

STANOVENÍ DYNAMICKÉ ODEZVY MAGNETOSENSITIVNÍCH KOMPOZITŮ S ELASTOMERICKOU MATRICÍ, PLNĚNÝCH MIKROČÁSTICEMI Z KARBONYLOVÉHO ŽELEZA

Bakalářská práce

Studijní program: B2301 – Strojní inženýrství
Studijní obor: 2301R000 – Strojní inženýrství

Autor práce: Milan Jašurek
Vedoucí práce: doc. Ing. Iva Petříková, Ph.D.

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE (PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Milan Jašurek**
Osobní číslo: **S15000072**
Studijní program: **B2301 Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Strojní inženýrství**
Název tématu: **Stanovení dynamické odezvy magnetosensitivních kompozitů s elastomerickou maticí, plněných mikročásticemi z karbonylového železa.**
Zadávací katedra: **Katedra mechaniky, pružnosti a pevnosti**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

Magnetosensitivní elastomery mění svoje útlumové vlastnosti v závislosti na intenzitě aplikovaného magnetického pole podobně jako magnetoreologické kapaliny.

Postup řešení:

- 1) zhotovení experimentálních vzorků,
- 2) cyklické zatěžování vzorků ve smyku za současného působení magnetického pole o proměnné intenzitě na Instron Electropuls,
- 3) experimentální zjištění odezvy vzorků na proměnné frekvence a amplitudy cyklického zatížení a na proměnnou intenzitu magnetického pole.

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy: cca 40 - 50 stran

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

- [1] DORFMANN L., OGDEN R. W.: Nonlinear theory of electroelastic and magnetoelastic interactions. Springer. ISBN 978-1-4614-9596-3.
- [2] VLACH J., TUAN, H. S. MARVALOVÁ B.: Experimental and numerical research of magnetosensitive elastomers. In: MARVALOVÁ B., PETRÍKOVÁ I., ČAPEK L., eds. Proc. of 47 int. conf. Experimental stress analysis. Sychrov. 2009, s. 283-290. Technická univerzita v Liberci. ISBN 978-80-7372-483-2.
- [3] ALBERDI-MUNIANIN A., GIL-NEGRETE N., KARI L.: Modelling energy flow through magneto-sensitive vibration isolators. International Journal of Engineering Science 65: 22-39.

Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. Iva Petříková, Ph.D.

Katedra mechaniky, pružnosti a pevnosti

Datum zadání bakalářské práce: 15. listopadu 2016

Termín odevzdání bakalářské práce: 15. února 2018

prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
děkan



doc. Ing. Iva Petříková, Ph.D.
vedoucí katedry

V Liberci dne 25. února 2017

Prohlášení

Byl(a) jsem seznámen(a) s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval(a) samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím bakalářské práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum:

Podpis:

Poděkování

Na tomto místě bych chtěl poděkovat především vedoucí mé práce doc. Ing. Ivě Petříkové, Ph.D. za trpělivý dohled a vedení při vytváření této bakalářské práce.

Dále bych rád poděkoval doc. Ing. Bohdaně Marvalové, CSc. za pomoc při zpracování experimentálně naměřených hodnot a dále technickému pracovníkovi katedry Bc. Lubomíru Sivčákovi za spolupráci při měření.

Abstrakt

Tato práce se zabývá zjišťováním závislosti útlumových vlastností magnetosensitivních elastomerů na intenzitě aplikovaného magnetického pole. V teoretické části popisuje jednotlivé veličiny ovlivňující tyto vlastnosti. V praktické části je popsána výroba experimentálního vzorku a dále je zde popsán postup samotného měření odezvy vzorku na měnících se podmínkách měření. Dále se v textu této práce nalézá porovnání různých zkoušených vzorků. V závěru práce se nachází vyhodnocení experimentu.

