

Konstrukce přípravku pro analýzu smykové napjatosti elastomerů

Ondřej Dlouhý

Bakalářská práce
2008

 Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce byla vypracována na téma: „Konstrukce přípravku pro analýzu smykové napjatosti elastomerů.“

Cílem této práce bylo navrhnout a zkonstruovat čelisti pro zkoušení elastomerních materiálů a vyhodnotit funkčnost čelistí, zda vyhovují všem požadavkům.

V první části teorie nás práce obeznámí s pojmem „elastomery“ a vysvětlí zákonitosti jejich mechanického chování. V další části se práce věnuje zkoušení elastomerů, typům zkušebních čelistí, druhům zkoušek a jejich podstatě.

V praktické části se navržené čelisti kontrolují a je popsán průběh zkoušky, při které byly čelisti otestovány.

V příloze práce se nachází výrobní výkresy navržených čelistí.

ABSTRACT

This work was elaborated on the topic: „Construction of preparation for analyse shear tensiity of elastomers.“

Object of this work was make a suggestion and construction of grips for testing elastomers and evaluate it whether it complies with the given requirements.

In the first part of theory the work apprise us with the conception „elastomers“ and explain patterns of their mechanical behaviour. The next part of the work is testing elastomers, kinds of tests and their principle.

In the practical part the designed grips are controlled and the process of testing is described.

In the supplement of the work are drawings of proposed grips.

Poděkování

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

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

Ve Zlíně, 29.8.2008

.....
podpis

OBSAH:

ÚVOD	7
I. TEORETICKÁ ČÁST	9
1. ELASTOMERY	10
1.1 KAUKČUKOVÉ SMĚSI	10
1.1.1. Přírodní kaučuky	12
1.1.2. Syntetické kaučuky	13
1.2. VULKANIZACE KAUKČUKOVÝCH SMĚSÍ	13
2. ELASTICITA KAUKČUKŮ	15
2.1. IDEÁLNÍ ELASTICITA	16
2.2. KAUKČUKOVÁ ELASTICITA	16
3. MECHANICKÉ CHOVÁNÍ ELASTOMERŮ	17
3.1. VLASTNOSTI HYPERELASTICKÝCH MATERIÁLŮ	17
3.1.1. Obecná teorie velkých elastických deformací	18
3.1.2. Obecný vztah mezi napětím a deformací	18
4. VÝPOČTOVÉ MODELOVÁNÍ DEFORMAČNĚ NAPĚŤOVÉHO CHOVÁNÍ ELASTOMERŮ	19
5. NAMÁHÁNÍ TĚLES SMYKEM	24
6. ZKOUŠENÍ HYPERELASTICKÝCH MATERIÁLŮ	26
6.1. STATICKÉ ZKOUŠENÍ ELASTOMERŮ	27
6.2. TYPY ČELISTÍ PRO UPÍNÁNÍ VZORKŮ	27
7. STANOVENÍ TAHOVÝCH VLASTNOSTÍ PRYŽE DLE NORMY ČSN ISO 37	28
7.1. NORMA ČSN ISO 37	28
7.2. TERMÍNY A DEFINICE OBSAŽENÉ V NORMĚ	28
7.3. PODSTATA ZKOUŠKY	30
7.4. ZKUŠEBNÍ TĚLESA	32
7.4.1. Zkušební tělesa tvaru oboustranných lopatek	32
7.4.2. Zkušební tělesa tvaru kroužků	33
7.5. ZKUŠEBNÍ ZAŘÍZENÍ	34
7.5.1. Vysekávací a vyřezávací nože	34
7.5.2. Tloušťkoměr	34
7.5.3. Kuželový kalibr	34
7.5.4. Trhací stroj	36

7.6. PŘÍPRAVA ZKUŠEBNÍCH TĚLES	36
7.7. POSTUP ZKOUŠKY	36
7.7.1. Zkušební tělesa tvaru oboustranných lopatek	36
7.7.2. Zkušební tělesa tvaru kroužků.....	37
7.8. VYJÁDŘENÍ VÝSLEDKŮ	37
II. PRAKTICKÁ ČÁST	38
8. CÍL PRAKTICKÉ ČÁSTI	39
9. KONTROLA NAVRŽENÝCH ČELISTÍ	39
9.1. VÝPOČET DOVOLENÉHO ZATÍŽENÍ ČELISTÍ V TAHU.....	40
9.2. VÝPOČET DOVOLENÉHO ZATÍŽENÍ ŠROUBŮ VE STŘIHU.....	41
10. ZKUŠEBNÍ STROJ ZWICK	42
11. ZKUŠEBNÍ VZOREK	43
12. PRŮBĚH ZKOUŠKY	43
13. VÝSLEDEK ZKOUŠKY-TAHOVÁ KŘIVKA	47
14. ZÁVĚR	47
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	49
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	50
SEZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKŮ	52
SEZNAM POUŽITÝCH TABULEK	53
SEZNAM PŘÍLOH	54

ÚVOD:

Elastomery, nyní též označované jako hyperelastické materiály, tvoří speciální třídu polymerů, která zahrnuje přírodní a syntetické pryže. Původně slovo pryž (rubber) znamenalo materiál získaný z kaučukodárných rostlin, to znamená především ze stromů *Hevea Braziliensis* ve formě latexu čepovaného z pod kůry, dále pak *Guayula (Parthenium Argentatum)*, která obsahuje kaučuk v celých rostlinách, následuje *Zlatobýl*, obsahující kaučuk v listech a další rostliny jako *Tau-sagyz*, *Kok-sagyz* a *Krym-sagyz*. V současné době se termín pryž používá pro všechny materiály mající mechanické vlastnosti stejné, jako přírodní pryž. Takové materiály jsou obvykle nazývány elastomery.

Hyperelastické materiály mají široké použití v inženýrství jako nárazové a dopadové absorbéry energie, izolátory, tlumiče vibrací, nebo výrobky nepropouštějící olej a vodu, těsnící prvky a v neposlední řadě dominantní odvětví oblasti pryže a to výroba pneumatik. Stále vzrůstající užití pryží ve strojírenství vyžaduje přesnější analýzy pro předpověď chování komplexního systému obsahujícího pryžové komponenty. Pro tyto komplexní charakteristiky je velmi důležité zejména určení mechanických vlastností pryžových materiálů.

Kaučuk samotný však nevykazuje uvedené mechanické vlastnosti, k jejich získání dochází při procesu nazývaném vulkanizace. Základy vulkanizace souvisí s objevem Ch. Goodyeara z roku 1839. Dříve se používaly nevulkanizované kaučuky. První poznatky byly získané z roztoku kaučuku a terpentýnové silice obsahující síru, kterým byly impregnovány textilie. Goodyear a s ním i Hancock objevili, že zahříváním dochází k významným změnám vlastností. Tím byl odstartován proces vývoje a objevů ve vulkanizaci. Vulkanizace je děj, při kterém vznikají v kaučukové směsi pevné chemické vazby mezi jednotlivými řetězovými molekulami za pomoci vulkanizačních činidel, nejčastěji je tímto činidlem síra.

Jelikož mají elastomerní materiály výrazně odlišné vlastnosti než kovy a jiné materiály, vyžadují také použití speciálních postupů zkoušení mechanických vlastností a vyhodnocení vztahů pro tahové a tlakové zatížení, pro které nelze aplikovat Hookův zákon z důvodu jejich výrazné nelinearity při namáhání. Aby bylo možné aproximovat chování těchto materiálů pod působením určitého napětí a při určitých deformacích, byla vytvořena řada materiálových

modelů založených na napěťovém energetickém potenciálu, které jsou pro vyhodnocování charakteristických vlastností elastomerů nezbytně nutné.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1. ELASTOMERY

1.1. Kaučukové směsi

Dříve, než chceme přistoupit k sestavování směsi pro určitý výrobek, musí být jasné a skutečně konkrétně zjištěno, jaké vlastnosti má výrobek mít, za jakých podmínek bude používán a jakým způsobem může být vyroben – to jsou hlediska technická, ale nutno i uvážit, jaké suroviny jsou k dispozici a konečně jaká může být i jeho cena – tedy důvody ekonomické.

Rozmanitost požadavků kladených na výrobky vede k používání značného počtu směsí. Při ustálené masové výrobě (např. výroba pneumatik, obuvi, hraček, míčů, atd.) se používá pravidelně směsí vypracovaných jen pro daný účel. U výroby různorodé nebo dokonce zlomkové je účelné vypracovat vhodně volenou typovou řadu směsí a tyto přehledně klasifikovat. Ze směsí se pak vybírá vhodná dle požadavků výrobku a vyrábí se tedy z jedné směsi více různých výrobků.

Recepty, které jsou ve výrobě, je třeba přepracovávat. Změny běžných receptů se provádí z různých důvodů (nedostatek některé suroviny, změna požadavků na výrobek, objevení se nových surovin apod.). V poslední době, kdy je pryž stále více používána jako konstrukční materiál, přichází požadavky tak přesně zformulované, že je třeba i na malé série sestavovat recepty nové.

Kaučuková směs obsahuje pravidelně tyto složky:

- 1) Elastomer (kaučuk přírodní nebo syntetický – popis viz. níže)
- 2) Plastikační činidla

Používají se pro prvotní zpracování kaučuku důkladným hnětením, tzv. plastikací. Činidla usnadňují štěpení makromolekul při hnětení a stabilizují vznikající radikály (proto se též používají při opětovném zpracování odpadní pryže, tzv. regenerátu).

- 3) Vulkanizační činidla

Jsou to látky umožňující síťování kaučukových řetězců. Nejdůležitějším vulkanizačním činidlem je síra. Do kaučuku se zamíchává jako prášková nebo v předsměsi.

4) Urychlovače vulkanizace

Usnadňují chemickou reakci mezi sírou a kaučukem a tak umožňují dávkovat síru přesně ve vypočteném množství. Vulkanizační doba se může v přítomnosti urychlovačů zkrátit na minimum a také vulkanizační teplota se může snížit na hodnotu odpovídající kritické teplotě urychlovače. Použití urychlovačů tedy přináší značné energetické úspory při vulkanizaci.

5) Aktivátory a retardéry vulkanizace

Většina urychlovačů vyžaduje přítomnost aktivátorů, které umožňují jejich plnou účinnost při vulkanizaci. Aktivační účinek mají oxidy některých kovů a mastné kyseliny, schopné převádět tyto oxidy na sloučeniny dobře rozpustné v kaučuku.

Retardéry potlačují působení urychlovačů v první fázi vulkanizace a zabraňují tak samovolné vulkanizaci při skladování nebo zpracování směsi.

