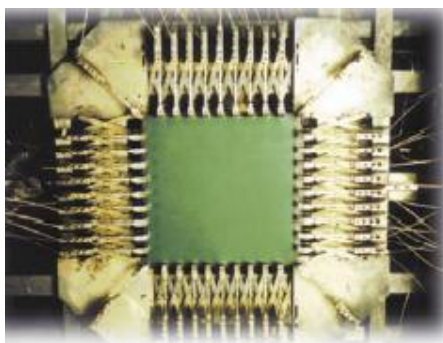
Stav napětí:

$$\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma , \quad \sigma_3 = 0 \quad (26)$$

Protahuje se čtverec.

Nominální dvojosé napětí ve vzorku se vypočítá jako $\sigma = P_n / A_0$, kde

$A_0 = W_s t_0$, kde W_s je šířka, P_n průměr sil normálních pro šířku a délku vzorku. [7]



Obr. 7 Zkouška dvojosého napětí – čtverec [7]

Nafukováním kulatého vzorku

Tato metoda je popsána v praktické části diplomové práce.

4.5 Zkouška čistého rovinného smyku

Stav deformace:

$$\lambda_1 = 1 , \quad \lambda_2 = \lambda = L / L_0 , \quad \lambda_3 = \lambda^2 t / t_0 \quad (27)$$

Stav napětí:

$$\sigma_1 \neq 0 , \quad \sigma_2 = \sigma , \quad \sigma_3 = 0 \quad (28)$$

Pokus je podobný zkoušení v tahu velmi širokého vzorku. Nicméně, protože materiál je skoro nestlačitelný stav čistého smyku se vyskytuje ve vzorku pod úhlem 45° k směru

protažení. Nejdůležitější vlastnost vzorku je, aby byl mnohem kratší ve směru protažení než je jeho šířka. Cílem je vytvořit pokus, kde je vzorek namáhán v bočním směru tak, aby ztenčení vzorku se vyskytlo ve směru tloušťky. To vyžaduje, aby vzorek byl alespoň 10x širší než delší ve směru protažení. Tento pokus je velmi citlivý na poměr délky a šířky. [7]



Obr. 8 Zkouška čistého rovinného smyku

4.6 Zkouška objemové stlačitelnosti

Stav deformace:

$$\lambda_1 = 1, \lambda_2 = 1, \lambda_3 = L/L_0 \quad (29)$$

Stav napětí:

$$\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = -|P/A_0| \quad (30)$$

A_0 je průřez táhla a P je síla .

Přípravek slouží aby se vzorek nedeformoval do jiného směru. Proto přípravek a vzorek musí mít přesný tvar. Z vrchní části na vzorek tlačí tlačná část. Přesný tvar zabezpečí měření objemové stlačitelnosti.

Informace vztahující se k modulu objemové stlačitelnosti se dají získat i měřením příčných deformací v jedno a dvojosých napěťových testech. V tomto případě se tento objemový test nemusí provádět. [7]



Obr. 9 Zkouška objemové stlačitelnosti

5 MĚŘENÍ TLAKU

5.1 Základní pojmy

Tlak je veličina odvozená a při jeho měření lze vycházet ze základních definic:

- a) síla F působící kolmo na jednotku plochy S

$$p = \frac{F}{S} = \frac{m \cdot g}{S} \quad (31)$$

- b) hydrostatický tlak sloupce tlakoměrové kapaliny o výšce h a hustotě ρ

$$p = \rho \cdot g \cdot h \quad (32)$$

Jednotkou tlaku je pascal ($1 \text{ Pa} = 1 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$). V tabulce III. jsou uvedeny převodní koeficienty některých u nás nepovolených jednotek, se kterými se lze setkat nejen v literatuře.

Tabulka II. Převodní koeficienty

Tlak	$1 \text{ Pa} = 1 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$
1 bar	10^5 Pa
1 atm	101 325 Pa
1 torr	133,3224 Pa
1 PSI	$6,89476 \cdot 10^3 \text{ Pa}$

Absolutní tlak p_a se měří od absolutní nuly, přetlak a podtlak se měří od okamžitého barometrického (atmosférického) tlaku p_b . Vakuum se nazývá velký podtlak, když se absolutní tlak blíží k nule.

Obecně se přístroje k měření tlaku nazývají tlakoměry, podle velikosti měřeného tlaku a podle použití tlakoměrů se jim přiřazují následující názvy:

- manometry – k měření přetlaků (obvykle deformační tlakoměry),
- vakuometry – k měření velmi malých absolutních tlaků,
- manovakuometry – k měření přetlaků i podtlaků (obvykle deformační tlakoměry),
- tahoměry – k měření malých podtlaků (obvykle kapalinové nebo deformační tlakoměry),
- diferenciální tlakoměry – k měření tlakových rozdílů.

Podle definice tlaku a podle funkčního principu se tlakoměry dělí na:

- a) zvonové a pístové – etylénové přístroje, měřítkem tlaku je zdvih zvonu nebo hmotnost závaží na pístu známého průřezu,
- b) kapalinové – etylénové přístroje, měřítkem tlaku je výška kapalinového sloupce (U-trubicové, nádobkové, mikromanometry se sklonným ramenem a kompresní vakuometry),
- c) deformační – měřítkem tlaku je velikost deformace pružného prvku (trubicové – bourbonské, membránové, krabicové, vlnovkové),
- d) elektrické – měřítkem tlaku je změna elektrické veličiny tlakově závislé (odporové, bolometrické, a ionizační vakuometry). [7]

6 FIRMA LASKI

Firma Laski s.r.o. vznikla v roce 1992 jako obchodní organizace zabývající se prodejem a výrobou náhradních dílů na zemědělské stroje.

Dále se věnuje rozvoji svých výrobků, kterých je v současné době více než dvacet. Mezi stěžejní stroje patří fréza na pařezy, která je vyráběna v pěti základních typech, zametací kartáče, vysavače listí, vibrační desky, rozmetadla, travní sekačky apod.

II. PRAKTICKÁ ČÁST

7 STANOVENÍ CÍLŮ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Diplomová práce se zabývá návrhem zkušebního zařízení pro určení materiálových charakteristik elastomerů.

Pro optimální praktické řešení zkušebního zařízení je nutné získat dostatečné množství teoretických informací studiem skript, odborné literatury a prospektů, aby mohla být zvolena nejlepší varianta realizace zadaného úkolu.

Při vypracování zkušebního zařízení budou zvoleny takové materiály a součásti, které jsou dostupné nebo normalizované.

Pro zkušební zařízení bude vypracována technická a výkresová dokumentace a zajištěna výroba .

Bude sestaven pneumatický obvod, pomocí něhož se zkušební zařízení napojí na rozvod vzduchu.

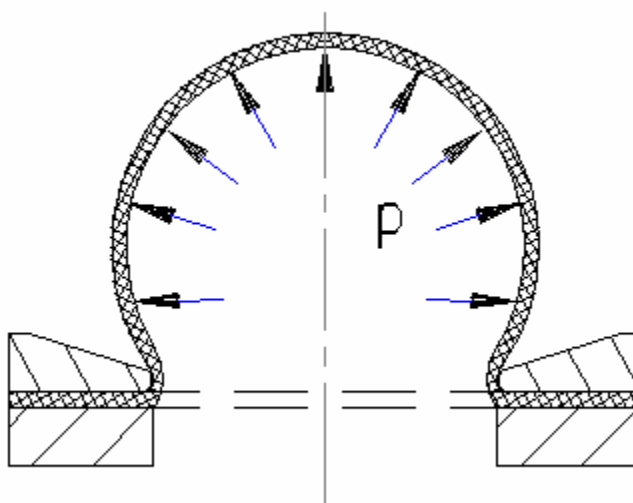
Funkčnost zařízení bude ověřena testováním pryžového vzorku o průměru 90 mm a tloušťce 2 mm.

8 NÁVRH ZKUŠEBNÍ METODY

Pro návrh bylo nutné nejdříve prostudovat vlastní problematiku měření a zjištění technického vybavení laboratoře. K dispozici byl rozvod vzduchu s rozsahem 0-1,2 MPa, manometry s rozsahem 0-0,4 MPa a 0- 1,5 MPa a digitální fotoaparát.

Pro měření dvojsoého stavu napjatosti se nejčastěji používají zkoušky s radiálním protažením kruhového nebo čtvercového vzorku na speciálních přístrojích k tomu určených. Tyto zkoušky jsou náročné na přístrojové vybavení. Viz kapitola 4.

Proto byla navržena metoda nafukování zkušební vzorku vzduchem. Zaznamenává se tlak působící na zkušební vzorek a deformace vzorku.

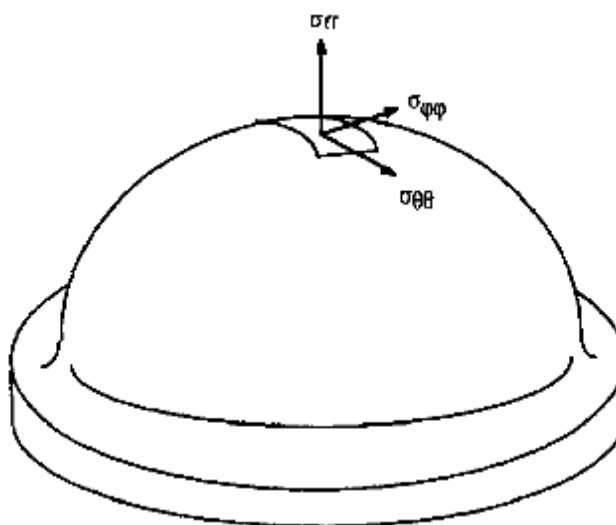


Obr. 10 Schéma zatěžování vzorku tlakem

Výpočet obvodového napětí.

Vzorek je upnut mezi upínací kroužky a nafouknut stlačeným vzduchem, který se vpouští z jedné strany tak, aby vznikla bublina jak je zobrazeno na obrázku č.11.

Nafouknutí vzorku vede k dvojosému protažení na vrcholku bubliny (pólu).



Obr. 11 Deformace vzorku [16]

Předpokládáme-li sférickou symetrii tak můžeme položit $\sigma_{\theta\theta} = \sigma_{\varphi\varphi}$ na vrcholku bubliny.

Napětíový tenzor σ je vyjádřen :

$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_{rr} & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{\theta\theta} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{\theta\theta} \end{bmatrix}_{(r,\theta,0)} \quad (33)$$

Kde: σ je napětíový tenzor

σ_{rr} je radiální napětí

$\sigma_{\theta\theta}$ je obvodové napětí

Vzhledem k malé tloušťce vzorku lze zanedbat radiální napětí σ_{rr} vzhledem k obvodovým napětím $\sigma_{\theta\theta}$.

Předpokládáme-li v měřené oblasti, že je tloušťka konstantní, pak:

$$\sigma_{\theta\theta} = \frac{\Delta P R_c}{2e} \quad (34)$$

Kde: ΔP je rozdíl tlaků

e je tloušťka vzorku

R_c je poloměr zaoblení

Výpočet tloušťky

Během nafukování se mění tloušťka vzorku. Pro výpočet tloušťky potřebujeme najít označenou oblast kolem pólu bubliny, kde deformace membrány je stejnoměrně dvojásá (rovnoměrně) a tloušťka stejnoměrná.

Za předpokladu nestlačitelnosti materiálu je pak tloušťka dána vztahem:

$$e = \frac{e_0}{\lambda_{\theta\theta}^2}, \quad \lambda_{\theta\theta} = \frac{l}{l_0} \quad (35)$$

Kde: e_0 je původní tloušťka vzorku.

$\lambda_{\theta\theta}$ je rovinné protažení vzorku

l_0 je původní délka

l je délka v daném okamžiku

[16]

Potom skutečné (Cauchyho) napětí ve vrcholové části vzorku bude:

$$\sigma_{\theta\theta} = \frac{\Delta P R_c \lambda_{\theta\theta}^2}{2e_0} \quad (36)$$

Kde: $\sigma_{\theta\theta}$ skutečné napětí

ΔP je rozdíl tlaků

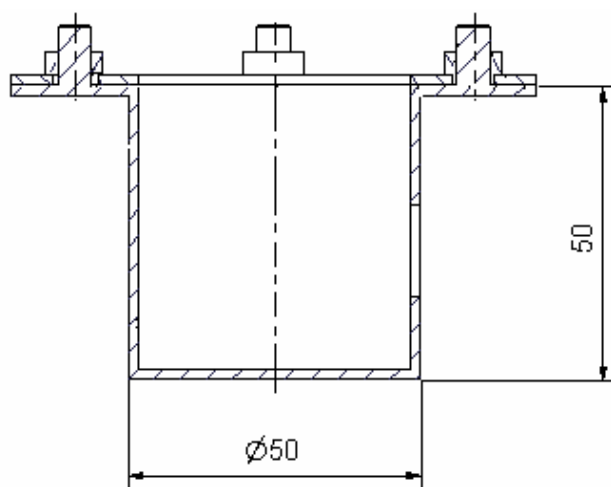
e_0 je původní tloušťka vzorku.