Klíčová slova

Vlastnosti pryží, plněná pryž, magnetosensitivní elastomery, komplexní modul, tuhost

Abstract

This work deals with the determination of the dependence of the attenuation properties of magnetosensitive elastomers on the intensity of applied magnetic field. The theoretical segment describes individual variables affecting these properties. The practical part describes the fabrication of the experimental sample and describes the procedure of sampling the response on changing measurement conditions. In the text of this thesis there is a comparison of the different samples tested. In the conclusion of the work is the evaluation of the experiment.

Key words

Rubber properties, filled rubber, magnetosensitive elastomers, complex modulus, stiffness

Obsah

1. Seznam použitých zkratk a symbolů.....	9
2. Úvod.....	10
3. Obecné vlastnosti elastomerů.....	11
3.1. Viskoelastická pružnost pryžových materiálů.....	11
3.2. Komplexní modul pružnosti.....	13
3.3. Tuhost pryží.....	16
3.3.1. Komplexní tuhost.....	17
3.4. Přírodní pryž.....	18
3.5. Silikonové pryže.....	19
3.5.1. Tekutý silikon HT 33 transparent LT.....	20
3.6. Plněná pryž.....	20
4. Magnetosensitivní elastomery.....	21
4.1. Vlastnosti magnetosensitivních elastomerů.....	23
5. Zhotovení experimentálního vzorku.....	25
5.1. Pomůcky k výrobě MRE.....	25
5.2. Postup výroby vzorků.....	26
5.3. Měření magnetického pole.....	28
6. Experimentální měření útlumových vlastností.....	31
6.1. Nastavení pracovních cyklů.....	31
7. Vyhodnocení naměřených hodnot.....	34
7.1. Průběhy posuvu a síly.....	34
7.2. Vyhodnocení složek komplexního modulu.....	37
7.2.1. Konzervativní složka komplexního modulu.....	38
7.2.2. Ztrátová složka komplexního modulu.....	40
7.2.3. Ztrátový úhel.....	41
7.3. Vyhodnocení tuhosti.....	43
8. Závěr.....	46
Seznam použité literatury.....	47

1. Seznam použitých zkratk a symbolů

Označení	Jednotky	Název
B	T	magnetická indukce
E	Pa	modul pružnosti v tahu
E'	Pa	konzervativní složka komplexního modulu v tahu
E''	Pa	ztrátová složka komplexního modulu v tahu
F	N	síla
f	Hz	frekvence
F_0	N	amplituda síly
G	Pa	modul pružnosti ve smyku
G'	Pa	konzervativní složka komplexního modulu ve smyku
G''	Pa	ztrátová složka komplexního modulu ve smyku
I	A	elektrický proud
k	N/mm	tuhost
k'	N/mm	konzervativní složka komplexní tuhosti
k''	N/mm	ztrátová složka komplexní tuhosti
R	Ω	elektrický odpor
R_0	Ω	elektrický odpor při počáteční teplotě vodiče
t	s	čas
T	K	termodynamická teplota
U	V	elektrické napětí
y	m	posuv
y_0	m	amplituda posuvu
α	K^{-1}	teplotní součinitel odporu
γ_0	m	amplituda zkosu
δ	rad	ztrátový úhel
ε	-	poměrné prodloužení
ε_0	-	amplituda poměrného prodloužení
η	-	činitel vnitřního tlumení
μ	$Pa \cdot s$	dynamická viskozita
σ	Pa	tahové napětí
σ_0	Pa	amplituda tahového napětí
τ_0	Pa	amplituda smykového napětí
ω	rad/s	úhlová rychlost

2. Úvod

Zadáním této bakalářské práce je experimentální stanovení dynamické odezvy elastomerů plněných magnetosensitivními částicemi. Cílem experimentu je výroba experimentálního vzorku a zjištění reakce jednotlivých zkušebních vzorků na proměnné frekvence a amplitudy cyklického zatížení a dále na měnící se intenzitu magnetického pole

Hlavním úkolem bakalářské práce je zjištění změn mechanických vlastností zkušebních vzorků v závislosti na působení magnetického pole, a to zejména zjištění útlumových vlastností vzorků.