6) Antidegradanty

Skupina přísad, které dlouhodobě chrání výrobky před vnějšími vlivy během jejich života. Rozdělují se na:

- Světelné stabilizátory
- Antioxidanty
- Antiozonanty

7) Plniva

Upravují mechanické vlastnosti pryže a snižují spotřebu kaučuku. Rozdělují se na ztužující a neztužující. Plniva jsou modifikátorem gumárenské směsi, který nejvíce ovlivňuje mechanické vlastnosti hotového výrobku.

8) Změkčovadla

Těkavé organické látky poskytující polymerům ohebnost, měkkost, vláčnost, snižují T_G a viskozitu taveniny směsi .

9) Faktisy

Slouží ke zlepšení hladkosti povrchu, pro přesnější dodržení tvaru a zlepšení dalších vlastností kaučukových směsí.

10) Pigmenty

Slouží k dosažení požadovaného zbarvení pryže.

11) Zvláštní přísady

Jsou používány pouze pro některé druhy směsí za účelem získání speciálních vlastností pryže.

První úvaha při sestavování receptu platí vždy při volbě elastomeru, v dnešní době máme k dispozici mnoho druhů přírodního kaučuku a také kaučuk syntetický jak pro všeobecné, tak i speciální účely. Speciálních druhů kaučuků se používá jen tam, kde se má docílit některé zvláštní vlastnosti ve vysoké míře (vyšší odolnost proti botnání, vysoké teploty, proti ozónu, atd.).

1.1.1. Přírodní kaučuky

Při výběru druhů přírodního kaučuku se hodnotí kvalita, pravidelnost, čistota a cena. Nejběžnějším druhem je plantážový uzemý kaučuk – smoked sheet (RSS). Tento kaučuk lze prakticky využít ve všech případech, kde se volí přírodní kaučuk., s jímkou bílých směsí. Smoked sheet se využívá např. na výrobu pneumatik, duší, nití, masek, chirurgické pryže, tenkostěnného zboží, potravinářské pryže, atd.).

Dalším druhem přírodního kaučuku vysoké kvality je světlá krepa (thin a thick latex crepe). Její cena je vždy vyšší než RSS a používá se jí v daleko menší míře. Světlá (někdy také nazývaná bílá) krepa se používá pro pryž bílou nebo světlou v čistých pastelových tónech a pro pryž transparentní.

Dobrym druhem jsou také některé kaučuky Blanket a lze je v mnoha případech použít místo RSS. Blanket ale není tak pravidelný jako RSS v čistotě, barvě, plasticitě a vulkanizačních vlastnostech.

Dalšími druhy jsou např. scraps, bar krepa apod. Tyto druhy jsou však podřadné a před použitím se perou nebo homogenizují, čímž se získá produkt podobný blanketu, protože se jich používá přímo do podřadných výrobků, jako jsou např. těsnící desky, podklady kobereců, stelky a některé lisované zboží.

Přírodní kaučuk se volí v případech, kdy je třeba vysoké kvality pryže, i v neplněných směsích, světlých směsích pro výrobky transparentní, pro výrobky vyžadující malé trvalé deformace, nízké hysterézní ztráty, odolnost proti nízkým teplotám, pevnost při vyšších teplotách a konfekční lepidlost.

1.1.2. Syntetické kaučuky

Ze syntetických kaučuků u nás přicházejí v úvahu kaučuk butadienstyrenový, případně kaučuk polybutadienový. Tyto kaučuky je možno použít ve všech případech, které v předchozím bodě nebyly vyhrazeny pro přírodní kaučuk, tedy tam, kde se nepožaduje vysoká rezistence, nízká trvalá deformace, konfekční lepivost. Tyto kaučuky se nehodí pro světlé směsi, protože obsahují pravidelně stabilizátor, který na světle tmavne a dále proto, že tyto druhy syntetických kaučuků mají velmi špatné fyzikální vlastnosti ve směsích bez sazí. Kaučuk butadienstyrenový a polybutadienový nelze vůbec použít ve směsích tzv. para jakosti. Z butadienstyrenového a polybutadienového kaučuku se vyrábí podrážky, podpatky, hadice, dopravní pásy a většina lisovaného a stříkaného zboží. Vhodný není butadienstyrenový kaučuk např. pro nárazníky, kde se mimo dobrých dynamických vlastností požaduje dobrá pevnost za tepla a dobrá adheze ke kostře a běhounu. Také do duší se tento kaučuk málo používá, protože snižuje jejich strukturní pevnost.

Přírodní kaučuk a butadienstyrenový kaučuk se velmi často v různém poměru míchají. Důvody k míchání mohou být různé, např. zlepšení konfekční lepivosti, snížení nežádoucí lepivosti přírodního kaučuku, upravení stříkatelnosti nebo tažení fasunku z bunových směsí, potlačení praskání výrobku při vyjímání z forem za tepla, někdy nedostatek přírodního kaučuku a také cena výrobku.

Ostatní druhy syntetického kaučuku mají vyhraněný charakter a dle toho jsou používány, jsou to zejména chloroprenový, polysulfidový a isobutylénový kaučuk. Chloroprenový kaučuk je nehořlavý a používá se pro středně odolné směsi vůči botnání, s dobrou odolností při nízkých teplotách (letecký průmysl). Polysulfidové kaučuky (thiokoly) se používají pro směsi s nejvyšším stupněm odolnosti vůči botnání (např. pro aromatické uhlovodíky). Isobutylénový kaučuk se používá v případech, kdy se vyžaduje od pryže vysoká nepropustnost vůči plynům a odolnost proti chemickým činidlům a to i oxidačním. Typickými výrobky jsou autoduše, ochranné oděvy, obkládání nádrží a armatur v chemickém průmyslu.

1.2. Vulkanizace kaučukových směsí

Zahříváním kaučukové směsi na vhodnou teplotu dojde za určitou dobu k její vulkanizaci. Při ní probíhají chemické reakce mezi kaučukem a dalšími složkami kaučukové směsi a koncentrace vulkanizačního činidla přitom postupně klesá až na téměř nulovou hodnotu.

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

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

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

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

Především koncentrací příčných vazeb a do značné míry i jejich chemickou strukturou jsou určovány vlastnosti pryže, které však také závisí na vedlejších produktech vulkanizace. V příčných vazbách je totiž běžně zabudována jen část vulkanizačního činidla. Jeho další podíl bývá vázán pouze na jeden řetěz sítě a vytváří na něm tzv. modifikace. Kromě toho jistá část vulkanizačního systému vytváří v průběhu vulkanizace směs řady sloučenin, které nejsou na kaučukové řetězce vázány vůbec a většinou také ovlivňují vlastnosti pryže, zejména její odolnost vůči vnějšímu prostředí (teplu, kyslíku, ozonu, mechanickému namáhání atd.).

Vytvořením prostorové sítě se zamezí volné pohyblivosti původních kaučukových makromolekul, a tím také toku ve hmotě. To se projeví typickými změnami vlastností kaučuku, resp. kaučukové směsi, především:

- vulkanizací mizí rozpustnost kaučuku. V rozpouštědlech vulkanizát pouze botná. Botnání se zastavuje při určitém poměru mezi množstvím kaučuku a rozpouštědla. Dostavuje se rovnováha, která je závislá především na stupni sesít'ování kaučuku.

Proto lze stanovením rovnovážného stupně zbotnění pryže stanovit stupeň její vulkanizace (sesíťování).

- se vzrůstajícím stupněm vulkanizace významně vzrůstá pevnost kaučuku až do určité hodnoty; po jejím překročení pevnost pryže klesá, vzrůstá však nadále její tvrdost. S postupující vulkanizací po počátečním vzrůstu klesá tažnost pryže. Platí zde jednoduché obecné pravidlo, že největší pevnost mají vulkanizáty při tažnosti 500% - 700%.
- se vzrůstajícím stupněm vulkanizace se zlepšuje odolnost proti trvalé deformaci. Mění se i další fyzikální vlastnosti pryže. Proto je znalost jejich závislosti na stupni sesíťování velmi důležitá.

Vulkanizací nenasycených kaučuků (zejména přírodního, butadien-styrénového a butadienakrylonitrilového) s velkými koncentracemi síry se podstatně mění povaha polymeru. Síra se váže na makromolekulární řetězce kaučuku převážně ve formě pěti a šestičlenných kruhů (modifikací) a jen málo se jí spotřebuje ke vzniku nevelké koncentrace příčných vazeb, To se projeví významným vzrůstem teploty zesklenění (např. u přírodního kaučuku z původních -75°C až na hodnotu kolem $+80^{\circ}\text{C}$) a částečným zachováním termoplasticity.

Teoreticky by při navázání jednoho atomu síry na každou monomerní jednotku přírodního kaučuku bylo zapotřebí 32% síry, tj. 47 dsk. Proto je tato koncentrace považována za mezní. Podle dávkování síry nazýváme produkt její reakce s kaučukem buď tvrdou pryží neboli ebonitem (25 dsk až 47 dsk) nebo polotvrdou pryží neboli semiebonitem (10 dsk. až 25 dsk).

Tvrdá pryž je za běžné teploty křehká, má výborné elektroizolační vlastnosti, výbornou odolnost vůči stárnutí a chemikáliím. Tu si zachovává i po ohřátí na teplotu kolem 100°C , kdy se již nachází v elastickém stavu. proto se používá často k ochraně různých kovových nádob a armatur proti korozi. Využívá se při tom výborné adheze tvrdé pryže ke kovům. Byla také donedávna hlavním materiálem k výrobě akumulátorových skříní. V této aplikaci byla vytlačena polypropylenem. Zůstává však nadále významným produktem gumárenského průmyslu.

2. ELASTICITA KAUKUKŮ

Elastická tělesa se účinkem vnější síly deformují – mění svůj tvar nebo objem nebo obojí

současně, 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.

2.1. Ideální elasticita

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. Kaučuková elasticita

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

- 1) Dosažitelné informace 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 níže).
- 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 brzděny 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 uvážením 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.

3. MECHANICKÉ CHOVÁNÍ ELASTOMERŮ

3.1. Vlastnosti hyperelastických materiálů

Elastomerní materiály vytváří amorfni strukturu s dlouhými molekulovými řetězci, které jsou v nedeformovaném stavu značně pokřivené, stočené a nahodile orientované. Při působení tahového zatížení se řetězce částečně narovnejí a způsobí tak elastické protažení zatíženého materiálu. Jakmile tahová síla přestane působit, řetězce se vrátí do původního stavu. Toto chování materiálu se nazývá jako hyperelastické a je způsobeno formou příčné vazby mezi molekulovými řetězci, která se vytváří při vulkanizačním procesu.