R_c je poloměr zaoblení

9 NÁVRH ZKUŠEBNÍHO ZAŘÍZENÍ

Bylo dbáno na jednoduchost zkušebního zařízení, možné pozdější úpravy, snadnou manipulaci a obsluhu.

9.1 Návrh zkušebního zařízení –č. 1



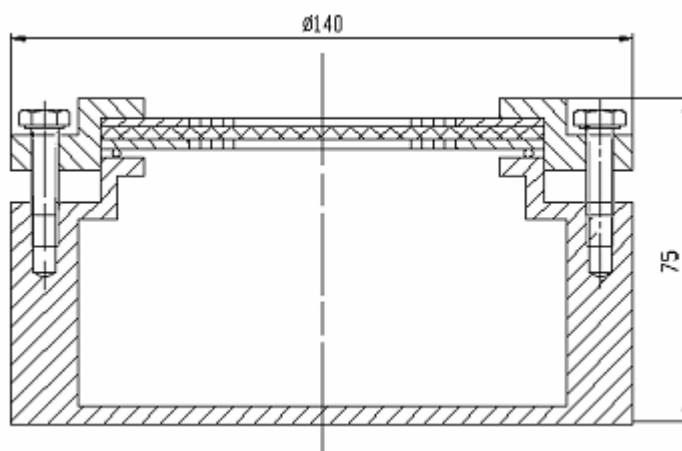
Obr. 12 Schéma návrhu č. 1

Prvotní návrh zkušebního zařízení byl řešen jako válcová nádoba s víkem. Víko k tlakové nádobě by se připevnilo pomocí matic. Tento výrobek měl být vyroben z plechu a svařen.

Od tohoto návrhu bylo upuštěno z těchto důvodů:

- působením tlaku by se stěny mohly deformovat, deformace by bylo možné minimalizovat výztužnými žebry
- složité napojování na pneumatický obvod
- složité zajištění upevnění víka s tlakovou nádobou
- horší stabilita válce, která by se dala zlepšit připevněním k desce stolu
- větší riziko netěsnosti přístroje

9.2 Návrh zkušebního zařízení –č. 2



Obr. 13 Schéma návrhu č. 2

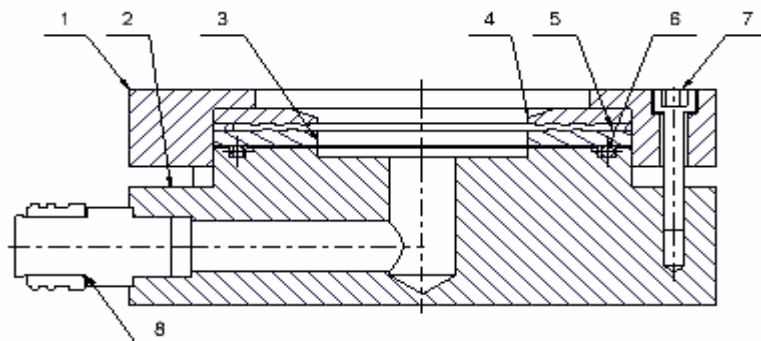
Druhý návrh vychází z návrhu číslo 1. Zde bylo lépe vyřešeno upínání zkušebního vzorku. Zařízení se skládá z víka a tlakové nádoby, které jsou k sobě připevněny pomocí šroubů M6x30. Mezi víkem a tlakovou nádobou jsou vloženy upínací kroužky mezi které se upne měřící vzorek.

Byly zvoleny tři sady upínacích kroužků tak, aby se jejich výměnou mohl měnit parametr vlastního měření elastomerů.

Materiál pro návrh číslo 2 byla zvolena ocel, což umožnilo nejen volbu technologie obrábění, ale i snadnější napojení na pneumatický obvod pomocí rychlospojky.

Od tohoto návrhu bylo upuštěno z důvodu velké členitosti tvaru.

9.3 Návrh zkušebního zařízení – č.3



Obr. 14 Konečný návrh zkušebního zařízení

1-víko, 2- tlaková nádoba, 3- upínací kroužek spodní, 4- upínací kroužek vrchní, 5- rozpěrka, 6- těsnění – O kroužek 85x3, 7- šroub – M6 x 30 ČSN 021143, 8-rychlospojka

Třetí možnost představuje návrh řešení, který vychází z druhé navržené varianty, kde byla upravena tlaková nádoba a víko. Tento návrh zkušebního zařízení byl zvolen jako nejvýhodnější a dále byl rozpracován až do fáze výrobních výkresů, umožňujících jeho výrobu.

9.4 Pevnostní výpočet

Z důvodu rozsahu rozvodu vzduchu o tlaku 0-1,2 MPa byly pevnostní výpočty dimenzovány na tlak 1,2 MPa a byl proveden kontrolní pevnostní výpočet pro šrouby a upínací kroužky.

9.4.1 Šroub

Byl zvolen šroub s válcovou hlavou s vnitřním šestihranem M6 x 30 ČSN 021143.

Víko s tlakovou nádobou se utahuje pomocí 6 šroubů.

Šroub se utahuje v nezatíženém stavu a je namáhán prostým tahem.

Kontrola na tah:

$$A_s = 20,1 \text{ mm}^2, \sigma_{\text{DOV}} = 180 \text{ MPa}, D = 84 \text{ mm}, P = 1,2 \text{ MPa}, n = 6 \text{ Ks}$$

$$\sigma = \frac{F}{n \cdot A_s} \quad (37)$$

$$F = P \cdot S \quad (38)$$

Kde: A_s je výpočtový průřez

σ_{DOV} je dovolené namáhání

D je průměr plochy na kterou působí zatěžovací síla

P je tlak

n je počet kusů

F je zatěžovací síla

$$F = P \cdot \frac{\pi D^2}{4} = 6650,12 \text{ N}$$

$$\sigma = \frac{F}{n \cdot A_s} = 55,14 \text{ MPa} < \sigma_{\text{DOV}} - \text{vyhovuje}$$

9.4.2 Maximální hodnota radiálního a tečného napětí upínací desky

$$P = 1,2 \text{ MPa}, \sigma_{\text{DOV}} = 450 \text{ MPa}, \nu = 0,3$$

Zkosení upínacího kroužku a výstupky se zanedbávají.

1) Upínací kroužek s otvorem $\varnothing 50 \text{ mm}$

$$h = 4 \text{ mm}, r_1 = 25 \text{ mm}, r_2 = 40 \text{ mm}$$

2) Upínací kroužek s otvorem $\varnothing 45$ mm

$$h = 4 \text{ mm} , r_1 = 22,5 \text{ mm} , r_2 = 40 \text{ mm}$$

3) Upínací kroužek s otvorem $\varnothing 40$ mm

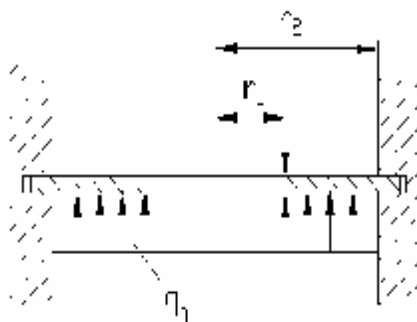
$$h = 4 \text{ mm} , r_1 = 20 \text{ mm} , r_2 = 40 \text{ mm}$$

Radiální napětí:

$$\sigma_{r \max} = \sigma_r(r_2) = -\frac{3q_0}{4h^2} \left[r_2^2 - 2r_1^2 + \frac{r_1^4(1-\nu) + 4r_1^2(1+\nu)\log(r_2/r_1) + r_2^2 \cdot r_1^2(1+\nu)}{r_2^2(1-\nu) + r_1^2(1+\nu)} \right] \quad (39)$$

Tečné napětí:

$$\sigma_{t \max} = \sigma_t(r_1) = \frac{3q_0(1-\nu^2)}{4h^2} \left[\frac{r_2^2 - r_1^2 - 4r_1^2 r_2^2 \log(r_2/r_1)}{r_2^2(1-\nu) + r_1^2(1+\nu)} \right] \quad (40)$$



Obr.15 Schéma zatížení mezikruží tlakem

Kde: P je maximální tlak

σ_{DOV} je dovolené namáhání

ν je Poissonův poměr

h je výška mezikruží

r_1 je vnitřní poloměr mezikruží

r_2 je vnější poloměr mezikruží

σ_r je radiální napětí

σ_t je tečné napětí:

1) Upínací kroužek s otvorem $\varnothing$ 50 mm

$$\sigma_{r\max} = |-109,7| \text{ MPa} < \sigma_{\text{DOV}} - \text{vyhovuje}$$

$$\sigma_{t\max} = |-31,86| \text{ MPa} < \sigma_{\text{DOV}} - \text{vyhovuje}$$

2) Upínací kroužek s otvorem $\varnothing$ 45 mm

$$\sigma_{r\max} = |-123,07| \text{ MPa} < \sigma_{\text{DOV}} - \text{vyhovuje}$$

$$\sigma_{t\max} = |-28,07| \text{ MPa} < \sigma_{\text{DOV}} - \text{vyhovuje}$$

3) Upínací kroužek s otvorem $\varnothing$ 40 mm

$$\sigma_{r\max} = |-135,01| \text{ MPa} < \sigma_{\text{DOV}} - \text{vyhovuje}$$

$$\sigma_{t\max} = |-24,01| \text{ MPa} < \sigma_{\text{DOV}} - \text{vyhovuje}$$

9.4.3 Maximální průhyb upínací desky

$$P = 1,2 \text{ MPa}, \nu = 0,3, E = 2,1 \cdot 10^5 \text{ MPa}$$

1) Upínací kroužek s otvorem $\varnothing$ 50 mm

$$h = 4 \text{ mm}, r_1 = 25 \text{ mm}, r_2 = 40 \text{ mm}$$

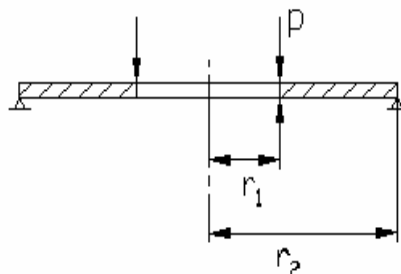
2) Upínací kroužek s otvorem $\varnothing$ 45 mm

$$h = 4 \text{ mm}, r_1 = 22,5 \text{ mm}, r_2 = 40 \text{ mm}$$

3) Upínací kroužek s otvorem $\varnothing$ 40 mm

$$h = 4 \text{ mm}, r_1 = 20 \text{ mm}, r_2 = 40 \text{ mm}$$

$$w_{\max} = \frac{3(1-\nu^2)P}{4\pi E h^3} \left[\frac{3+\nu}{1+\nu} (r_2^2 - r_1^2) + 4 \frac{1+\nu}{1-\nu} \frac{r_2^2 r_1^2}{r_2^2 - r_1^2} \left(\log \frac{r_2}{r_1} \right)^2 \right] \quad (41)$$



Obr. 16 Schéma působení tlaku

Kde: P je maximální tlak

ν je Poissonův poměr

E je modul pružnosti materiálu

h je výška mezikruží

r_1 je vnitřní poloměr mezikruží

r_2 je vnější poloměr mezikruží

$w_{\max}$ je maximální průhyb desky

1) Upínací kroužek s otvorem $\varnothing 50$ mm

$w_{\max} = 2,367 \cdot 10^{-4}$ mm - zanedbatelné

2) Upínací kroužek s otvorem $\varnothing 45$ mm

$w_{\max} = 2,621 \cdot 10^{-4}$ mm - zanedbatelné

3) Upínací kroužek s otvorem $\varnothing 40$ mm

$w_{\max} = 2,367 \cdot 10^{-4}$ mm - zanedbatelné

10 VÝROBA ZKUŠEBNÍHO ZAŘÍZENÍ

10.1 Zkušební zařízení

Pro zkušební zařízení byla zvolena výrobní technologie soustružení. Výroba byla zajištěna firmou Laski s.r.o. Smržice, Jako materiál byla zvolena konstrukční ocel 11 523.

Zkušební zařízení se skládá z těchto částí: tlaková nádoba, víko, upínací kroužek spodní, upínací kroužek vrchní, rozpěrka.

10.1.1 Tlaková nádoba



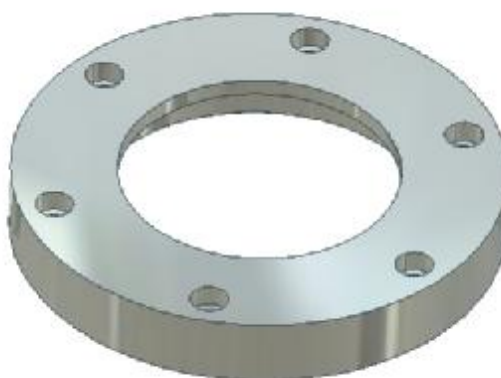
Obr. 17 Tlaková nádoba

Tlaková nádoba je největší část zařízení, přes kterou se dostává tlakové medium pod zkušební vzorek. K tlakové nádobě jsou pomocí víka a 6-ti šroubů M6x30 ČSN 021143 uchyceny upínací kroužky. Volba druhu spojení víka k tlakové nádobě závisí na jeho funkci, způsobu zatížení a na splnění požadavku na pevnost, těsnost, snadnou montáž a demontáž, proto byl zvolen šroubový spoj. Utahování se provádí manuálně.