První část práce se bude stručně zabývat obecnými vlastnostmi pryží, jejich rozdělením a popisem především jejich konstrukčních vlastností. Podrobněji bude nahlíženo na pryže, jelikož jejich dynamické zkoušení je tématem této práce.

V druhé části bude popsán postup vyhotovení a přípravy vzorků pro experiment. Dále zde bude vylíčen postup samotného měření, a to včetně zjištění magnetických vlastností vzorků a dynamického namáhání.

Závěrečná kapitola bude obsahovat zpracování a následné vyhodnocení naměřených veličin.

3. Obecné vlastnosti elastomerů

Elastomery, označované také jako pryže, jsou v technické praxi využívány především pro své specifické mechanické vlastnosti.

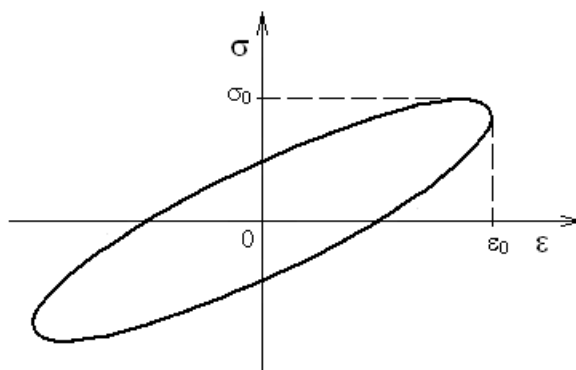
Základní charakteristikou těchto materiálů je jejich viskoelastické chování. Tato vlastnost popisuje vnitřní elastické a vnější viskózní vzájemné působení materiálu. Jedná se o přechodovou oblast, která se nachází mezi ideálně elastickými a viskózními materiály. Viskoelastická charakterizuje mechanickou povahu těles při jejich dynamickém zatěžování. Význam této vlastnosti je v technické praxi velice důležitý, jelikož ve velké většině případů jsou tělesa namáhána právě dynamicky. Právě z důvodu důležitosti viskoelastického chování pryží bude této problematice věnována následující kapitola. V souvislosti s viskoelastickými vlastnostmi se dále hovoří o tzv. komplexním modulu pružnosti, o kterém bude pojednáváno v kapitole 3.2.

Dalšími charakteristickými vlastnostmi pryžových materiálů jsou vysoká pružnost a nízký Youngův modul pružnosti. Youngův modul pružnosti dosahuje hodnot v rozmezí maximálně několik jednotek MPa. Hodnota Poissonovy konstanty je blízká hodnotě $\mu = 0,5$. Tato hodnota Poissonovy konstanty vyjadřuje stav nestlačitelnosti tělesa v případě pružných deformací. Na pryže je nahlíženo jako na dokonale nestlačitelné. Tělesa z pryže si tedy v průběhu deformací zachovávají konstantní objem.

Důležitou mechanickou vlastností pryže je také její tuhost. Této vlastnosti je věnována kapitola 3.3.

3.1. Viskoelastická pružnost pryžových materiálů

U pryžových materiálů nemá časový průběh deformace, jakožto reakce na napětí, konstantní průběh vůči časové ose. Z toho vyplývá, že pryže vykazují hysterezi a následnou relaxaci jejich deformační reakce. Toto chování je zobrazeno na obrázku 1.



Obrázek 1 Závislost napětí na deformaci při harmonickém namáhání. [10]

Pro elastické materiály lze využít výpočtové vztahy pro Hookeův zákon pro jednoosou napjatost, který popisuje závislost napětí na deformaci. Tato závislost je lineární a lze ji použít spíše k popisu elastických materiálů.

$$\sigma = E \cdot \varepsilon, \quad (3.1)$$

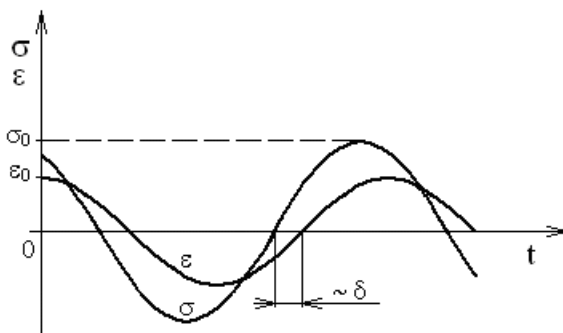
kde konstantu E nazýváme Youngovým modulem pružnosti v tahu a jedná se o konstantu přímé úměrnosti, ε je poměrná deformace a σ je jednoosá napjatost.