Vlastnosti pryží jsou ovlivněny především jejich chemickou kompozicí. Pryž je uhlovodík obsahující dlouhé řetězce molekul s volným střídavým spojením. Tyto molekuly jsou spojeny v pevný počet vnitřních vazeb, takže se nemohou hýbat nezávisle, jako v tekutině. Vnitřní vazby mezi řetězci jsou v pryžích zavedeny pomocí chemické reakce přírodní pryže se sírou. Tento proces je obecně znám jako vulkanizace sírou.

Pro aproximaci pryžové elasticity bylo vyvinuto několik materiálových modelů, které nejsou založeny na molekulárním nebo strukturálním konceptu, ale pouze na materiálové dedukci. V současnosti nejpoužívanější modely jsou popsány níže.

3.1.1 Obecná teorie velkých elastických deformací

Obecné řešení vztahu mezi tahem a tlakem u pryžových materiálů bylo vyvinuto Rivlinem a vyplývá ze vztahu pro potenciál deformační energie (W), který může být přímo funkcí hlavních protažení nebo funkcí deformačních invariantů:

$$\begin{aligned} W &= W(I_1, I_2, I_3), \\ W &= W(I_1, I_2, I_3). \end{aligned} \quad (1)$$

Na deformačním potenciálu je založen vztah pro složky napětí ij , které je definováno jako:

$$s_{ij} = \frac{\partial W}{\partial E_{ij}}, \quad (2)$$

kde E_{ij} je Lagrangeův deformační tenzor. Předpokládáme, že materiál je izotropní v elastickém chování v nezatíženém stavu a téměř nestlačitelný v objemu. Postup při měření napětí na vzorku elastomeru, nezávislý na výběru osy, je dán třemi deformačními invarianty, definovanými jako:

$$\begin{aligned} I_1 &= I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 - 3 \\ I_2 &= I_1^2 \cdot I_2^2 + I_2^2 \cdot I_3^2 + I_3^2 \cdot I_1^2 - 3 \\ I_3 &= I_1^2 \cdot I_2^2 \cdot I_3^2 - 1, \end{aligned} \quad (3)$$

kde symboly I_1, I_2, I_3 udávají hlavní protažení, definovaná jako procento z protažené délky na neprotaženou délku hran malého objemového elementu v nezatíženém stavu:

$$I = \frac{L}{L_0} = \frac{L + \Delta u}{L_0}. \quad (4)$$

Hodnoty I_i jsou dány $(1 + e_i)$, kde e_i je poměrná deformace. Hodnoty I_i jsou nulové v nezatíženém stavu, když $I_1 = I_2 = I_3 = 1$. Pro nestlačitelné materiály je I_3 nulové, tudíž zůstávají pouze dvě nezávislé hodnoty napěťových konstant, I_1, I_2 , z čehož vyplývá rovnice deformačního potenciálu $W = W(I_1, I_2)$.

3.1.2 Obecný vztah mezi napětím a deformací

Vztah mezi napětím a deformací obdržíme z funkce napěťového energetického potenciálu, vyjádřením „virtuální“ práce, uvažované jako:

$$dW = (s_1 / I_1) \cdot (\partial W / \partial I_1) dI_1 \quad (5)$$

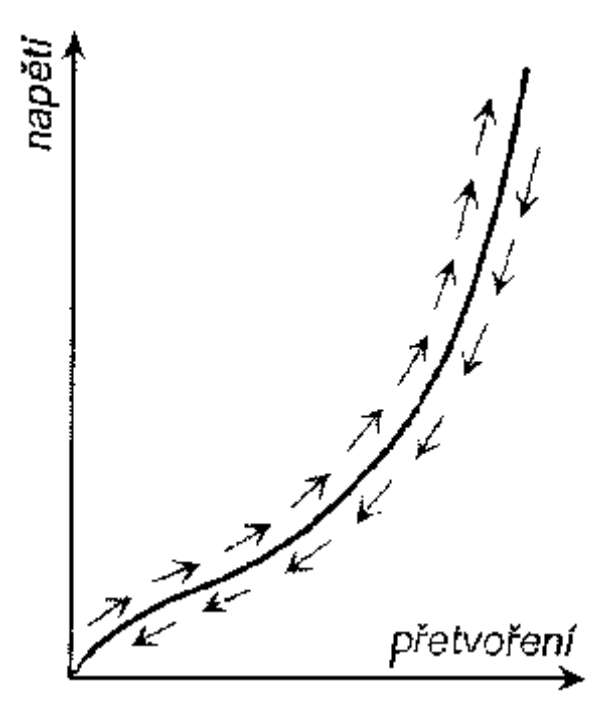
analogicky lze vyjádřit vztah pro I_2, I_3 . Pro s_1 obdržíme:

$$s_1 = 2 \left[I_1^2 \left(\frac{\partial W}{\partial I_1} \right) - \left(\frac{1}{I_1^2} \right) \left(\frac{\partial W}{\partial I_2} \right) \right] + P \quad (6)$$

s analogickými vztahy pro s_2 a s_3 , kde s_1, s_2, s_3 jsou jednotlivé složky skutečného napětí. Množství P udává nespecifikovaný tlak. P se stanovuje na základě známých hodnot s a I při základních módech zatěžování.

4. 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). 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.

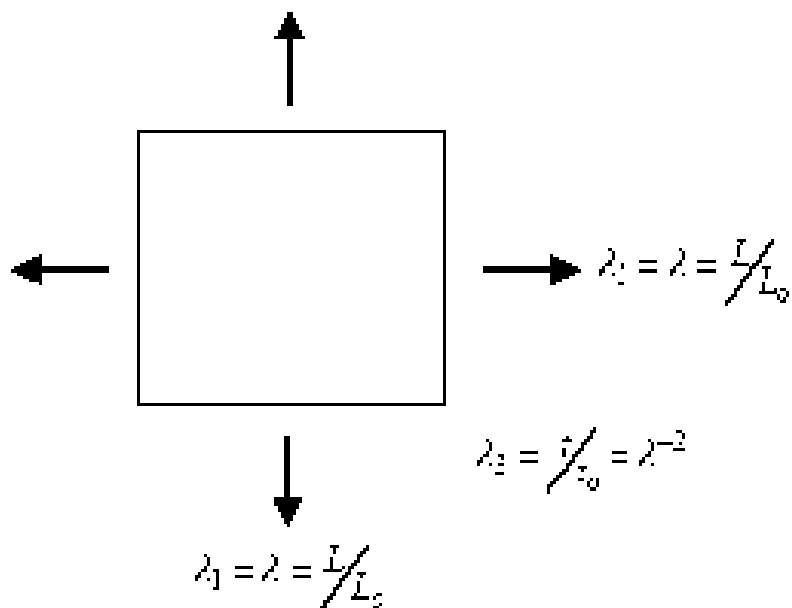


Obr.1.: Průběh závislosti deformace na napětí u pryže

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

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 $\lambda_3 = \lambda_1 \lambda_2$.



Obr.2.: Základní složky protažení

Definice deformačních invariant:

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

$$\begin{aligned}
 I_1 &= \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 \\
 I_2 &= \lambda_1^2 \lambda_2^2 + \lambda_2^2 \lambda_3^2 + \lambda_3^2 \lambda_1^2 \\
 I_3 &= \lambda_1^2 \lambda_2^2 \lambda_3^2
 \end{aligned}
 \tag{7}$$

Jestliže je materiál úplně nestlačitelný, $I_3=1$.

Protože předpokládáme, že materiál je izotropní, některé formy potenciálu napět'ové 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.

Definice objemového poměru:

Objemový poměr je definován:

$$J = \lambda_1^2 \lambda_2^2 \lambda_3^2 = V/V_0 \tag{8}$$

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.

$$W = W(I_1, I_2, I_3) \quad (9)$$

Nebo

$$W = W(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) \quad (10)$$

Druhý Piola-Kirchoffův napět'ový tenzor je pak dán vztahem:

$$S_{ij} = dW/dE_{ij} \quad (11)$$

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 napět'ového chování elastomerů na mikroúrovni tak, aby výsledný model co nejlépe aproximoval toto pozorování.

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

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

$$W = W(I_1, I_2, I_3, \{M\}) \text{ nebo } W = W(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \{M\}) \quad (12)$$

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 .

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

Model Neo – Hookean

Je to nejjednodušší a nejstarší model vycházející z termodynamických principů a ze statistického přístupu modelování vnitřní struktury elastomerů. Model vykazuje lineární chování při smykové deformaci a není schopen popsat závěrečnou vyztužovací fázi napět'ové deformační odezvy.

Model Mooney

Model v původní podobě původně navrhl Mooney v r. 1940. Model, stejně jako předchozí, vykazuje lineární chování při smykové deformaci a není schopen popsat závěrečnou vyztužovací fázi napět'ové deformační odezvy.

Model Ogden

Model navrhl a verifikoval Ogden r. 1972. Tento model je dnes poměrně široce používaný, věrohodně postihuje i závěrečnou vyztužovací fázi odezvy elastomerů.

Model Arruda & Boyce

Model navrhli Arruda a Boyce r. 1993. Vychází z modelu mikrostruktury elastomeru, jehož základní buňka obsahuje 8 makromolekulárních řetězců, proto se model velmi často označuje jako „osmiřetězcový“.

Model Gent

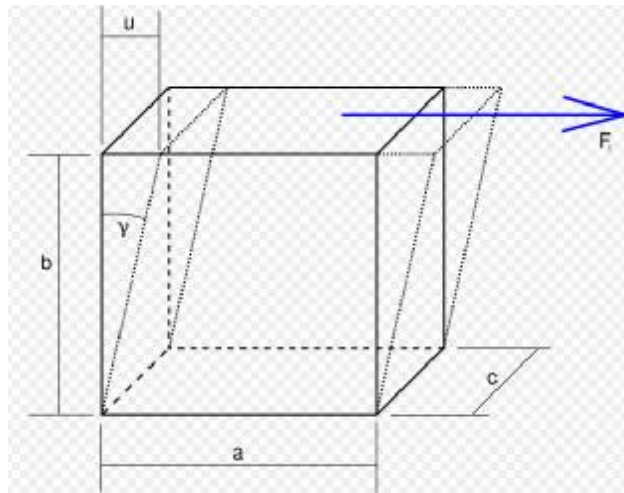
Model navrhl Gent v r. 1996. Model má vlastnosti podobné formulačně složitějšímu modelu typu „Arruda –Boyce“. Jeho výhody spočívají ve formulační jednoduchosti, malém počtu parametrů (dva) a schopnosti postihnout závěrečnou vyztužovací fázi napěťově deformační odezvy.