Pro výrobu byla použita kulatina o $\varnothing$ 145 mm. Z které byl nařezán polotovár o rozměrech $\varnothing$ 145 x 45 mm. Připravený polotovár se upnul do soustruhu SM 50 B. Z čelní strany byla vyvrtána díra $\varnothing$ 16 mm pro rozvod vzduchu do hloubky 30 mm, dále byl obráběn hlavní rozměr na $\varnothing$ 140mm, celkový profil tlakové nádoby a drážka pro těsnění. Po

přepnutí v soustruhu se obráběl zbývající průměr $\varnothing$ 140 mm do celkové délky 40 mm a nekótované hrany byly sraženy na 0,3mm x 45°. Následovala operace vrtání pomocí vrtačky VS 32 B, kde byly vyvrtány díry pro šrouby a rozvod vzduchu. Vše podle výrobního výkresu. Následovalo řezání závitů .

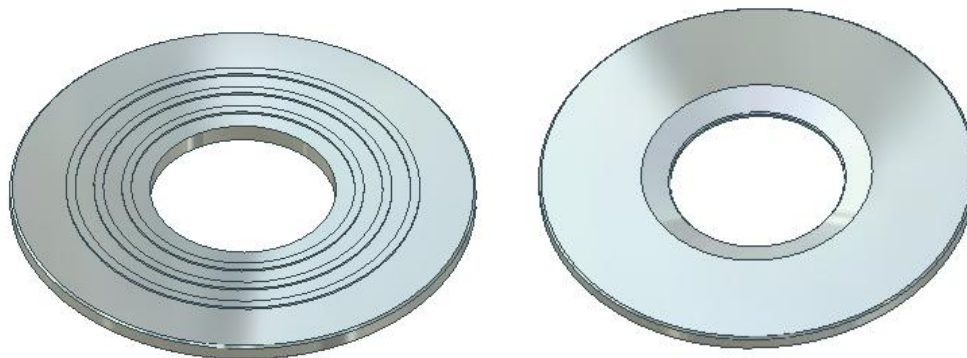
10.1.2 Víko



Obr. 18 Víko

Pro výrobu víka byla použita kulatina o $\varnothing$ 145 mm. Z které byl nařezán polotovar rozměru $\varnothing$ 145 x 23 mm. Připravený polotovar se upnul do soustruhu SM 50 B. Z čelní strany byl vysoustružen otvor $\varnothing$ 80 mm, dále byl obráběn hlavní rozměr na $\varnothing$ 140 mm a celkový profil víka. Byly sraženy hrany podle výrobního výkresu. Po přepnutí víka v soustruhu se obráběl zbývající průměr na $\varnothing$ 140 mm do celkové délky 20 mm. Nekótované hrany byly sraženy 0,3 mm x 45°. Následovala operace vrtání pomocí vrtačky VS 32 B, kde byly vyvrtány a zahloubeny díry pro šrouby podle výrobního výkresu. Následovalo řezání závitů .

10.1.3 Upínací kroužky



Obr. 19 Upínací kroužky

Upínací kroužky jsou ve třech sadách s různým průměrem otvorů ($\varnothing 40$ mm, $\varnothing 45$ mm, $\varnothing 50$ mm). Upínací kroužky slouží jako čelisti pro připevnění zkoušeného vzorku, které mají na vnitřních stranách vysoustruženy výstupky sloužící k zabezpečení zkoušeného vzorku proti pohybu (vyklouznutí při zatěžování). Vrchní upínací kroužky mají sražené hrany z vrchní strany, což usnadňuje nadouvání vzorku.

Pro výrobu upínacích kroužků byla použita kulatina o $\varnothing 105$ mm. Z této byl nařezán polotovar o rozměrech $\varnothing 105 \times 10$ mm. Připravený polotovar se upnul do soustruhu SM 50B. Z čelní strany byl vysoustružen otvor $\varnothing 40$ mm, (pro další dvě sady kroužků $\varnothing 45$, $\varnothing 50$ mm), dále byl soustružen hlavní rozměr na $\varnothing 100$ mm. Pomocí soustruhu byl vyroben celkový profil upínacích kroužků a byly sražené hrany podle výrobního výkresu.

10.1.4 Rozpěrka

Rozpěrka byla navržena tak, aby při utahování víka k tlakové nádobě nedošlo k dosednutí upínacích kroužků k sobě a tím znehodnocení zkušební vzorku.

Z důvodu ochrany proti korozi byl povrch zkušebního zařízení elektrochemicky pokovován. Vzhledem k robustní konstrukci zařízení je zajištěna stabilita při vlastním měření.

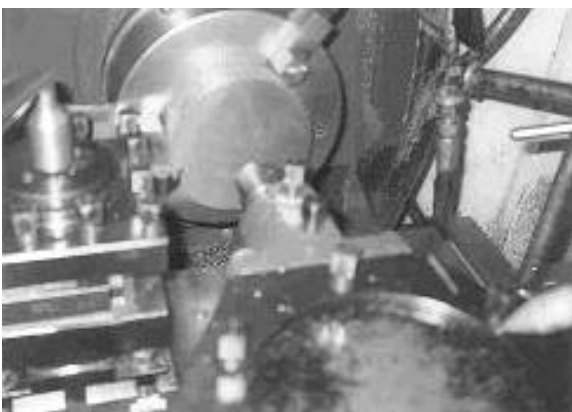
Na obrázku 20 až 25 je zachycena výroba tlakové nádoby. Na obrázku 20 a 21 je řezání na pile ST 230 GA 300. Obr. 22 až 24 znázorňuje práci na soustruhu typu SM 50 B. Poslední obrázek zachycuje vrtání na vrtačce VS 32 B.



Obr. 20 Řezání kulatiny



Obr. 21 Řezání kulatiny



Obr. 22 Zarovnání čela



Obr. 23 Vrtání na soustruhu



Obr. 24 Soustružení



Obr. 25 Vrtání.

Výkresová dokumentace sestavy a jednotlivých částí je uvedena v příloze této diplomové práce.

10.2 Technologický postup výroby

K výrobě byly použity tyto stroje a zařízení:

- Soustruh, typ SM 50 B
- Vrtačka VS 32 B
- Pila ST 230 GA 300
- Soustružnické nože , vrtáky a závitníky podle výrobní potřeby a možnostech firmy.

Jednotlivé technologické postupy výroby jsou uvedeny v příloze P I – P IX.

11 PNEUMATICKÝ OBVOD

Široký sortiment spojovacích materiálů (rychlospojky , vsuvky atd.) zajišťuje správné připojení pneumatického obvodu ke zkušebnímu zařízení a k tlakovému médiu.

Navržený pneumatický obvod se skládá z níže uvedených součástí od firmy Schneider Bohemia.

- Rychlospojka s vnějším závitem R 3/8" – mosazné provedení. Provozní tlak max. 3,5 MPa.
- Vsuvka R 3/8", mosazné provedení.
- Hadicová vsuvka s vnějším závitem R 3/8" x 9.
- T – kus, mosaz poniklovaná, tři vnitřní závity R 3/8".
- Odpouštěcí ventil R 3/8"a. S těsnícím O – kroužkem v sedle ventilu. Se šroubem s rýhovanou hlavou
- Hadice z PVC s textilním opletem, vnitřní $\varnothing$ 8 mm. Pracovní tlak 1 MPa, jednorázové zatížení 3 MPa



a)



b)



c)

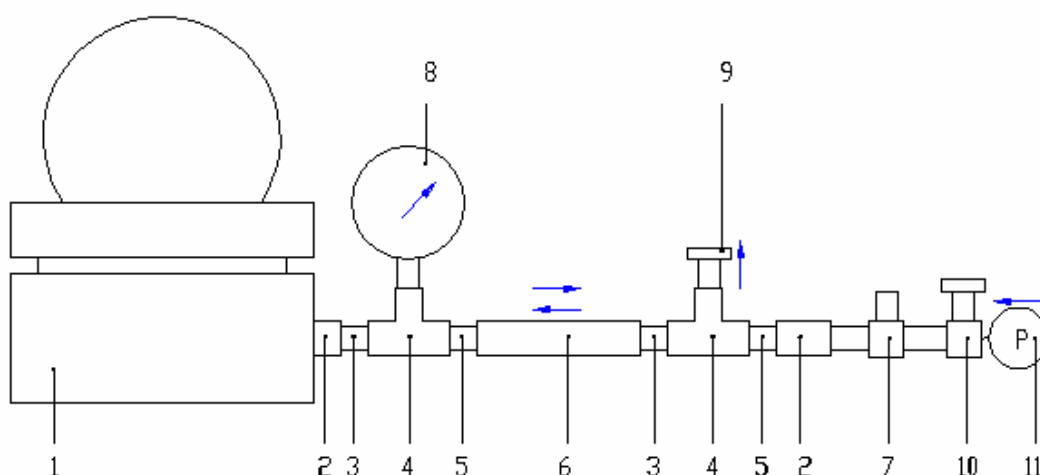


d)



e)

Obr. 26 a) rychlospojka b) vsuvka c) odpouštěcí ventil d) T-kus e) hadicová vsuvka



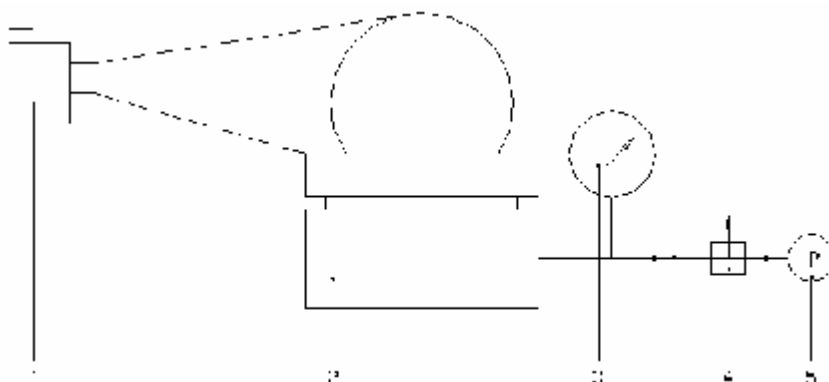
Obr. 27 Schéma zapojení pneumatického obvodu

1- zkušební zařízení se vzorkem, 2 - rychlospojka, 3 - vsuvka, 4 - T – kus, 5 - hadicová vsuvka, 6 - hadice, 7 - pojistný ventil, 8 - manometr, 9 - odpouštěcí ventil, 10 - regulační ventil, 11 - zdroj tlakového média

Celý obvod je napojen ke zdroji tlakového média (11) přes rychlospojku (2). Pomocí regulačního ventilu (10) je regulován potřebný průtok vzduchu. Odpouštěcí ventil (9) nám umožňuje vypouštění vzduchu ze systému. Odpouštěcí ventil je přišroubován k T- kusu (4), ke kterému je přišroubována hadicová vsuvka (5) a vsuvka (3). K hadicové vsuvce je připevněna hadice (6). K druhému T-kusu je připevněn manometr (8), hadicová vsuvka a vsuvka, která umožňuje konec pneumatického obvodu připojit ke zkušebnímu zařízení se vzorkem (1). Pojistný ventil (7) je dimenzován pro max. tlak 1,2 MPa. K zajištění těsnosti pneumatického obvodu byly použity těsnicí kroužky a těsnicí páska.

12 REALIZACE MĚŘÍCIHO ZAŘÍZENÍ

Celý průběh nafukování vzorku (2) je zachycen pomocí digitálního fotoaparátu (1).



Obr. 28 Schéma soustavy měřícího zařízení

- 1) fotoaparát
- 2) zkušební zařízení se vzorkem
- 3) manometr
- 4) regulační jednotka
- 5) zdroj tlakového média

Fotoaparát

- ve stanovených intervalech se pomocí digitálního fotoaparátu zachycuje průběh deformování zkušební vzorku a velikost tlaku na manometru pomocí videosekvence (30 snímků za sekundu s rozlišením 544x408bodů).

Zkušební zařízení

- zajišťuje upnutí zkušební vzorku a distribuci tlakového média na jeho stranu. Víko je s tlakovou nádobou spojeno šrouby.

Zkušební vzorek

- zkušební zařízení je určeno pro vzorky o průměru 90mm. Pomocí vyměnitelných upínacích prvků je možné měnit průměr namáhané plochy vzorku ($\varnothing 40$, $\varnothing 45$, $\varnothing 50$).

Manometr

- manometrem se měří hodnota tlaku tlakového média zatěžujícího zkušební vzorek. Byl použit manometr s třídou přesnosti 1,6% a rozsahem 0- 0,4 MPa .

Regulační jednotka

- 1) Ventil na zdroji tlakového média reguluje zatížení vzorku tlakovým médiem směrem od jeho zdroje ke zkušebnímu zařízení.
- 2) Odpouštěcí ventil reguluje odpouštění tlakového média .