Při viskoelastickém chování materiálů lze dále využít rovnice pro napětí a deformaci při harmonickém namáhání:

$$\sigma = \sigma_0 \cos(\omega t + \delta) \quad (3.2)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \cos(\omega t) \quad (3.3)$$

kde σ_0 je amplituda napětí, ε_0 amplituda poměrné deformace, ω je úhlová frekvence, t je čas a δ je fázový posuv mezi napětím a poměrnou deformací. Přítomnost fázového posuvu nám říká, že napětí předbíhá poměrnou deformaci. Toto chování je znázorněno na obrázku 2.



Obrázek 2 Časová závislost napětí a poměrné deformace při harmonickém namáhání viskoelastických materiálů [10]

3.2. Komplexní modul pružnosti

O komplexním¹ modulu pružnosti se hovoří jako o poměru napětí a poměrné deformace vyjádřené v komplexní rovině. Modul pružnosti je vlastnost, která určuje tlumící vlastnosti. Tento modul se skládá ze dvou složek, a to ze složky reálné a složky imaginární.

Pokud se jedná o matematické vyjádření komplexního modulu, je možno využít vztahy uvedeného v kapitole o viskoelasticitě pryžových materiálů, který lze upravit následujícím způsobem:

$$\begin{aligned}\sigma &= \sigma_0 \cos(\omega t + \delta) = \sigma_0 \cos\delta \cdot \cos(\omega t) - \sigma_0 \sin\delta \cdot \sin(\omega t) = \\ &= \sigma_0 \cos\delta \cdot \cos(\omega t) + \sigma_0 \sin\delta \cdot \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right)\end{aligned}$$

Výše uvedenou rovnici lze zjednodušit a přepsat do tvaru:

$$\sigma = E' \cdot \varepsilon_0 \cos(\omega t) + E'' \cdot \varepsilon_0 \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right), \quad (3.5)$$

kde E' se nazývá reálná složka komplexního modulu pružnosti v tahu a E'' je jeho imaginární složka. Pro reálnou složku E' se používá označení konzervativní modul² (storage modulus) a v literatuře bývá popisován značkou E_s . Při zatěžování materiálu harmonickým namáháním o úhlové frekvenci ω charakterizuje reálná složka bezeztrátovou disipaci elastické složky energie.

Pro imaginární složku komplexního modulu E'' se používá označení ztrátový modul (loss modulus) a pro její popis se lze setkat s označením E_L . Jak již z názvu vyplývá, tato složka určuje složku energie, která se při zatížení harmonickým mechanickým namáháním o dané úhlové frekvenci přemění ve ztrátovou energii v podobě tepla.

Pro zjednodušení lze napsat, že reálná složka charakterizuje pevnostní vlastnosti materiálu a imaginární složka jeho tlumící vlastnosti. Pro obě složky komplexního modulu lze napsat rovnice:

$$E' = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \cdot \cos\delta \quad (3.6)$$

¹ Komplexní modul pružnosti je také označován jako dynamický.