Mnoho jiných autorů navrhlo jiné modely, které však již v dnešní době nenacházejí tak široké využití jako výše uvedené. Několik jiných využívaných variant jsou model Yeoh (byl verifikován pro pryž s plnivem), dále pak model James-Green-Simpson a model Signorini.

K získání přesných konstant do 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.

5. NAMÁHÁNÍ TĚLES SMYKEM

O namáhání prostým smykem mluvíme tehdy, když jednotlivé vrstvy namáhaného materiálu se navzájem posouvají, aniž se mění jejich kolmá vzdálenost. Na obr.3. toto namáhání vyvolává tečná síla o velikosti F_t , která působí v rovině horní stěny hranolku o hranách a, b, c . Předpokládáme-li malou výšku hranolku, aby nedošlo k ohybu, vyvolá tečná síla posunutí horní stěny o u . Tato deformace je tím větší, čím je větší působící síla a při dané síle je závislá na výšce b hranolku. S rostoucí výškou posunutí horní stěny roste. Zavedeme proto poměrnou veličinu popisující vyvolanou deformaci, tzv. poměrné posunutí γ . Tato veličina udává přibližně změnu úhlu, který svírá hrana b se svislým směrem.



Obr.3.: Namáhání hranolu o rozměrech a, b, c smykem

Pro malé deformace platí podle obr.3.:

$$\frac{u}{b} = \operatorname{tg} \gamma \cong \gamma \quad (13)$$

Podle Hookeova zákona je toto poměrné posunutí přímo úměrné působícímu napětí, které deformaci vyvolává. Platí:

$$g = \frac{1}{G} \cdot t \quad (14)$$

kde $t = \frac{F_t}{S}$ je tečné napětí

G je modul pružnosti ve smyku

Mezi modulem pružnosti ve smyku G , modulem pružnosti v tahu E a Poissonovým číslem μ platí vztah

$$G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \mu)} \quad (15)$$

Tyto tři veličiny jsou charakteristikami chování materiálu.

Kromě Poissonova čísla se používá také Poissonova konstanta, která je definována jako převrácená hodnota Poissonova čísla, tzn.:

$$m = \frac{1}{m} \quad (16)$$

6. ZKOUŠENÍ HYPERELASTICKÝCH MATERIÁLŮ

Při zkoušení hyperelastických materiálů se obvykle používají metody zatěžování pro jednoosou napjatost, dvouosou napjatost a čistý smyk. Výsledky těchto zkoušek potom lze použít pro přesnou aproximaci charakteristiky chování daného materiálu při zatěžování.

Zkouška jednoosé napjatosti

Podstatou této zkoušky je protahování standardního zkušební tělesa v trhacím stroji konstantní rychlostí v jednom směru, přičemž se odečítají hodnoty síly a prodloužení, potřebné k hodnocení požadovaných charakteristik protahovaných zkušebních těles. Protahování probíhá až do okamžiku přetržení tělesa.

Zkouška dvouosé napjatosti

Při zkoušce pro dvouosou napjatost je zkušební těleso protahováno v trhacím stroji rovnoměrnou zatěžovací silou ve dvou směrech, přičemž se odečítají hodnoty síly a protažení. Zkušební těleso tvaru čtverce nebo kotouče je v trhacím stroji rovnoměrně upnuto po celém svém obvodu. Další možnou metodou je využití principu nafukování kdy je fragment plochy zkušební tělesa díky působícímu tlaku také namáhán dvojosým tahem.

Zkouška pro čistý smyk

Při zkoušce pro čistý smyk je zkušební těleso obdélníkového tvaru rovnoměrně zatěžováno v hlavním směru tak, aby bylo zabráněno změně šířky vedlejších stran, pomocí dlouhých horizontálních svorek. V průběhu zatěžování linie rovnoběžná s jednou z hlavních os nepodléhá žádnému prodloužení.

6.1. Statické zkoušení elastomerů

Mechanické statické zkoušky patří mezi nejpoužívanější zkoušky a jsou základem pro stanovení pevnostních hodnot materiálu. Materiál zatěžíme pozvolna bez rázu. Provádí se zkoušky tahem, tlakem, ohybem, krutem a stříhem. Zkoušky se provádí na zkušebních strojích, které jsou buď jednoúčelové (pro jeden druh zkoušek), nebo univerzální (pomocí vhodných přípravků lze provádět různé druhy zkoušek). Uspořádání trhacích strojů může být různé. Liší se volbou mnoha konstrukčních prvků (např. rozvržením rámu, volbou upínacích ústrojí, volbou pohonu, výběrem záznamového a registračního zařízení atd.).

Navrhované čelisti pro statické zkoušení budou sloužit ve zkušebním stroji Zwick 145 665, který je určen pro statické i cyklické zatěžování.

6.2. Typy čelistí pro upínání vzorků

Vzorky musí být do čelistí upnuty vhodným způsobem tak, aby bylo zatížení pokud možno v ose daného vzorku a aby došlo k snadnému a bezpečnému upnutí. Proto existuje velké množství druhů upínacích čelistí rozdělených do kategorií dle pracovního principu. Jsou to:

Hydraulické čelisti

Jsou používány u vzorků z kovových i nekovových materiálů, kde potřebujeme vyvodit vysokou upínací sílu, nevýhodou je malá rychlost upínání.

Pneumatické čelisti

Používány u vzorků z měkkých materiálů, které jsou náchylné k deformaci v procesu upínání, mají nižší upínací síly, než hydraulické čelisti.

Klínové čelisti

Jsou to jedny z nejpoužívanějších čelistí, upínací síla se zvyšuje se zvyšujícím se trhacím zařízením, hrozí deformace vzorku v místech upnutí.

Šroubové čelisti

Slouží k upínání velké škály materiálů, snadné a rychlé upnutí konstantní upínací silou.

Bajonetové čelisti

Je vyloučen skluz vzorku, nenáročné na údržbu, vzorek však musí být předem upraven na požadovaný tvar.

Čelisti pro upínání vzorku provlékáním

Snadné upnutí tenkých flexibilních materiálů, ale mají použití jen pro malá trhací zřízení.

7. STANOVENÍ TAHOVÝCH VLASTNOSTÍ PYŽE DLE NORMY ČSN ISO 37

7.1. Norma ČSN ISO 37

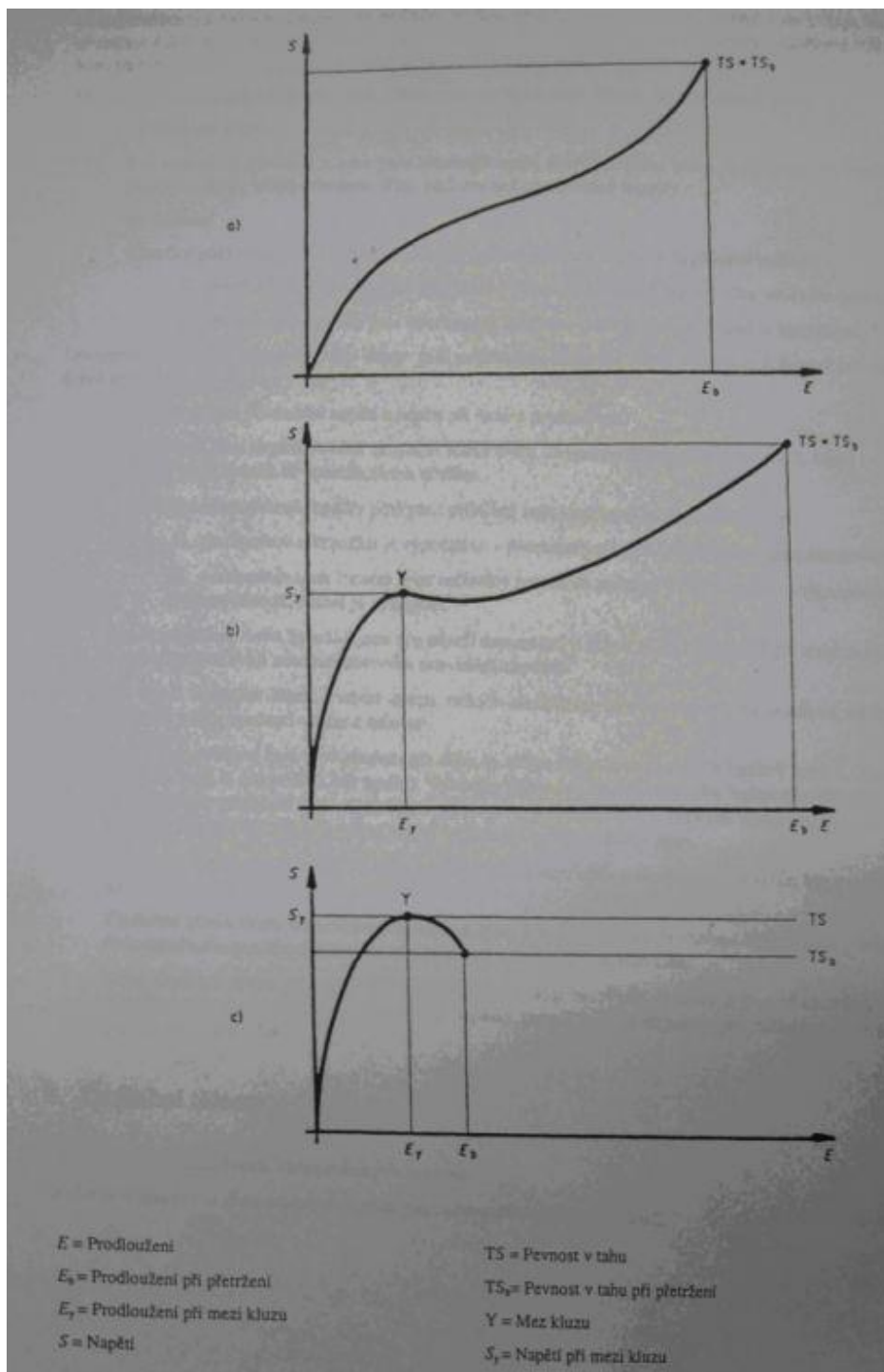
Tato norma popisuje metodu pro stanovení tahových vlastností pryže z vulkanizovaných nebo termoplastických kaučuků. Vyhodnocovanými vlastnostmi mohou být pevnost v tahu, tažnost při dané deformaci a prodloužení při daném napětí. Předmětem normy je také specifikace a stanovení hodnot při mezi kluzu.