Regulace je manuální.

Zdroj tlakového média

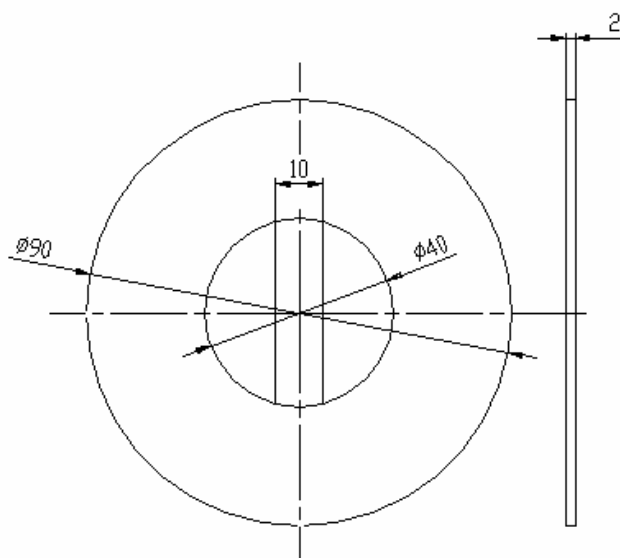
- jako tlakové médium byl použit vzduch.

13 OVĚŘOVÁNÍ FUNKČNOSTI ZAŘÍZENÍ

Abychom zjistili, zda navržené zařízení vyhovují daným požadavkům, bylo provedeno zkušební měření na vzorcích z pryže.

13.1 Příprava vzorku

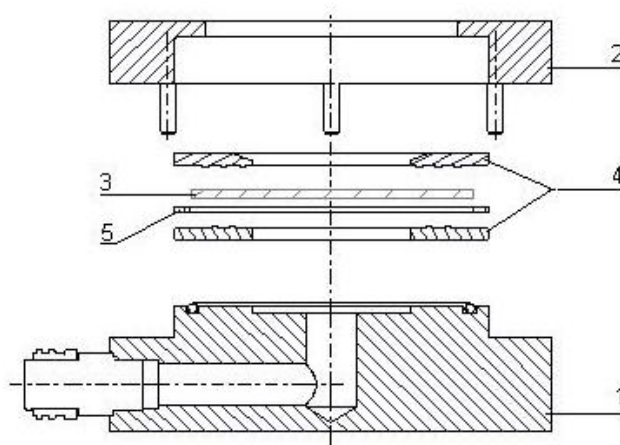
Pro měření byl použit pryžový vzorek kruhového tvaru o průměru 90 mm a tloušťce 2 mm.



Obr. 29 Rozměr a umístění pomocných čar pro výpočet

Na zkušební vzorek se podle obrázku číslo 29 narýsují pomocné čary, které jsou potřebné pro pozdější vyhodnocování výsledků, výpočet velikosti poloměru křivosti vzorku a určování poměrného protažení λ . Vnitřní kruh o průměru 40 mm je pomocný, velikost průměru je totožný s otvory na upínacích kroužcích a na zkušebním vzorku usnadňuje přesné umístění vzorku.

13.2 Popis měření



Obr. 30 Schéma upnutí vzorku

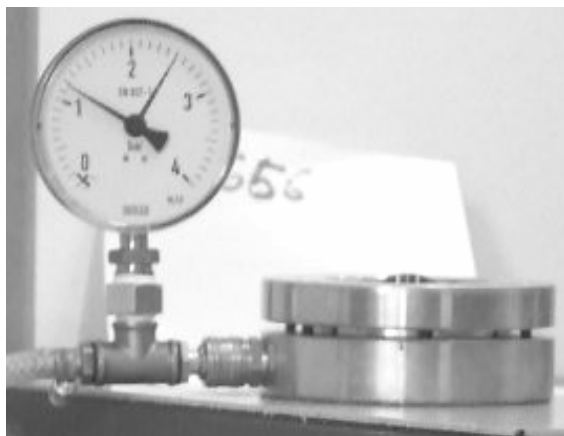
1 – tlaková nádoba, 2 – víko, 3 – zkušební vzorek, 4 – upínací kroužky, 5- rozpěrka

Připravený zkušební vzorek (3) se vloží s rozpěrkou (5) mezi upínací kroužky (4). Kroužky se vzorkem se upnou víkem (2) k tlakové nádobě (1) pomocí šesti šroubů. K utěsnění zkušebního zařízení je na tlakové nádobě v drážce těsnění ČSN 029 281 (O-kroužek 85x3). Utahování se provádí ručně. Takto připravené zkušební zařízení se napojí na pneumatický obvod. Připraví se fotoaparát, který je umístěn tak, aby snímal manometr a zkušební zařízení se vzorkem v průběhu měření (obr.31). Zapne se snímání fotoaparátu a do systému se vpustí vzduch z rozvodu vzduchu. Průtok vzduchu je ovládán regulační jednotkou. Po destrukci vzorku se vypne přívod vzduchu a snímání fotoaparátu.

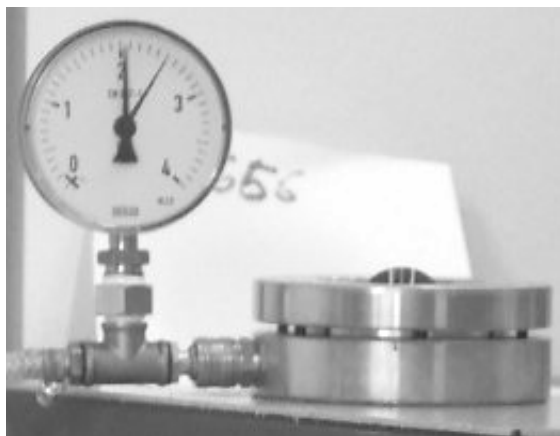
13.3 Experiment

Pro ověření funkčnosti zkušebního zařízení byla použita sada upínacích kroužků s otvorem $\varnothing 40$ mm.

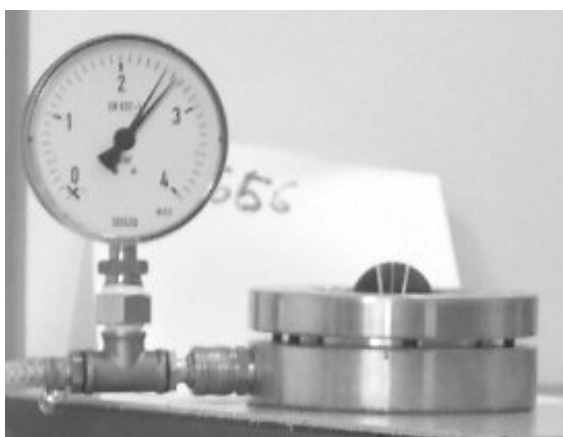
Na obrázcích 31 až 35 je zachycen průběh zkoušky realizované metody pro určování napětíové deformační charakteristiky elastomerů při rovnoměrné rovinné napjatosti.



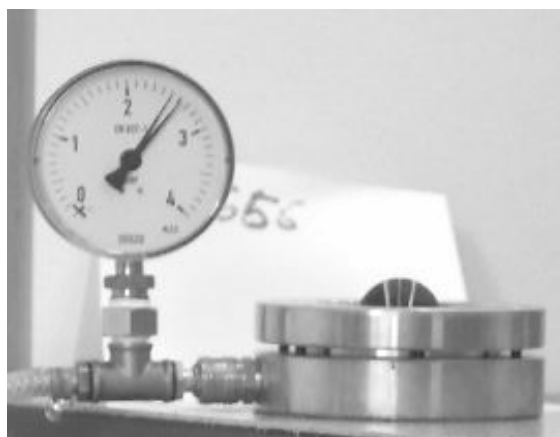
Obr. 31 Deformace vzorku - 0,12 MPa



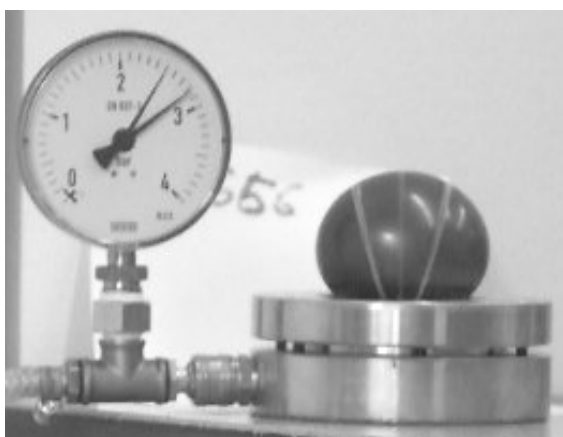
Obr. 32 Deformace vzorku - 0,2 MPa



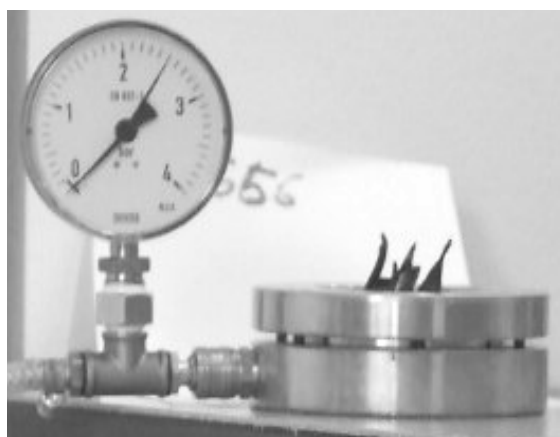
Obr. 33 Deformace vzorku - 0,24 MPa



Obr. 34 Deformace vzorku - 0,26 MPa



Obr. 35 Deformace vzorku - 0,28 MPa



Obr. 36 Destrukce vzorku

Scéna sestávající z deformovaného vzorku a manometru je v jednotlivých časových intervalech snímána fotoaparátem. Výsledkem je sada digitálních obrazů, které jsou dále zpracovávány. Ze snímků se odečte tlak, délka a poloměr zaoblení měřeného úseku pryžového vzorku.

Záznam průběhu zkoušky je v elektronické příloze diplomové práce.

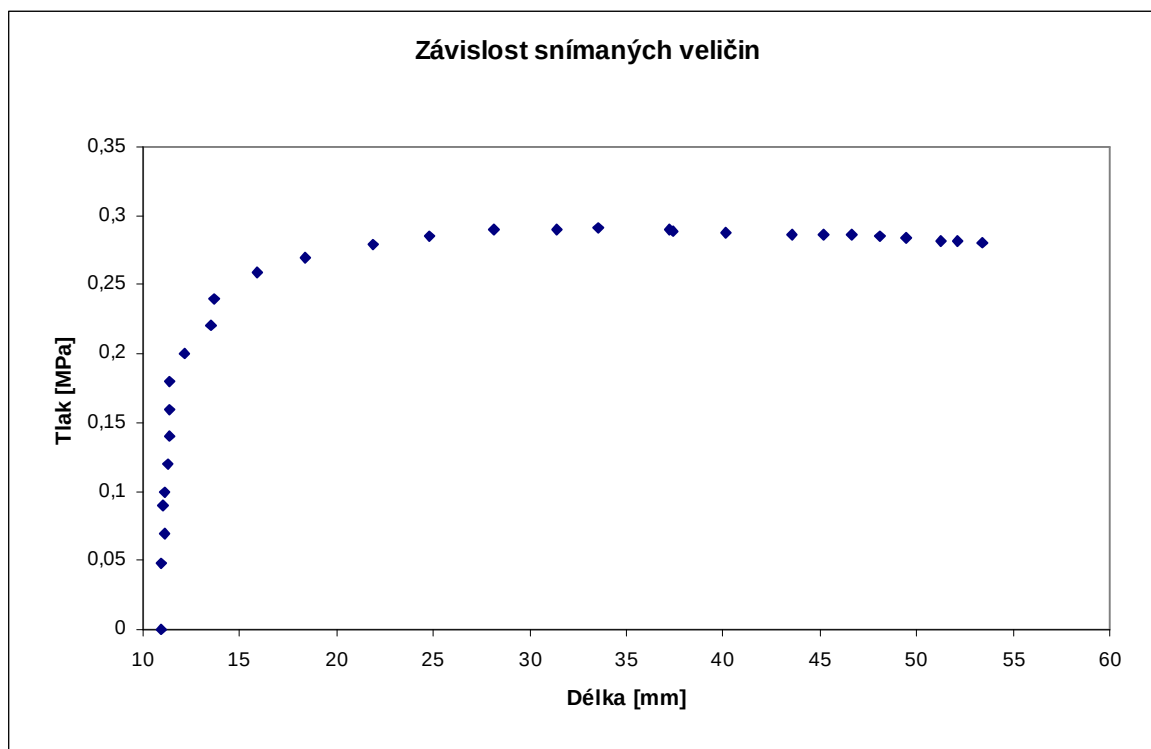
13.4 Výsledek měření

Při experimentu bylo vyhotoveno 30 snímků. Ze kterých se zjistil tlak. Délka a poloměr zaoblení měřeného úseku se změřili v programu AutoCAD.