7.2. Termíny a definice obsažené v normě

Pro účely této normy se užívají tyto termíny a definice:

- 1) Napětí v tahu, S: Napětí způsobující protažení zkušebního tělesa. Vypočítává se jako použitá síla, vztažená na jednotku plochy původního příčného průřezu v pracovní části zkušební tělesa
- 2) Prodloužení, E: Protažení vzniklé působením napětí v tahu na zkušební těleso, vyjádřené v procentech délky pracovní části
- 3) Pevnost v tahu, TS: Maximální napětí v tahu, zaznamenané při protahování zkušební tělesa do okamžiku přetržení, viz. obr. 4a – 4c

-
- 4) Pevnost v tahu při přetržení, TS_b : Tahové napětí zaznamenané v okamžiku porušení, viz. obr 4a – 4c
 - 5) Tažnost E_b : Tahová deformace pracovní délky zkušebního tělesa v okamžiku přetržení, viz obr. 4a – 4c
 - 6) Prodloužení při daném napětí, E_s : Tahová deformace pracovní části zkušebního tělesa při dosažení dané hodnoty tahového napětí
 - 7) Napětí při daném prodloužení, S_c : Tahové napětí způsobující dané prodloužení pracovní části zkušebního tělesa
 - 8) Mez kluzu, S_y : Tahové napětí v prvním bodě křivky napětí-deformace, kdy další zvětšování formace probíhá bez jakéhokoliv zvětšování napětí. Tento bod je buď inflexním bodem křivky, viz obr. 4b nebo je maximem křivky, viz. obr. 4c
 - 9) Prodloužení při mezi kluzu, E_y : Tahová deformace v prvním bodě křivky napětí-deformace, kdy další zvětšování deformace není provázeno zvětšováním napětí, viz. obr. 4b a 4c
 - 10) Délka pracovní části zkušebního tělesa tvaru oboustranných lopatek: Počáteční vzdálenost mezi označenými body, určujícími v zúžené části zkušebního tělesa tvaru oboustranné lopatky pracovní část a používanými pro měření prodloužení, viz obr. 5



Obr.4.: Zobrazení tahových charakteristik

7.3 Podstata zkoušky

Standardní zkušební tělesa, buď tvaru oboustranných lopatek nebo kroužků, jsou protahována v trhacím stroji konstantní rychlostí v upínacích čelistech nebo na kladkách. odečítají se hodnoty síly a prodloužení, potřebné k hodnocení požadovaných charakteristik

protahovaných zkušebních těles v průběhu jejich bezporuchového protahování a v okamžiku přetržení. Výsledky získané na zkušebních tělesech tvaru oboustranných lopatek a kroužků nemusejí poskytovat stejné hodnoty příslušných vlastností. Je to způsobeno hlavně nestejnou rozložením napětí na příčném průřezu protahovaných kroužků. Druhým ovlivňujícím faktorem orientace („kalandrovací efekt“), který může v případě oboustranných lopatek ovlivňovat naměřené hodnoty v závislosti na tom, zda je osa lopatek souběžná se směrem orientace nebo zda je na něj kolmá.

Hlavními hledisky pro výběr zkušebních těles tvaru kroužků nebo oboustranných lopatek jsou:

a) Pevnost v tahu

Pro stanovení pevnosti v tahu jsou vhodnější spíše zkušební tělesa tvaru oboustranných lopatek. Kroužky poskytují nižší, někdy mnohem nižší, hodnoty než oboustranné lopatky.

b) Tažnost

Kroužky poskytují přibližně stejné hodnoty jako oboustranné lopatky za předpokladu, že prodloužení u kroužků je vypočítáno v procentech z jejich počátečního vnitřního obvodu a oboustranné lopatky jsou vysekávány kolmo na směr orientace, pokud je vyznačen

Oboustranné lopatky jsou používány tehdy, je-li požadováno sledování vlivu orientace, k čemuž kroužky jako zkušební tělesa nejsou vhodné.

c) Prodloužení při daném napětí a napětí při daném prodloužení

Přednostně jsou doporučována zkušební tělesa tvaru oboustranných lopatek typ 1 a 2, která by, pokud je to možné, měla sloužit ke specifickým účelům.

Kroužky a oboustranné lopatky poskytují přibližně stejné hodnoty za předpokladu, že prodloužení u kroužků je vypočítáno v procentech z jejich počátečního středního obvodu a u oboustranných lopatek jsou určovány průměrné hodnoty z těles vysekávaných podél a kolmo na směr orientace, pokud je vyznačen.

Zkušební tělesa tvaru kroužků jsou pro snazší manipulaci a snazší stanovení napětí při dané deformaci používána přednostně při automatizovaném provádění zkoušek.

Malá zkušební tělesa mohou oproti velkým zkušebním tělesům poskytovat poněkud odlišné, obvykle vyšší hodnoty pevnosti v tahu a tažnosti

Je možné používat šest typů zkušebních těles, tj. tělesa tvaru oboustranných lopatek typu 1,2,3 a 4 a tvaru kroužků typu A (normální) a B (malý). Výsledky získané u daného materiálu budou pravděpodobně kolísat v závislosti na použitém typu zkušebního tělesa a výsledky získané u různých materiálů nemohou proto být považovány za srovnatelné, pokud není použit stejný typ zkušebních těles.

Vyžaduje-li příprava zkušebních těles jejich broušení nebo úpravu tloušťky, mohou tím být výsledky ovlivněny.

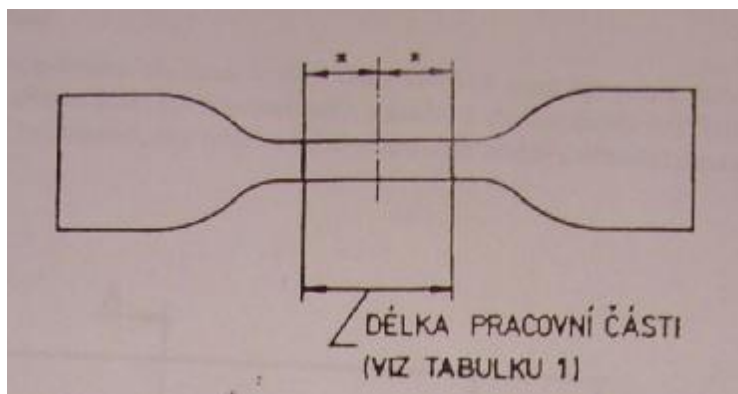
Zkušební tělesa tvaru oboustranných lopatek typu 3 a 4 a kroužku B mohou být použita pouze v případě nedostatečného množství materiálu pro přípravu velkých zkušebních těles.

Malá zkušební tělesa jsou vhodná hlavně pro zkoušení hotových výrobků a jsou předepsána v některých výrobových normách. Např. oboustranné lopatky typu 3 jsou předepsány pro zkoušení těsnících kroužků pro potrubí a u kabelů.

7.4 Zkušební tělesa

7.4.1 Zkušební tělesa tvaru oboustranných lopatek

Zkušební tělesa tvaru oboustranných lopatek mají obrys uvedený na obr.5.



Obr.5.: Tvar oboustranných lopatek

Standardní tloušťka zúžené části musí být $2,0 \text{ mm} \pm 0,2 \text{ mm}$ pro typy 1,2 a 3 a $1,0 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$ pro typ 4. Délka pracovní části musí odpovídat tabulce 1. Ostatní rozměry jsou dány příslušným sekacím nožem (viz. tabulka 2). Pro nestandardní zkušební tělesa odebíraná např. z hotových výrobků, může být maximální tloušťka zúžené části $3,0 \text{ mm}$ pro typ 1; $2,5 \text{ mm}$ pro typ 2 a 3 a $2,0 \text{ mm}$ pro typ 4.

Rozměry v milimetrech

Typ zkušebního tělesa	Typ 1	Typ 2	Typ 3	Typ 4
Délka pracovní části	$25,0 \pm 0,5$	$20,0 \pm 0,5$	$10,0 \pm 0,5$	$10,0 \pm 0,5$

Tab.1.: Délka pracovní části oboustranných lopatek

7.4.2 Zkušební tělesa tvaru kroužků

Zkušební těleso ve tvaru kroužků standardního typu A musí mít vnitřní průměr $44,6 \text{ mm} \pm 0,2 \text{ mm}$. Medián axiální tloušťky a medián radiální šířky musí být $4,0 \text{ mm} \pm 0,3 \text{ mm}$. Radiální šířka každého kroužku se nesmí nikde odchylovat od mediánu více než $0,2 \text{ mm}$ a axiální tloušťka kroužku se nesmí nikde odchylovat od mediánu více než o 2%.

Zkušební těleso ve tvaru kroužků standardního typu B musí mít vnitřní průměr $8,0 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$. Medián axiální tloušťky a medián radiální šířky musejí být $1,0 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$. Radiální šířka se nesmí u kroužku nikde odchylovat od mediánu více než o $0,1 \text{ mm}$.

Jsou-li srovnávány dva soubory stejných kroužků, platí u obou rozměrů, že medián tloušťky každého souboru se nesmí lišit od společného mediánu tloušťky více než o 7,5%.

7.5 Zkušební zařízení

7.5.1 Vysekávací a vyřezávací nože

Všechny vysekávací a vyřezávací nože musejí odpovídat ISO 4661-1. Vysekávací nože pro přípravu oboustranných lopatek musejí mít rozměry uvedené v tabulce 2 a na obr.5. Odchylna šířky od vzdálenosti břitů v zúžené části nože nesmí v žádném bodě přesáhnout 0,05 mm od dané šířky.