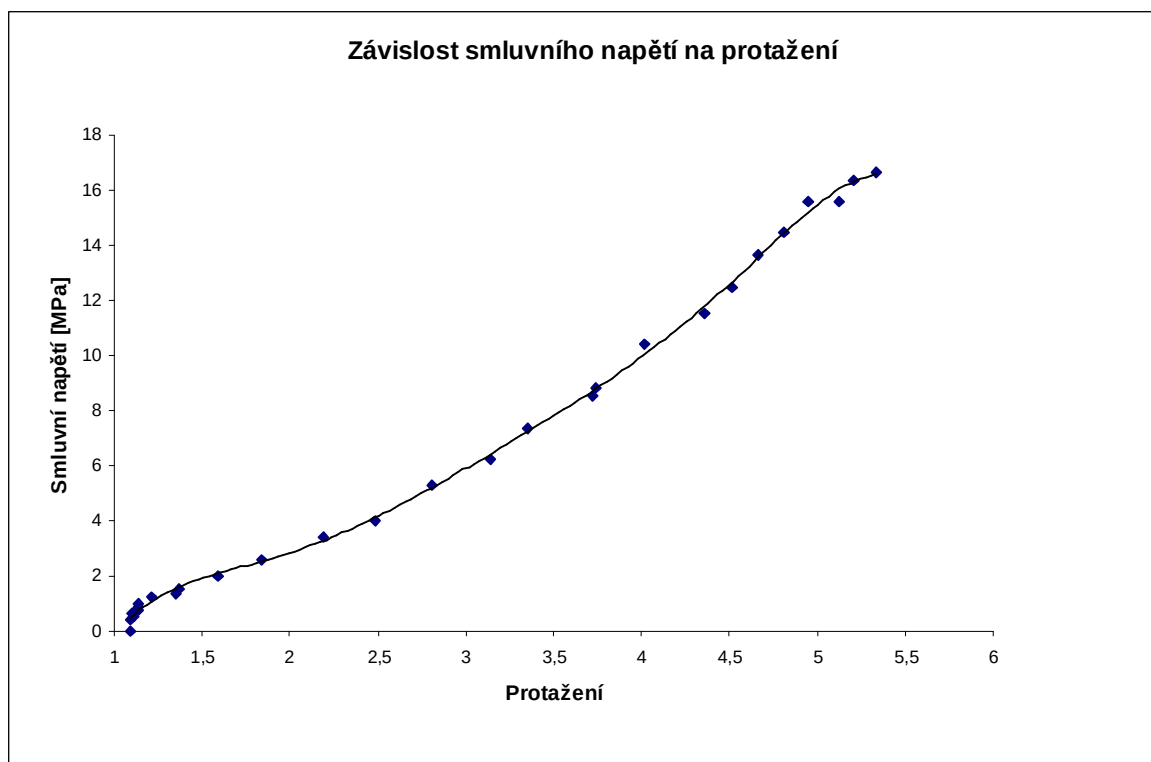
V tabulce číslo III jsou naměřené a vypočítané hodnoty experimentu.

Tab. III Naměřené a vypočítané hodnoty

Tlak [MPa]	Délka [mm]	Poloměr [mm]	Protažení	Skutečné napětí [MPa]	Prodloužení	Smluvní napětí [MPa]	Tažnost [%]
0	10,90		1,09	0,00	0,09	0,00	9
0,048	10,90	30,20	1,09	0,43	0,09	0,40	9
0,070	11,08	26,80	1,11	0,58	0,11	0,52	11
0,090	11,05	25,10	1,11	0,69	0,11	0,62	11
0,100	11,10	24,10	1,11	0,74	0,11	0,67	11
0,120	11,30	23,00	1,13	0,88	0,13	0,78	13
0,140	11,37	19,10	1,14	0,86	0,14	0,76	14
0,160	11,34	19,70	1,13	1,01	0,13	0,89	13
0,180	11,35	19,50	1,14	1,13	0,14	1,00	14
0,200	12,10	20,44	1,21	1,50	0,21	1,24	21
0,221	13,48	18,35	1,35	1,84	0,35	1,37	35
0,240	13,72	18,80	1,37	2,12	0,37	1,55	37
0,259	15,92	19,26	1,59	3,16	0,59	1,99	59
0,270	18,42	21,02	1,84	4,81	0,84	2,61	84
0,279	21,87	22,30	2,19	7,44	1,19	3,40	119
0,285	24,83	22,65	2,48	9,95	1,48	4,01	148
0,290	28,12	25,97	2,81	14,89	1,81	5,29	181
0,290	31,38	27,51	3,14	19,63	2,14	6,26	214
0,291	33,56	30,16	3,36	24,71	2,36	7,36	236
0,290	37,21	31,53	3,72	31,64	2,72	8,50	272
0,289	37,39	32,60	3,74	32,93	2,74	8,81	274
0,288	40,12	36,10	4,01	41,84	3,01	10,43	301
0,287	43,57	36,82	4,36	50,15	3,36	11,51	336
0,287	45,16	38,55	4,52	56,31	3,52	12,47	352
0,286	46,63	40,87	4,66	63,54	3,66	13,63	366
0,285	48,09	42,19	4,81	69,52	3,81	14,46	381
0,284	49,47	44,50	4,95	77,19	3,95	15,60	395
0,282	51,26	43,20	5,13	80,03	4,13	15,61	413
0,282	52,09	44,61	5,21	85,34	4,21	16,38	421
0,281	53,37	44,40	5,34	88,84	4,34	16,65	434



Obr. 37 Závislost snímaných veličin



Obr. 38 Závislost smluvního napětí na protažení

14 DISKUSE

14.1 Návrh zkušební metody

Pro vlastní návrh zkušební metody byla navržena metoda postupného nafukování zkušební vzorku vzduchem. Sleduje se tlak působící na zkušební vzorek a deformace vzorku. Tato metoda byla vybrána z důvodu nenáročnosti na přístrojové vybavení, dále je jednoduchá a měření je přesné.

14.2 Návrh zkušebního zařízení

V praktické části diplomové práce je navrženo několik variant zkušebního zařízení. Při návrhu bylo dbáno na jednoduchost zkušebního zařízení, možné pozdější úpravy, snadnou manipulaci a obsluhu. Byly navrženy tři varianty zkušebního zařízení. Od návrhu jedna a dvě bylo opuštěno z důvodu, že první návrh by byl složitě napojovaný na pneumatický obvod. Musely by se provést dodatečné úpravy, které by umožnily připevnění rychlospojky přes závit k tlakové nádobě. Působením tlaku by se deformovala tlaková nádoba a víko. U druhého návrhu bylo vyřešeno jednoduché napojení zkušebního zařízení k pneumatickému obvodu. Od tohoto návrhu bylo opuštěno z důvodu členitosti tvaru, který by komplikoval vlastní výrobu. Jako konečný návrh byl vybrán třetí návrh, byly vypracovány výrobní výkresy. Zkušební zařízení bylo vyrobeno z konstrukční oceli 11 523 firmou Laski s.r.o. Smržice. Při vypracování zkušebního zařízení byly voleny materiály a součásti, které jsou dostupné nebo normalizované.

14.3 Realizace měřícího zařízení

Celé zkušební zařízení bylo pomocí pneumatického obvodu napojeno na rozvod vzduchu ve školní laboratoři. Pro zjištění funkčnosti zařízení bylo provedeno zkušební měření na vzorcích z pryže. Pro ověřování funkčnosti zkušebního zařízení byla použita sada upínacích kroužků s otvorem $\varnothing 40$ mm.

Průběh zkoušky byl zaznamenán pomocí digitálního fotoaparátu. Ze snímků se odečte velikost tlaku z manometru a pomocí pomocných čar na vzorku se změřila délka a poloměr zaoblení. Ze získaných dat se vypočítalo skutečné napětí ve vzorku, smluvní napětí ve vzorku, poměrné prodloužení, protažení a tažnost.

Metoda a zkušební zařízení je vhodná pro využití ve školní laboratoři při výuce a při stanovení konstant pro hyperelastické modely.

Počítá se s pozdějším vývojem zkušebního zařízení v oblasti snímání průběhu nafukování vzorku. Vyvinutím softwaru který usnadní vyhodnocení měřené deformace.

Dále zdokonalení regulace tlaku aby se dalo měřit i cyklické zatěžování vzorku.

ZÁVĚR

Cílem práce bylo navrhnout zkušební metodu a zařízení pro určení materiálových charakteristik elastomerů a vypracovat kompletní výkresovou dokumentaci.

Pro návrh zkušební metody byla navržena metoda postupného nafukování zkušební vzorku vzduchem. Tato metoda byla vybrána z důvodu, že není náročná na přístrojové vybavení, je jednoduchá a měření je přesné.

Aby byl zadaný úkol co nejlépe vyřešen, bylo vypracováno několik návrhů zkušebního zařízení. Bylo dbáno na to, aby zkušební zařízení bylo co nejjednodušší. Ze tří konstrukčních návrhů byl vybrán návrh číslo 3, který byl rozpracován až do fáze výrobních výkresů, umožňujících jeho výrobu. Výroba byla realizována firmou Laski s. r. o. Smržice.

Pro ověření funkčnosti zařízení bylo provedeno zkušební měření pryžového vzorku.

Tuto metodu a zkušební zařízení je možné použít ve školní laboratoři pro měření materiálových charakteristik elastomerů.

Počítá se s dalším vývojem v oblasti snímání a regulace tlaku.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Chromá, B. Černý, F.: Materiály, SNTL 1984
- [2] Franta, I. a kol.: Zpracování kaučukových směsí a vlastnosti pryže, SNTL 1969
- [3] Mahlovský, J. Černý, J. Kobylík, L. Zapletal, J. : Příručka pro gumárenskou praxi, Praha 1974.
- [4] Kříž, R. Vávra, P: Strojírenská příručka – svazek 3, 5, 6, SCIENTIA spol. s. r. o, Praha 1993
- [5] Skácel, P. : Výpočtové a experimentální modelování deformačně napjatostních a mezních stavů elastomerů a jejich rozhraní s tuhými materiály, [Disertační práce], VUT v Brně 2004
- [6] ANSYS, INC.: Hyperelasticity. [online]. [cit. 2005-02-05]. Dostupný z URL:
< http://ansys.net/ansys/papers/nonlinear/conflong_hyperel.pdf>
- [7] MSC.SOFTWARE CORPORATION: Nonlinear finite element analysis of elastomers. [online]. [cit. 2005-02-05]. Dostupný z URL:
< http://www.mscsoftware.com/assets/103_elast_paper.pdf Text.
- [8] Jenčík, J. Volf, J. a kol. : Technická měření, [Skripta], Vydavatelství ČVUT Praha 2003t.
- [9] Meisner, B. Zilvar, V.: Fyzika polymerů, SNTL/ALFA1987
- [10] Svoboda, P. Brandejs, J. Prokeš, F. : Základy konstruování, [Skripta], Akademické nakladatelství CERM, s. r. o. Brno 2003.
- [11] Lukovics, I. : Konstrukční materiály a technologie, [Skripta], Nakladatelství VUT Brno 1991
- [12] Němec, D. : Základy výrobních technologií, [Skripta], UTB Zlín 2001Text.
- [13] Výroba, úprava, rozvod a použití stlačeného vzduchu, Katalog 2004 firmy Schneider Druckluft.
- [14] Pešina, E. Reif, P. Valenta, F. : Sbírka příkladů z pružnosti a pevnosti, SNTL/SVTL Praha 1964.

[15]Jankůj, R : Pneumatické prvky v pohonech robotů a manipulátorů,

[Bakalářská práce], VUT Brno 1998Text.