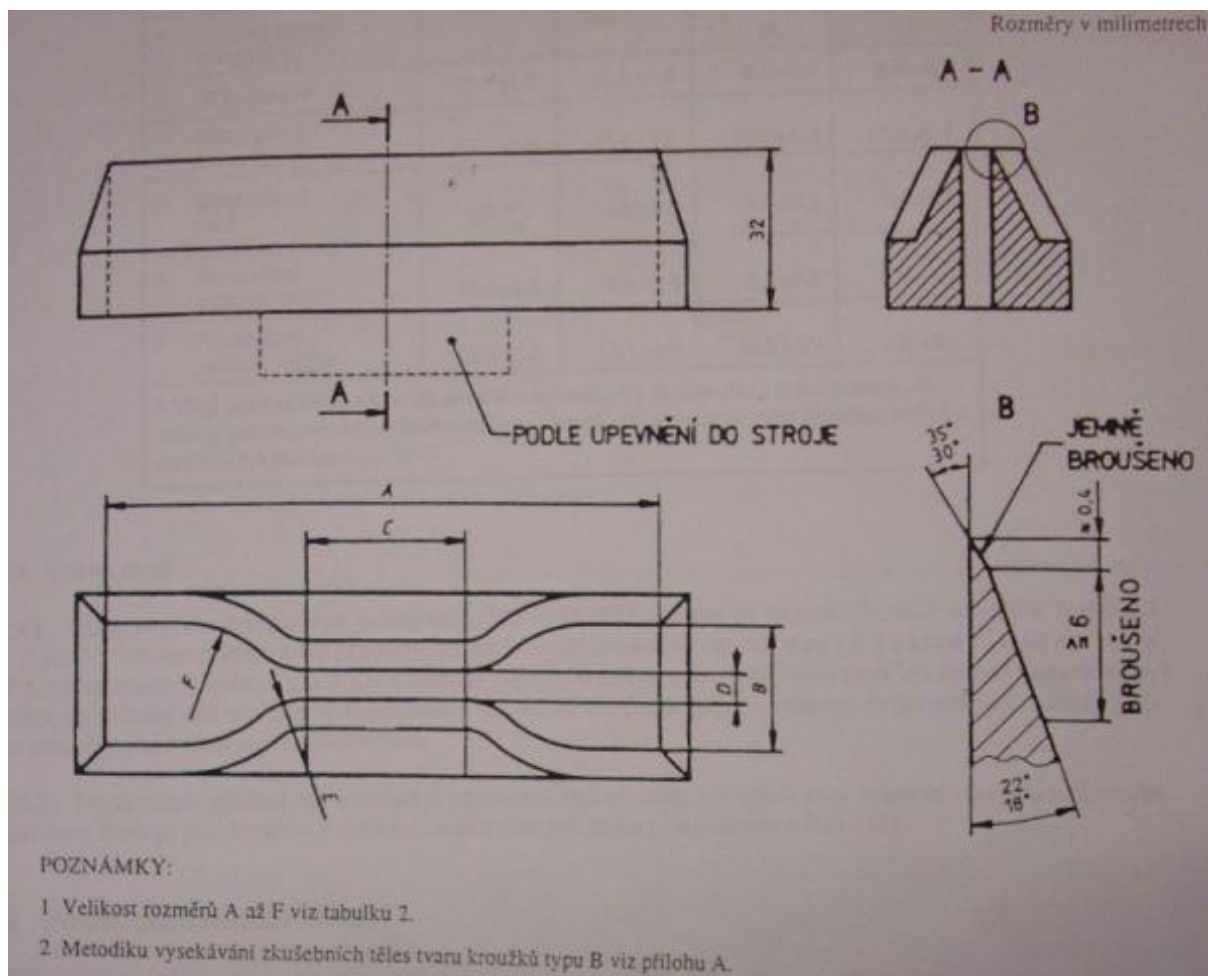
7.5.2 Tloušťkoměr

Přístroj pro měření tloušťky zkušebních těles tvaru oboustranných lopatek a axiální tloušťky zkušebních těles tvaru kroužků musí odpovídat požadavkům metody A v ISO 4648:1991.

Přístroj pro měření radiální šířky zkušebních těles tvaru kroužků musí být obdobou výše uvedeného zařízení a kontaktní a základová destička musejí být tvarovány do tvaru vhodného pro zakřivenost kroužku.

7.5.3 Kuželový kalibr

K měření vnitřního průměru zkušebních těles tvaru kroužků musí být použit kalibrovaný kuželový trn nebo jiné vhodné zařízení. Zařízení musí být schopno měřit průměry s chybou menší než 0,01 mm. Způsob posunování měřeného kroužku musí být takový, aby nedošlo k žádné znatelné změně měřeného rozměru.



Obr.6.: Vysekávací nůž pro zkušební tělesa tvaru oboustranných lopatek

Rozměry v milimetrech

Rozměr	Typ 1	Typ 2	Typ 3	Typ 4
A Celková délka (minimální) ¹⁾	115	75	50	35
B Šířka lopatek	25,0 ± 1,0	12,5 ± 1,0	8,5 ± 0,5	6,0 ± 0,5
C Délka zúžené části	33,0 ± 2,0	25,0 ± 1,0	16,0 ± 1,0	12,0 ± 0,5
D Šířka zúžené části	6,0 ^{+0,1} _{0,0}	4,0 ± 0,1	4,0 ± 0,1	2,0 ± 0,1
E Přechodový poloměr vnější	14,0 ± 1,0	8,0 ± 0,5	7,5 ± 0,5	3,0 ± 0,1
F Přechodový poloměr vnitřní	25,0 ± 2,0	12,5 ± 1,0	10,0 ± 0,5	3,0 ± 0,1

¹⁾ Větší celková délka může být nutná pro zajištění, aby do kontaktu s čelistmi stroje přicházely jenom rovnoběžné části rozšířených konců, což zabraňuje trhání zkušebních těles v rozšiřujících se částech

Tab.2.: Rozměry vysekávacích nožů pro zkušební tělesa tvaru oboustranných lopatek

7.5.4 Trhací stroj

Trhací stroj musí vyhovovat požadavkům ISO 5893:1993; v přesnosti měřené síly musí odpovídat stupni A a v případě používání průtahoměru přesnosti stupně D u oboustranných lopatek typu 1 a 2 a kroužků typu A a stupni E pro oboustranné lopatky typu 3 a 4 a kroužky typu B. Rychlost posuvu příčnicku musí být možno nastavit minimálně na hodnoty 100 mm/min, 200 mm/min a 500 mm/min a doporučuje se vybavení stroje možností automatického grafického záznamu napětí a deformace.

Pro zkoušení při jiné než standardní laboratorní teplotě, musí být trhací stroj vybaven vhodnou temperanční komorou. Postupy pro dosažení zvýšených nebo snížených teplot jsou uvedeny v ISO 3383.

7.6 Příprava zkušebních těles

Zkušební tělesa tvaru oboustranných lopatek musejí být připravena některou z vhodných metod popsaných v ISO 4661-1. Pokud je to možné, mají být lopatky vysekávány ve směru orientace materiálu, jestliže není sledován její vliv. V takovém případě musí být soubor oboustranných lopatek vyseknut také kolmo na směr orientace.

Zkušební tělesa tvaru kroužků musejí být vyrobena vyřezáním nebo vysekáváním vhodnými metodami podle ISO 4661-1 anebo vylisováním.

7.7 Postup zkoušky

7.7.1 Zkušební tělesa tvaru oboustranných lopatek

Zkušební těleso se vloží do trhacího stroje tak, aby bylo zabezpečeno symetrické upnutí rovnoběžných částí lopatek a aby byl tah rozložen rovnoměrně na příčný průřez tělesa. Pokud je to potřeba, připevní se na zkušební těleso mechanismus průtahoměru. Spustí se chod stroje a průběžně se zaznamenávají změny pracovní délky zkušební tělesa a síly po celou dobu zkoušky s přesností $\pm 2\%$ jak je požadováno pro účely vyhodnocení. Jmenovitá rychlost příčnicku s pohyblivou upínací čelistí musí být 500 mm/min pro zkušební tělesa typu 1 a typu

2 a 200 mm/min pro zkušební tělesa typu 3 a typu 4. Zkušební těleso, u kterého dojde k přetržení mimo pracovní část (viz. obr. 4), musí být z hodnocení vyřazeno a zkouška se opakuje na dalším zkušebním tělese.

7.7.2 Zkušební tělesa tvaru kroužků

Zkušební těleso se s minimálním napínáním umístí kolem obou kladek. Spustí se chod stroje a průběžně se zaznamenává vzdálenost mezi kladkami a zvyšování napětí po celou dobu zkoušky s přesností $\pm 2\%$ jak je požadováno pro účely vyhodnocení. Jmenovitá rychlost příčnicku s pohyblivou kladkou musí být 500 mm/min pro zkušební tělesa tvaru kroužku typ A a 100 mm/min pro zkušební tělesa tvaru kroužku typ B.

7.8 Vyjádření výsledků

Stanovuje-li se na stejných zkušebních tělesech více než jedna vlastnost, musejí být zkušební údaje zpracovány tak, jako by byly získány pro každou vlastnost nezávisle a výsledky musejí být vypočteny pro každou vlastnost zvlášť. Jako výsledek se ve všech případech zaznamenává pro každou vlastnost medián.

II. PRAKTICKÁ ČÁST

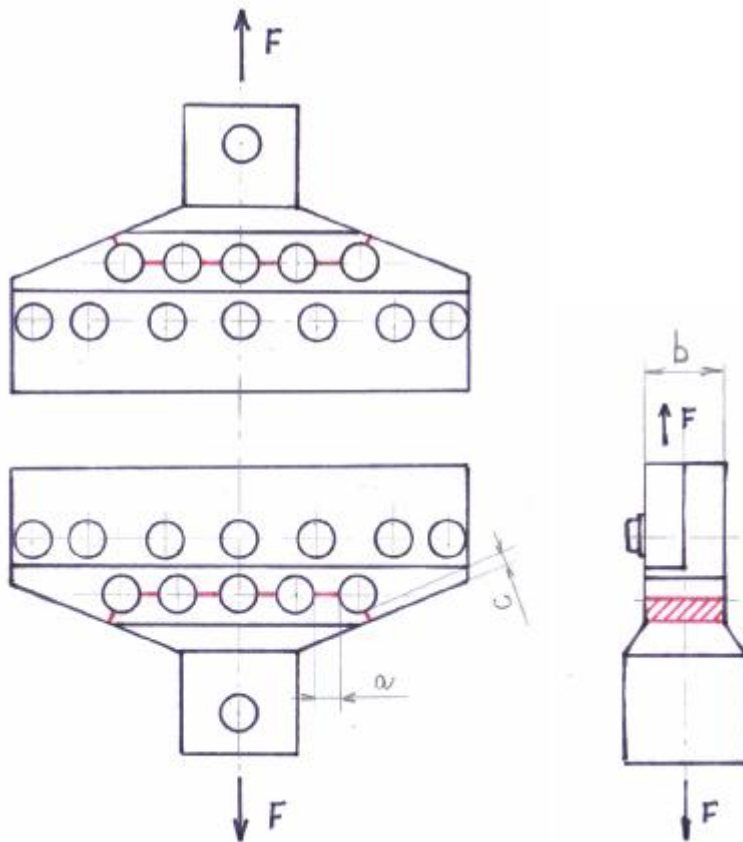
8. CÍL PRAKTICKÉ ČÁSTI

Cílem praktické části v této bakalářské práci je navržení čelistí pro upnutí zkušebních vzorků na zkušebním stroji při tahové zkoušce. Čelisti byly navrženy s ohledem na správnou funkčnost, tj. vhodné upnutí ke stroji a také pro spolehlivé upnutí vzorku do nich. Ohled jsme brali také na co nejnižší hmotnost pomocí otvorů pro odlehčení čelistí. Tvar a rozměry čelistí jsou dány na výkresech, které jsou přiloženy v příloze.