[16]Reuge, N. Schmidt, F. M: Polymer engineering and science, březen 2001, 41 číslo,
s. 522 – 531.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

A_0	průřez táhla
A_s	výpočtový průřez
C_{ij}	materiálové parametry
D_1	původní průměr vzorku
D	průměr zatěžované plochy
E	modul pružnosti v tahu materiálu
F	zatěžovací síla
G	modul pružnosti ve smyku materiálu
h	výška vzorku, upínacích kroužků
I_1, I_2, I_3	invarianty tenzoru deformace
J	objemový poměr
l_0	původní délka
l	délka v daném okamžiku
M	množina materiálových parametrů.
p	tlak
p_b	okamžitý barometrický tlak
P_s	suma radiálních sil
Δp	rozdíl tlaků
P_n	průměr sil normál na šířku a délku vzorku
r	poloměr
r_1	vnitřní poloměr mezikruží
r_2	vnější poloměr mezikruží
R_c	poloměr zaoblení
S	plocha

S_{ij}	druhý Piola- Kirchoffův napět'ový tenzor
t, e	tloušťka vzorku
t_0, e_0	původní tloušťka
Δu	napět'ový tenzor
V	objem
W	funkce hustoty deformační energie
α_i, μ_i	materiálové parametry
ϵ_E	poměrná deformace.
λ	poměrné protažení
$\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$	hlavní poměrná protažení
λ_i	hlavní protažení
σ	napětí
σ_r	radiální napětí
σ_t	tečné napětí
σ_{DOV}	dovolené namáhání
$\sigma_{\theta\theta}$	skutečné napětí
w_{max}	max průhyb

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1	Typický průběh závislosti napětí a deformace u pryže	15
Obr. 2	Základní složky protažení	16
Obr. 3	Elementární buňky a uspořádání molekulárních řetězů jednotlivých modelů elastomerů	21
Obr. 4	Zkouška jednoosého tahu	25
Obr. 5	Zkouška jednoosého tlaku	26
Obr. 6	Zkouška dvouosého napětí – kruh	27
Obr. 7	Zkouška dvouosého napětí – čtverec	28
Obr. 8	Zkouška čistého rovinného smyku	29
Obr. 9	Zkouška objemové stlačitelnosti	30
Obr. 10	Schéma zatěžování vzorku tlakem	36
Obr. 11	Deformace vzorku	37
Obr. 12	Schéma návrhu č. 1	40
Obr. 13	Schéma návrhu č. 2	41
Obr. 14	Konečný návrh zkušebního zařízení.....	42
Obr. 15	Schéma zatížení mezikruží tlakem	44
Obr. 16	Schéma působení tlaku	47
Obr. 18	Víko	48
Obr. 19	Upínací kroužky	49
Obr. 20	Řezání kulatiny	50
Obr. 21	Řezání kulatiny	50
Obr. 22	Zarovnání čela	50
Obr. 23	Vrtání na soustruhu	50
Obr. 24	Soustružení.....	51

Obr. 25 Vrtání.....	51
Obr. 26 a) Rychlospojka b) Vsuvka c) Odpouštěcí ventil d) T-kus	52
Obr. 27 Schéma zapojení pneumatického obvodu.....	53
Obr. 28 Schéma soustavy měřicího zařízení	54
Obr. 29 Rozměr a umístění pomocných čar pro výpočet.....	56
Obr. 30 Schéma upnutí vzorku.....	57
Obr. 30 Deformace vzorku - 0,12 MPa	58
Obr. 31 Deformace vzorku - 0,2 MPa.....	58
Obr. 32 Deformace vzorku - 0,24 MPa	58
Obr. 33 Deformace vzorku - 0,26 MPa	58
Obr. 34 Deformace vzorku - 0,28 MPa	58
Obr. 35 Destrukce vzorku	58
Obr. 36 Závislost snímaných veličin	61
Obr. 37 Závislost smluvního napětí na protažení	61

SEZNAM TABULEK

Tab. I	Elastomery.....	12
Tab. I	Převodní koeficienty.....	31
Tab. III	Naměřené a vypočítané hodnoty.....	59

SEZNAM PŘÍLOH

- P I. Tlaková nádoba
- P II. Víko
- P III. Upínací kroužek vrchní – 50
- P IV. Upínací kroužek vrchní – 45
- P V. Upínací kroužek vrchní – 40
- P VI. Upínací kroužek spodní - 50
- P VII. Upínací kroužek spodní – 45
- P VIII. Upínací kroužek spodní – 40
- P IX. Rozpěrka
- P X.. Zkušební zařízení
- P XI. Výkresová dokumentace
- P XII. CD disk

Příloha P I. Tlaková nádoba

Technologický postup		
Název součásti: Tlaková nádoba		Číslo výkresu: DP-02-06-05/02
Materiál: 11 523		Rozměr polotovaru: ø 145 x 45
Číslo operace	Označení stroje	Popis
010	GA 300	Řezat na L = 45
020	SM 50 B	Soustružit – zarovnat čelo - středit pro vrtání - vrtat ø 16 do L = 30 - soustružit ø 140 do L = 25 - soustružit ø 100 do L = 10 - soustružit ø 50 do L = 2,3 - soustružit ø 92 šířka 4 do L = 2,3
030	SM 50 B	Přepne - upne za ø 140 - soustružit ø 140 vše na L = 40
040	VS 32 B	Vrtat – ø 4,8 do hloubky 20, 60° - 6x , odjehlit Vrtat – ø 20 do hloubky 1, pro vrtání podle výkresu Vrtat – ø 13 do hloubky 70 Vrtat – ø 15,2 do hloubky 12
050		Řeže závit M6 do L = 17 - 6x Řeže závit G 3/8“ do L = 12
060		Zinkovat – Fe/Zn 15C

Příloha II. Víko

Technologický postup		
Název součásti: Víko		Číslo výkresu: DP-02-06-05/01
Materiál: 11 523		Rozměr polotovaru: ø 145 x 23
Číslo operace	Označení stroje	Popis
010	GA 300	Řezat na L = 23
020	SM 50 B	Soustružit – zarovnat čelo - středit pro vrtání - vrtat ø 80 - soustružit ø 140 do L = 13 - točit ø 100 do L = 15, srazit hranu 0.5x 45°
030	SM 50 B	Přepne - upne za ø 140 - soustružit ø 140 na L = 20
040	VS 32 B	Vrtat – ø 6,4, 60° - 6x , odjehlit Zahloubit – ø 11 do hloubky 6,6 – 6x, odjehlit
050		Zinkovat – Fe/Zn 15C

Příloha P III. Upínací kroužek vrchní – 50

Technologický postup		
Název součásti: Upínací kroužek vrchní - 50		Číslo výkresu: DP-02-06-05/03-50
Materiál: 11 523		Rozměr polotovaru: $\varnothing$ 105 x 10
Číslo operace	Označení stroje	Popis
010	GA 300	Řezat na L = 10
020	SM 50 B	Soustružit – zarovnat čelo - středit pro vrtání - vrtat $\varnothing$ 50 do L = 10 - soustružit tvar podle výkresu, srazit hranu - soustružit $\varnothing$ 100 do L = 10 - upichnout L = 5,5
030	SM 50 B	Přepne - zarovná čelo L = 4,5 - srazit hranu - zhotovit sražení 20° do hloubky 2,5
040		Zinkovat – Fe/Zn 15C

Příloha P IV. Upínací kroužek vrchní – 45

Technologický postup		
Název součásti: Upínací kroužek vrchní - 45		Číslo výkresu:DP-02-06-05/03-45
Materiál: 11 523		Rozměr polotovaru: ø 105 x 10
Číslo operace	Označení stroje	Popis
010	GA 300	Řezat na L = 10
020	SM 50 B	Soustružit – zarovnat čelo - střídit pro vrtání - soustružit tvar podle výkresu, srazit hranu - soustružit ø 100 do L = 10 - upíchnout L = 5,5
030	SM 50 B	Přepne - zarovná čelo L = 4,5 - srazit hranu - zhotovit sražení 20° do hloubky 2,5
040		Zinkovat – Fe/Zn 15C

Příloha P V. Upínací kroužek vrchní – 40

Technologický postup		
Název součásti: Upínací kroužek vrchní - 40		Číslo výkresu:DP-02-06-05/03-40
Materiál: 11 523		Rozměr polotovaru: ø 105 x 10
Číslo operace	Označení stroje	Popis
010	GA 300	Řezat na L = 10
020	SM 50 B	Soustružit – zarovnat čelo - středit pro vrtání - vrtat ø 45 do L = 10 - soustružit tvar podle výkresu, srazit hranu - soustružit ø 100 do L = 10 - upíchnout L = 5,5
030	SM 50 B	Přepne - zarovná čelo L = 4,5 - srazit hranu - zhotovit sražení 20° do hloubky 2,5
040		Zinkovat – Fe/Zn 15C

Příloha P VI. Upínací kroužek spodní -50

Technologický postup		
Název součásti: Upínací kroužek spodní -50		Číslo výkresu:DP-02-06-05/04-50
Materiál: 11 523		Rozměr polotovaru: ø 105 x 10
Číslo operace	Označení stroje	Popis
010	GA 300	Řezat na L = 10
020	SM 50 B	Soustružit – zarovnat čelo - středit pro vrtání - vrtat ø 50 do L = 10 - soustružit tvar podle výkresu, srazit hranu - soustružit ø 100 do L = 10 - upíchnout L = 5,5
030	SM 50 B	Přepne - zarovná čelo L = 4,5 - srazit hranu
040		Zinkovat – Fe/Zn 15C

Příloha P VII. Upínací kroužek spodní – 45

Technologický postup		
Název součásti: Upínací kroužek spodní -45		Číslo výkresu:DP-02-06-05/04-45
Materiál: 11 523		Rozměr polotovaru: ø 105 x 10
Číslo operace	Označení stroje	Popis
010	GA 300	Řezat na L = 10
020	SM 50 B	Soustružit – zarovnat čelo - středit pro vrtání - vrtat ø 45 do L = 10 - soustružit tvar podle výkresu, srazit hranu - soustružit ø 100 do L = 10 - upíchnout L = 5,5
030	SM 50 B	Přepne - zarovná čelo L = 4,5 - srazit hranu
040		Zinkovat – Fe/Zn 15C

Příloha P VIII. Upínací kroužek spodní – 40

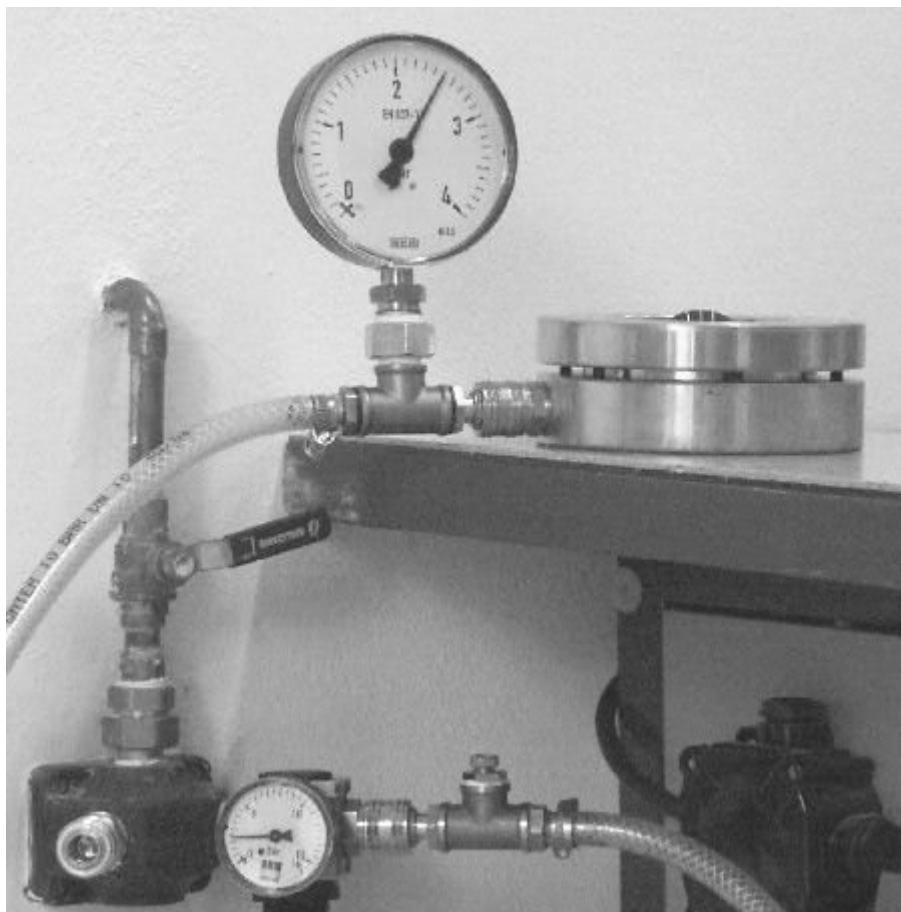
Technologický postup		
Název součásti: Upínací kroužek spodní -40		Číslo výkresu:DP-02-06-05/04-40
Materiál: 11 523		Rozměr polotovaru: ø 105 x 10
Číslo operace	Označení stroje	Popis
010	GA 300	Řezat na L = 10
020	SM 50 B	Soustružit – zarovnat čelo - středit pro vrtání - vrtat ø 45 do L = 10 - soustružit tvar podle výkresu, srazit hranu - soustružit ø 100 do L = 10 - upichnout L = 5,5
030	SM 50 B	Přepne - zarovnat čelo L = 4,5 - srazit hranu
040		Zinkovat – Fe/Zn 15C

Příloha P IX. Rozpěrka

Technologický postup		
Název součásti: Rozpěrka		Číslo výkresu: DP-02-06-05/05
Materiál: 11 523		Rozměr polotovaru: $\varnothing$ 100 x 7
Číslo operace	Označení stroje	Popis
010	GA 300	Řezat na L = 7
020	SM 50 B	Točit – zarovnat čelo - střídit - navrtat - vrtat $\varnothing$ 90 do L = 7 - upíchnout L = 1,5
030		Zinkovat – Fe/Zn 15C

Příloha P X. Zkušební zařízení

Napojení zkušebního zařízení k rozvodu vzduchu pomocí pneumatického obvodu.

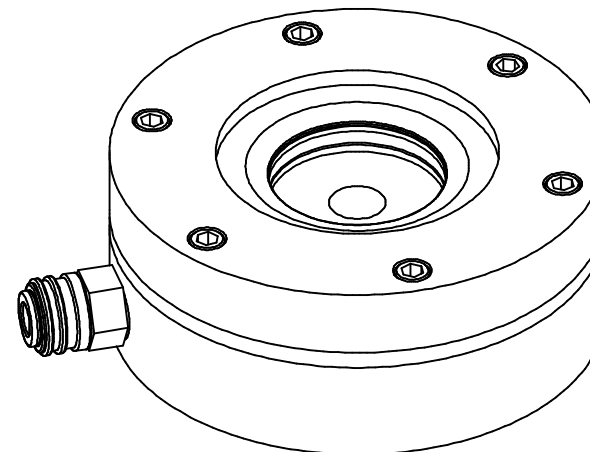
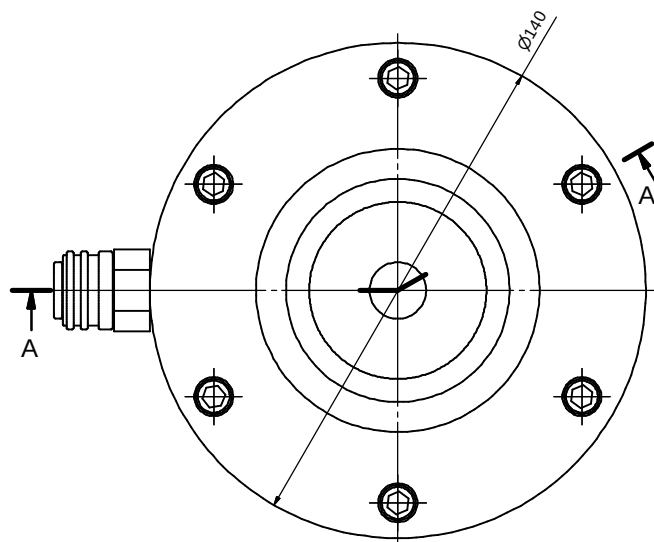
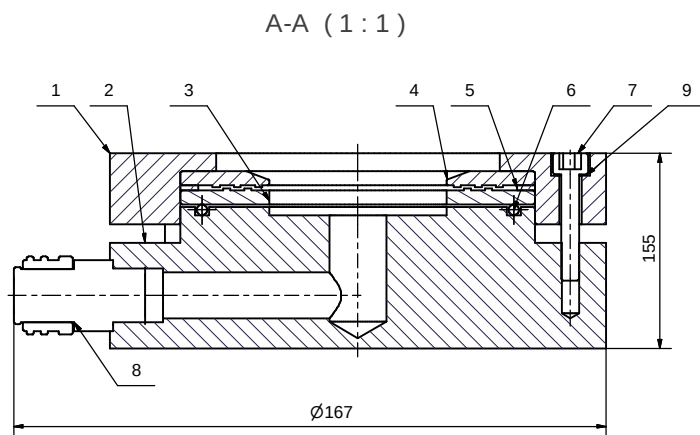


Příloha P XI. Výkresová dokumentace

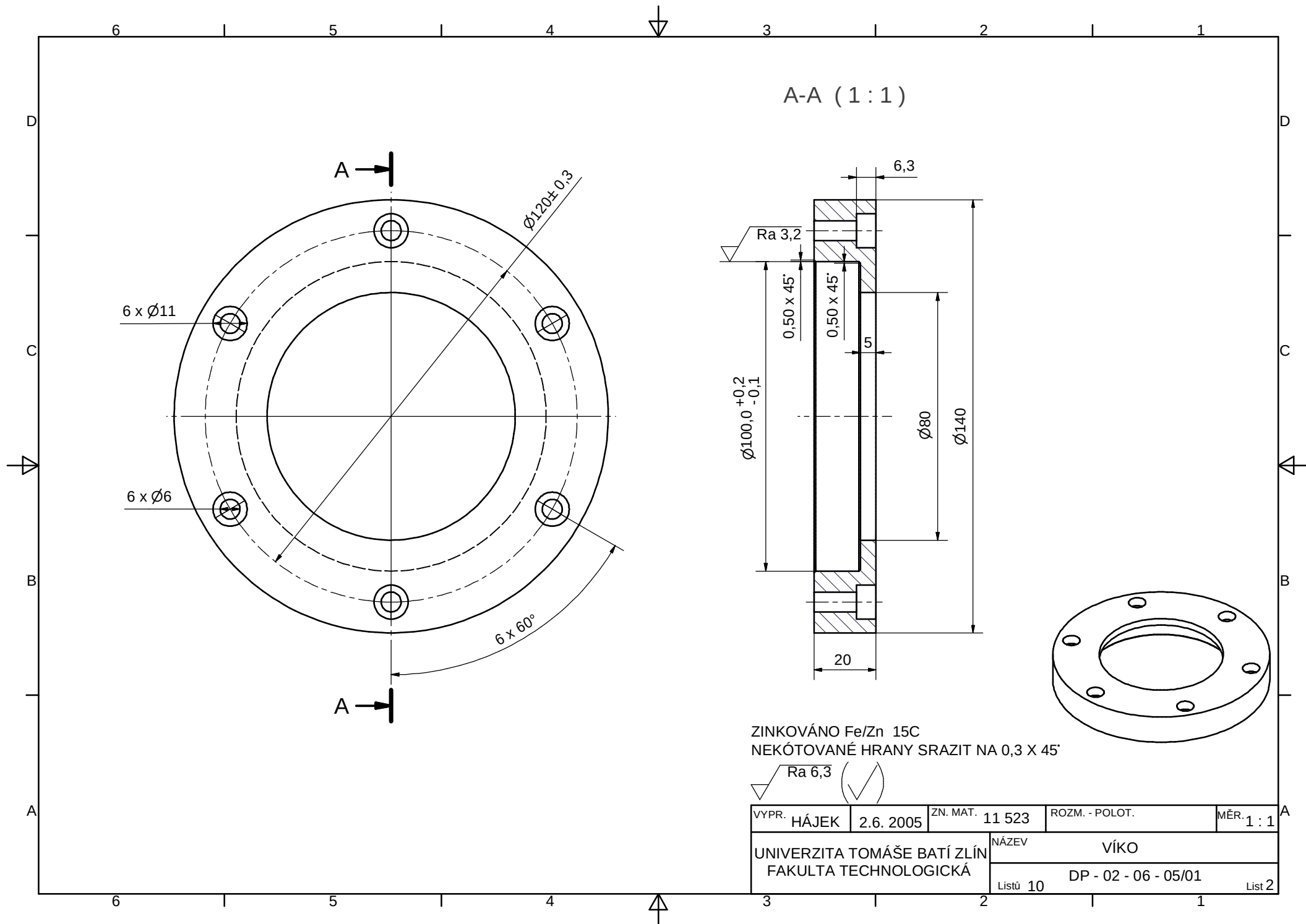
Výrobní dokumentace byla nakreslena v programu Autodesk Inventor 6.