9. KONTROLA NAVRŽENÝCH ČELISTÍ

Kontrola navržených čelistí spočívá v kontrole čelistí na tah a kontrole upínacích šroubů na stříh.

9.1. Výpočet dovoleného zatížení čelistí v tahu



Obr.7.: Namáhání čelisti v tahu

Dáno: mat. 11500 $\rightarrow s_{D,t} = 150 \text{ MPa}$, $a = 15 \text{ mm}$, $b = 40 \text{ mm}$, $c = 4 \text{ mm}$, $F_{\text{max, stroje}} = 20 \text{ kN}$,
 $k = 2$

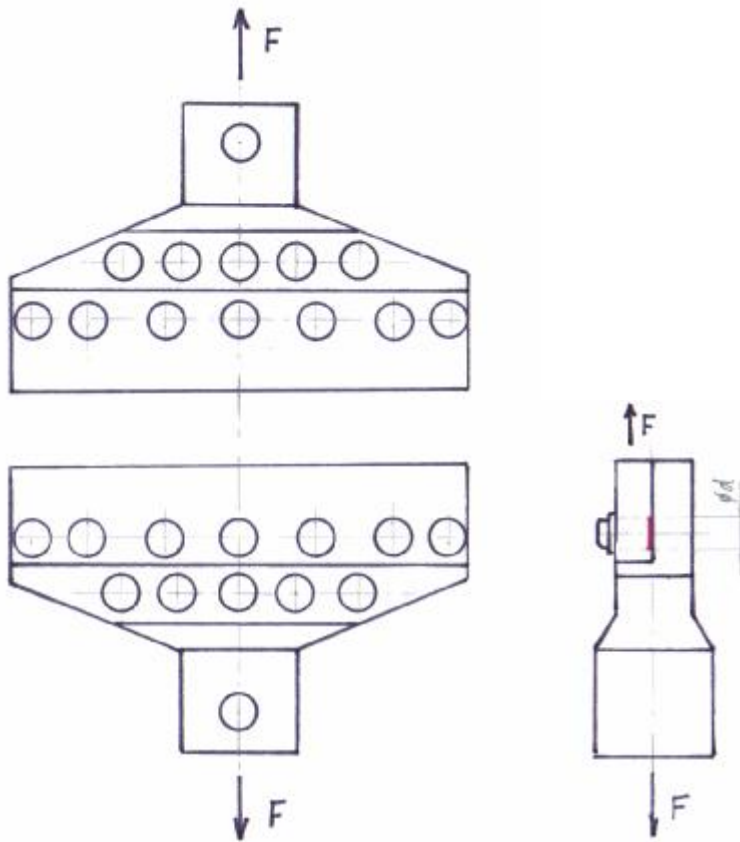
$$S = 4ab + 2bc = 4 \cdot 15 \cdot 40 + 2 \cdot 4 \cdot 40 = 2720 \text{ mm}^2$$

$$s_t = \frac{F_{\text{max}}}{S} \leq s_{D,t} \Rightarrow F_{\text{max}} = s_{D,t} \cdot S = 150 \cdot 2720 = 408000 \text{ N} = 408 \text{ kN}$$

$$F = \frac{F_{\text{max}}}{k} = \frac{408}{2} = 204 \text{ kN}$$

$F_{\text{max, stroje}} < F \Rightarrow \underline{20 \text{ kN}} < \underline{204 \text{ kN}}$... vyhovuje, tzn. materiál čelistí dokáže odolat vyššímu zatížení v tahu, než je maximální zatížení v tahu vyvolané zkušebním strojem

9.2. Výpočet dovoleného zatížení šroubů ve stříhu



Obr.8.: Namáhání šroubů ve stříhu

Dáno: mat. 11500 $\rightarrow t_{D,s} = 90\text{MPa}$, $d = 12\text{mm}$, $F_{\text{max, stroje}} = 20\text{kN}$, $k = 2$

$$S = 7 \cdot \frac{pd^2}{4} = 7 \cdot \frac{p \cdot 12^2}{4} = 792\text{mm}^2$$

$$t_s = \frac{F_{\text{max}}}{S} \leq t_{D,s} \Rightarrow F_{\text{max}} = t_{D,s} \cdot S = 90 \cdot 792 = 71280\text{N} \cong 71,3\text{kN}$$

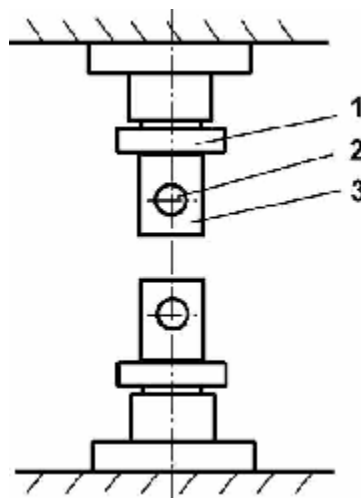
$$F = \frac{F_{\text{max}}}{k} = \frac{71,3}{2} = 35,65\text{kN} \cong 35,7\text{kN}$$

$F_{\text{max, stroje}} < F \Rightarrow \underline{20\text{kN} < 35,7\text{kN}}$... vyhovuje, tzn. materiál šroubů dokáže odolat vyššímu zatížení ve stříhu, než je maximální zatížení ve stříhu vyvolané zkušebním strojem

10. ZKUŠEBNÍ STROJ ZWICK

Celý název	Zwick 145 665
Maximální zkušební síla	20 kN
Celková výška	2012 mm
Celková šířka	630 mm
Strojová výška	1284 mm
Pracovní šířka	420 mm
Rozpětí čelistí	15 mm
Hmotnost	150 kg

Upínací zařízení stroje:



Obr.9.: Upínací zařízení stroje

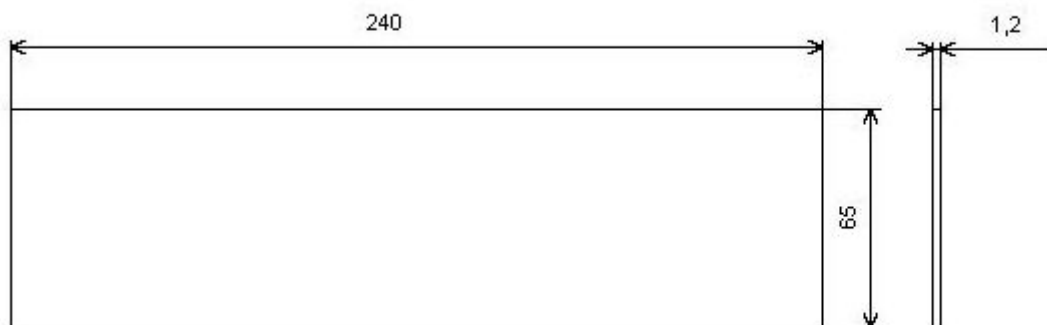
1. utahovací matice
2. otvor pro pojistný kolík
3. spojovací čep



Obr.10.: Zkušební stroj Zwick (bez upnutých čelistí) s počítačem vyhodnocujícím jeho činnost

11. ZKUŠEBNÍ VZOREK

Při zkoušce byl použit vzorek z pryže s následujícími rozměry:



Obr.11.: Tvar a rozměry zkušební vzorku

12. PRŮBĚH ZKOUŠKY

Zkouška probíhala ve speciální zkušební místnosti, kde se nachází výše zmiňovaný zkušební stroj Zwick. Zkušební stroj je napojen na počítač, pomocí kterého nejen nastavujeme

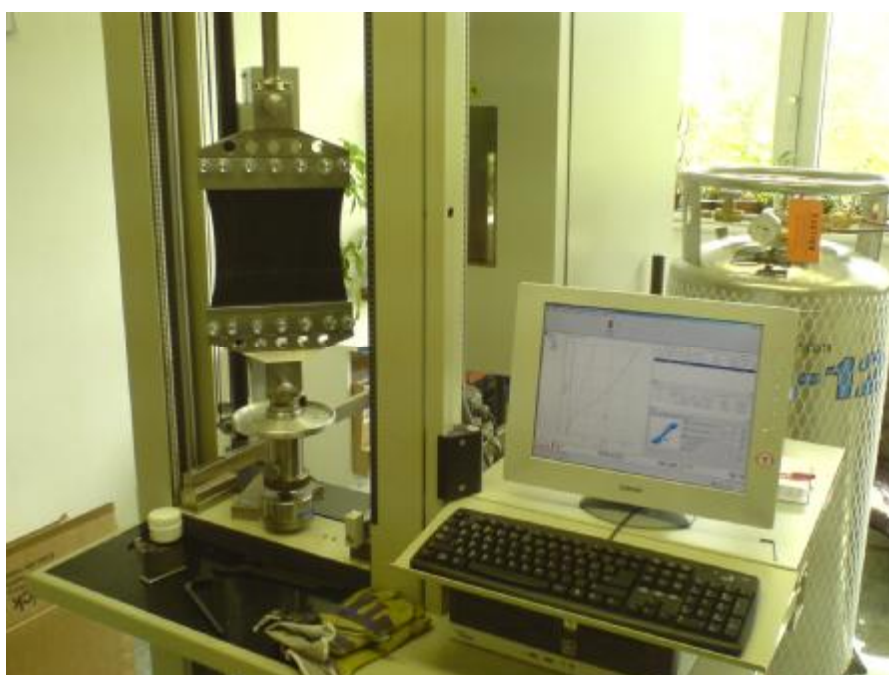
všechny potřebné vstupní parametry, ale hlavně vyhodnocuje celou zkoušku a zaznamenává ji do grafu závislosti prodloužení materiálu na zatěžující síle, vzniká tedy tahová křivka.

Zkouška probíhala následovně:

- 1) připravili jsme si zkušební vzorek (v našem případě byl použit vzorek z pryže)
- 2) obě čelisti jsme pevně upnuli do rámu stroje, aby při zkoušce neměnily požadovanou polohu
- 3) do počítače jsme zadali všechny důležité vstupní veličiny (např. rozměry a materiál vzorku, rychlost posuvu čelistí, atd.)
- 4) upnuli jsme vzorek do čelistí a pevně přitáhli šrouby na čelistech, aby nedošlo k vyklouznutí vzorku z čelistí v průběhu zkoušky
- 5) na stroji zarážkou zajistíme nejvyšší možnou hodnotu vyjetí čelistí

Tímto je vše připraveno pro sepnutí stroje a započetí samotné zkoušky.