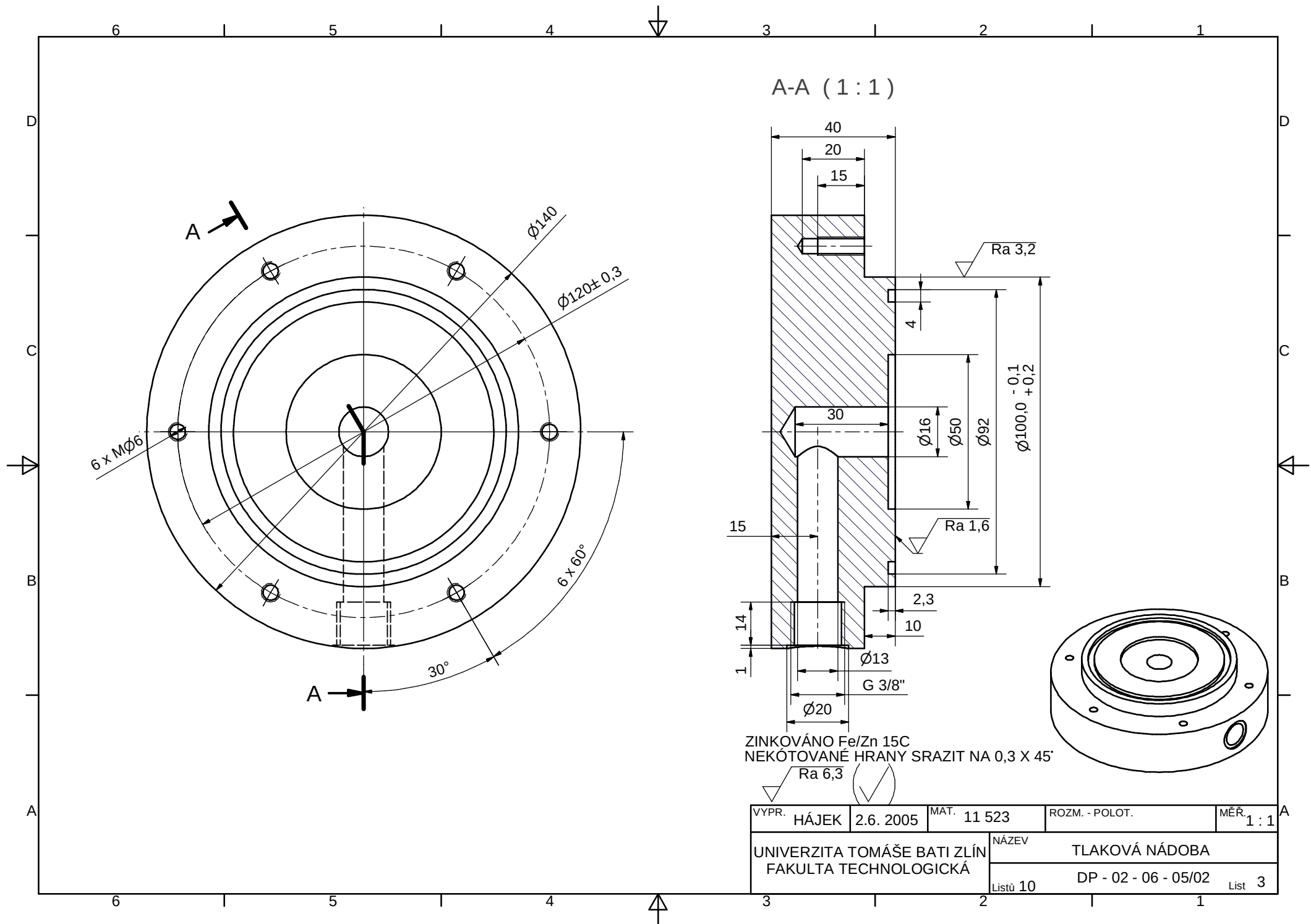
Seznam výkresové dokumentace

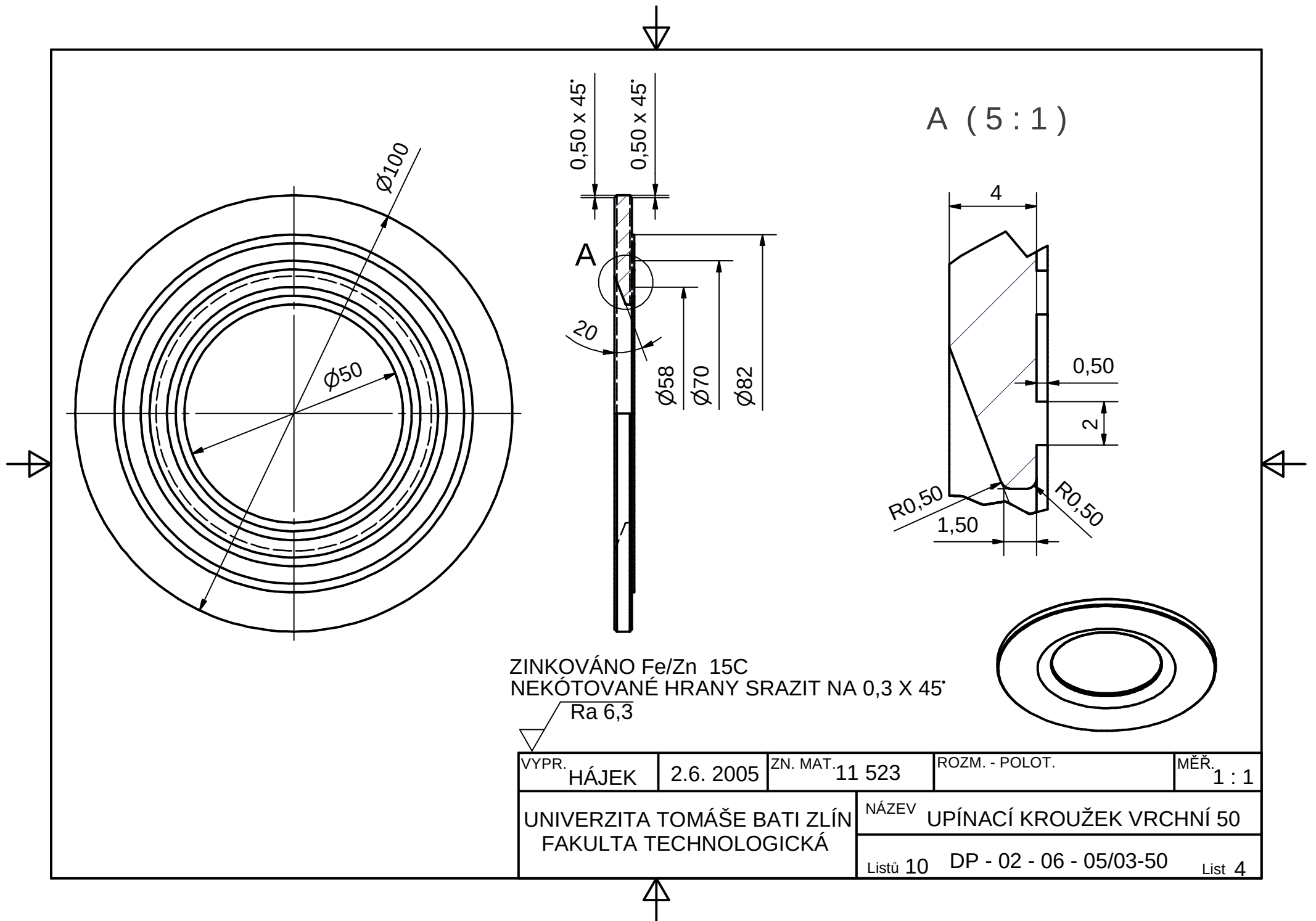
DP - 02 - 06 – 05.....	ZKUŠEBNÍ ZAŘÍZENÍ
DP - 02 - 06 - 05/01	VÍKO
DP - 02 - 06 - 05/02	TLAKOVÁ NÁDOBA
DP - 02 - 06 - 05/03 - 40	UPÍNACÍ KROUŽRK VRCHNÍ 40
DP - 02 - 06 - 05/03 –45.....	UPÍNACÍ KROUŽRK VRCHNÍ 45
DP - 02 - 06 - 05/03 - 50	UPÍNACÍ KROUŽRK VRCHNÍ 50
DP - 02 - 06 - 05/04-40	UPÍNACÍ KROUŽEK SPODNÍ 40
DP - 02 - 06 - 05/04-45	UPÍNACÍ KROUŽEK SPODNÍ 45
DP - 02 - 06 - 05/04-50	UPÍNACÍ KROUŽEK SPODNÍ 50
DP - 02 - 06 - 05/05.....	ROZPĚRKA

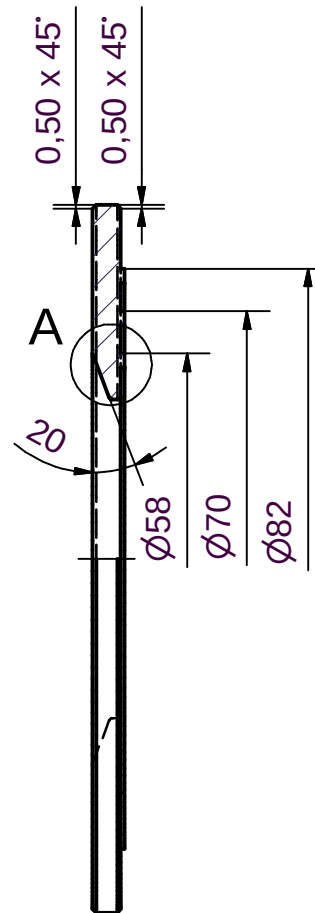
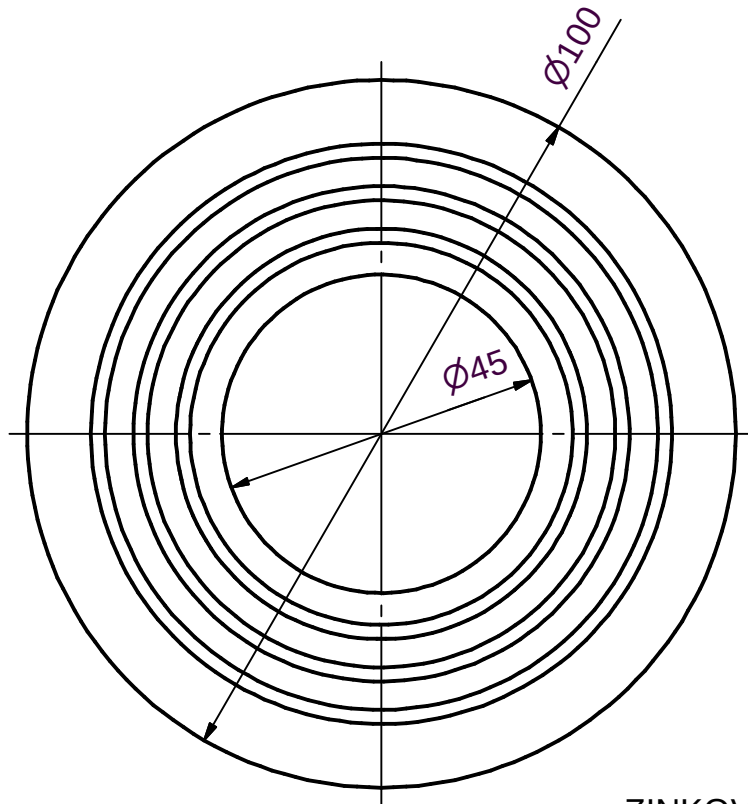


Parts List					
Po	Ks	Název	Výkres - norma	Materiál	Poznámka
1	1	Víko	DP-02-06-05/01	11 523	Zinkováno Fe/Zn 15C
2	1	Tlaková nádoba	DP-02-06-05/02	11 523	Zinkováno Fe/Zn 15C
3	1	Upínací kroužek vrchní-50	DP-02-06-05/03-50	11 523	Zinkováno Fe/Zn 15C
4	1	Upínací kroužek spodní-50	DP-02-06-05/04-50	11 523	Zinkováno Fe/Zn 15C
5	1	Rozpěrka	DP-02-06-05/05	11 523	Zinkováno Fe/Zn 15C
6	1	Těsnění 85x3	ČSN 029281	-	
7	6	Šroub M6x 35	ČSN 021143	-	
8	1	Rychlospojka R 3/8"	E 700 002	-	S vnějším závitem R 3/8"
9	6	Podložka	ČSN 021740	-	
INDEX		UNIVERZITA TOMÁŠE BATI ZLÍN FAKULTA TECHNOLOGICKÁ			
ZMĚNA					
ZN. MAT.					
ROZM. - POLOŽ.		HMOTNOST kg		MĚŘ.	
Č. POM. ZAŘ.				1 : 1	
VYPR. HÁJEK		NORM. REF.		PZN.	
PŘEZK.				Č. KUSOVNÍKU	
TECHNOL.		SCHVÁLIL		STARÝ V.	
		2.6. 2005		Č. V.	
NÁZEV		ZKUŠEBNÍ ZAŘÍZENÍ		DP - 02 - 06 - 05	
		Listů 10		List 1	

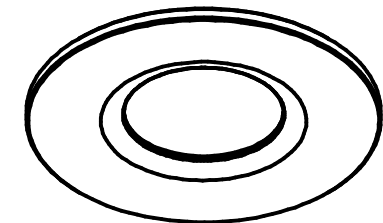
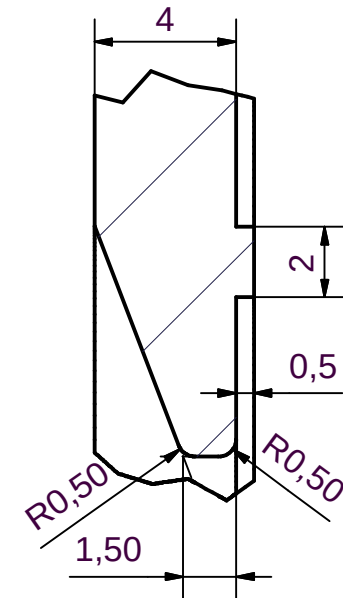








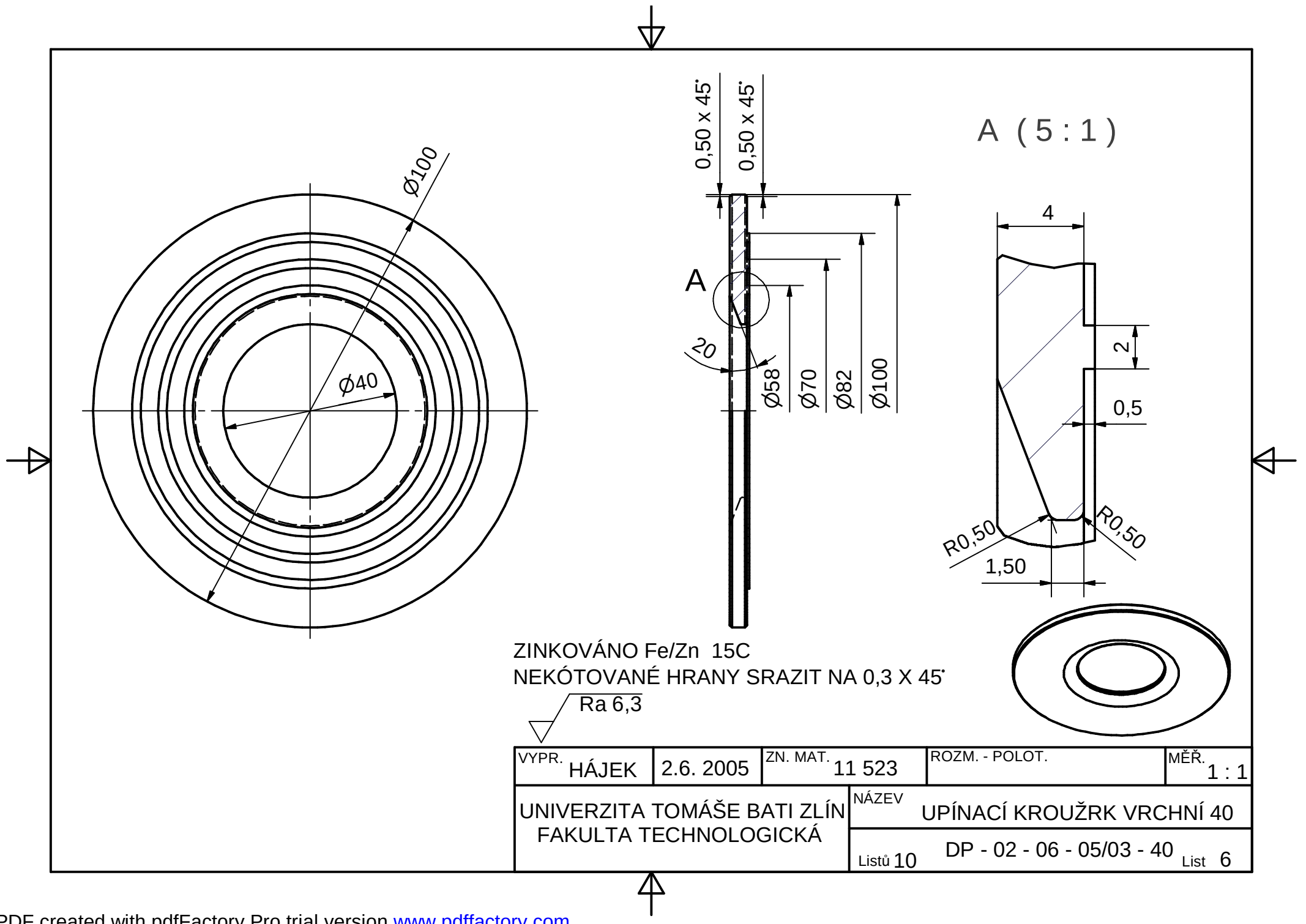
A (5 : 1)



ZINKOVÁNO Fe/Zn 15C
NEKÓTOVANÉ HRANY SRAZIT NA 0,3 X 45°

Ra 6,3

VYPR.	HÁJEK	2.6. 2005	ZN. MAT.	11 523	ROZM. - POPOT.	MĚŘ.	1 : 1
UNIVERZITA TOMÁŠE BATI ZLÍN					NÁZEV UPÍNACÍ KROUŽEK VRCHNÍ 45		
FAKULTA TECHNOLOGICKÁ					DP - 02 - 06 - 05/03 - 45		
Listů 10					List 5		



ZINKOVÁNO Fe/Zn 15C
NEKÓTOVANÉ HRANY SRAZIT NA $0,3 \times 45^\circ$

$Ra 6,3$

VYPR. HÁJEK	2.6. 2005	ZN. MAT. 11 523	ROZM. - POLOT.	MĚŘ. 1 : 1
UNIVERZITA TOMÁŠE BATI ZLÍN		NÁZEV UPÍNACÍ KROUŽEK VRCHNÍ 40		
FAKULTA TECHNOLOGICKÁ		Listů 10 DP - 02 - 06 - 05/03 - 40 List 6		