- 6) zkouška probíhá - zkoušený vzorek je roztahován rychlostí nastaveného posuvu, zkouška je v průběhu přímo vyhodnocována na počítači a zaznamenávána do křivky



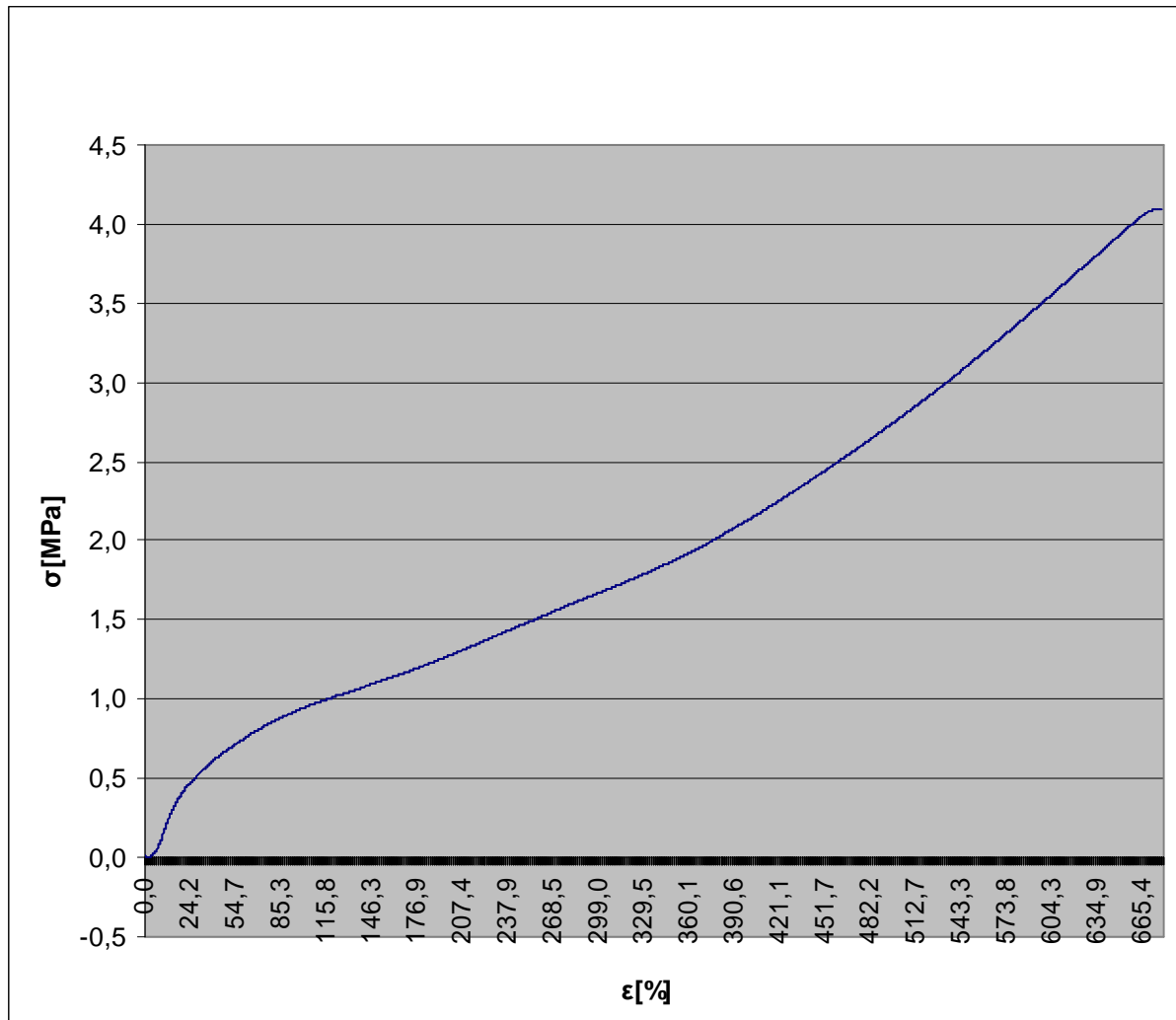
Obr.12.,13.: Průběh tahové zkoušky

- 7) dochází k roztržení vzorku a tím zkouška končí, tahová křivka je kompletní



Obr.14.: Přetržení vzorku – konec zkoušky

13. VÝSLEDEK ZKOUŠKY-TAHOVÁ KŘIVKA



Obr.15.: Tahová křivka - křivka závislosti poměrného prodloužení na napětí

14. ZÁVĚR

Cílem této bakalářské práce byla konstrukce přípravku (čelistí) pro použití při tahové zkoušce pro testovaný vzorek z elastomerního materiálu (pryže). Čelisti byly navrženy s ohledem na přijatelnou hmotnost a pro konkrétní použití (vyřešení upnutí ke stroji, otvory pro odlehčení a drážky pro správné uchycení vzorku – viz. výkresy). Výkresová dokumentace je zpracována v programu Catia V5R16 a nachází se v příloze bakalářské práce.

Následovala kontrola čelistí na dovolené namáhání v tahu pro nebezpečný průřez a kontrola pro dovolené namáhání ve smyku v šroubech. Hodnota maximálního zatížení v tahu je 204kN a hodnota maximálního zatížení ve smyku je 71,3kN. Obě hodnoty jsou větší, než je maximální zatížení vyvolané zkušebním strojem, proto materiál čelistí i šroubů vyhovuje při použití ve zkoušce.

Čelisti byly následně vyrobeny a jejich funkčnost byla odzkoušena na testovací tahové zkoušce ve zkušební místnosti. Tahová zkouška proběhla úspěšně a výsledná tahová křivka (křivka závislosti poměrného prodloužení na zatížení) má očekávaný průběh. To svědčí o tom, že čelisti jsou navrženy správně a nemají žádnou vadu, která by ohrozila jejich použití v praxi.

Čelisti se nachází ve zkušební místnosti a jsou připraveny k dalšímu použití při tahových zkouškách.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] ČSN ISO 37: *Pryž z vulkanizovaných nebo termoplastických kaučuků – Stanovení tahových vlastností*, Český normalizační institut, 1996
- [2] *MSC Software, c 2004*, dostupný z http://www.mssoftware.com/assets/103_elat_paper.pdf
- [3] *Ansys, Inc. c 2004*, dostupný z <http://www.ansys.net/ansys/papers/nonlinear/conflong-hyperel.pdf>
- [4] Bc. Haderka, M. *Vliv parametrů vulkanizace na mechanické vlastnosti elastomerů*, UTB ve Zlíně, 2006, [Diplomová práce]
- [5] Špaček, J. *Technologie gumárenská a plastikářská II*, Brno: Rektorát vysokého učení technického v Brně, 1980
- [6] Franta, I. *Gumárenská technologie I*, Praha: Nakladatelství technické literatury, 1979
- [7] Schätz, M. *Zkoušení kaučuků a plastických hmot I*, Praha: Nakladatelství technické literatury, 1971
- [8] Ducháček, V. *Polymery – výroba, vlastnosti, zpracování, použití*, Praha: Vysoká škola chemicko-technická v Praze, druhé vydání, 2006, dostupný z <http://www.vydavatelstvi.vscht.cz/knihy>
- [9] Hájek, T. *Návrh zkušebního zařízení pro určení materiálových charakteristik elastomerů*, UTB ve Zlíně, 2005, [Diplomová práce]
- [10] Hoffman, J., Urbanová, M. *Fyzika I.*, Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2005
- [11] *Zwick Information*, dostupný z www: <http://www.zwick.com/>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

W	potenciál deformační energie
I_1, I_2, I_3	deformační invarianty
E_{ij}	Lagrangeův deformační tenzor
$\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$	složky protažení
ε_i	poměrná deformace
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	složky napětí
t	tloušťka
t_0	původní tloušťka
J	objemový poměr
S_{ij}	druhý Piola-Kirchhoffův napět'ový tenzor
$\{M\}$	množina materiálových parametrů
F_τ	tečná síla
γ	poměrné posunutí
u	posunutí
a, b, c	rozměry
τ	tečné napětí
S	plocha průřezu
G	modul pružnosti ve smyku
E	modul pružnosti v tahu, prodloužení
μ	Poissonovo číslo
m	Poissonova konstanta
TS	pevnost v tahu
TS_b	pevnost v tahu při přetržení
E_b	tažnost
E_s	prodloužení při daném napětí
S_c	napětí při daném prodloužení
S_y	mez kluzu

E_y	prodloužení při mezi kluzu
$\sigma_{D,t}$	dovolené napětí v tahu
$F_{\max,stroje}$	maximální zatížení vyvolané zkušebním strojem
k	součinitel bezpečnosti
F	zatěžující síla
$\tau_{D,s}$	dovolené napětí ve stříhu
F_{\max}	maximální zatěžující síla

SEZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKŮ

- Obr.1.:** Průběh závislosti deformace na napětí u pryže
- Obr.2.:** Základní složky protažení
- Obr.3.:** Namáhání hranolu o rozměrech a,b,c smykem
- Obr.4.:** Zobrazení tahových charakteristik
- Obr.5.:** Tvar oboustranných lopatek
- Obr.6.:** Vysekávací nůž pro zkušební tělesa tvaru oboustranných lopatek
- Obr.7.:** Namáhání čelistí v tahu
- Obr.8.:** Namáhání šroubů ve stříhu
- Obr.9.:** Upínací zařízení stroje
- Obr.10.:** Zkušební stroj Zwick (bez upnutých čelistí) s počítačem
vyhodnocujícím jeho činnost
- Obr.11.:** Tvar a rozměry zkušebního vzorku
- Obr.12.:** Průběh tahové zkoušky
- Obr.13.:** Průběh tahové zkoušky
- Obr.14.:** Přetržení vzorku – konec zkoušky
- Obr.15.:** Tahová křivka - křivka závislosti poměrného prodloužení na napětí

SEZNAM POUŽITÝCH TABULEK

Tab.1.: Délka pracovní části oboustranných lopatek

Tab.2.: Rozměry vysekávacích nožů pro zkušební tělesa tvaru oboustranných lopatek

SEZNAM PŘÍLOH:

P I	Výrobní výkres pravé čelisti	ÚVI - BP - 08 - 01
P II	Výrobní výkres levé čelisti	ÚVI - BP - 08 - 02
P III	Sestava upínacích čelistí	ÚVI - BP - 08 - 03