² Lze se také setkat s označením paměťový modul.

$$E'' = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \cdot \sin \delta, \quad (3.7)$$

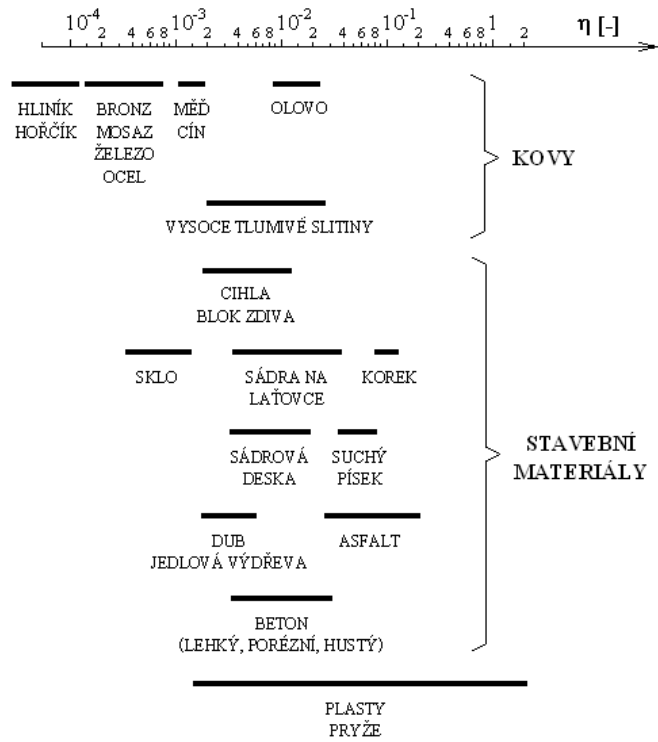
kde δ je fázový posuv mezi poměrnou deformací a napětím, σ_0 je amplituda napětí a ε_0 je amplituda poměrné deformace. Pokud známe obě složky komplexního modulu lze pro výsledný modul sestavit rovnici ve tvaru:

$$E = E' + i \cdot E'' \quad (3.8)$$

Pomocí složek komplexního modulu lze také vyjádřit tzv. ztrátový úhel δ . Tento úhel svírá v komplexní rovině úhel mezi výsledným modulem E a jeho reálnou složkou E' a lze vyjádřit goniometrickou funkcí tangens jako:

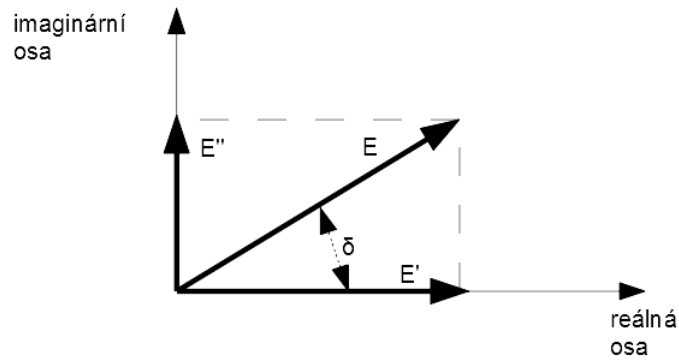
$$\operatorname{tg} \delta = \frac{E''}{E'} \quad (3.9)$$

Poměrem imaginární a reálné složky je také definován tzv. činitel vnitřního tlumení η . Jedná se o bezrozměrnou veličinu sloužící především pro popis tlumících vlastností materiálu. Tato veličina je závislá na velikosti fázového posuvu a pro viskoelastické materiály lze napsat, že pro hodnoty fázového posuvu δ blíží se k nule převažují elastické vlastnosti a pro hodnoty δ blíží se k hodnotě $\frac{\pi}{2}$ převažují jeho viskózní vlastnosti. Pro pryžové materiály a některé plasty obecně jsou hodnoty činitele vnitřního tlumení poměrně vysoké a lze napsat, že se chováním blíží k ideálně viskózním materiálům. Právě pro tuto vlastnost jsou pryžové materiály hojně využívané v inženýrské praxi právě jako tlumící prvky u dynamicky namáhaných strojů. Z obrázku 3 lze porovnáním s ostatními materiály používanými v inženýrské praxi dokázat, že tlumící schopnosti pryžových materiálů převyšují ostatní materiály poměrně výrazně.



Obrázek 3: Velikost činitele vnitřního tlumení u vybraných materiálů [10]

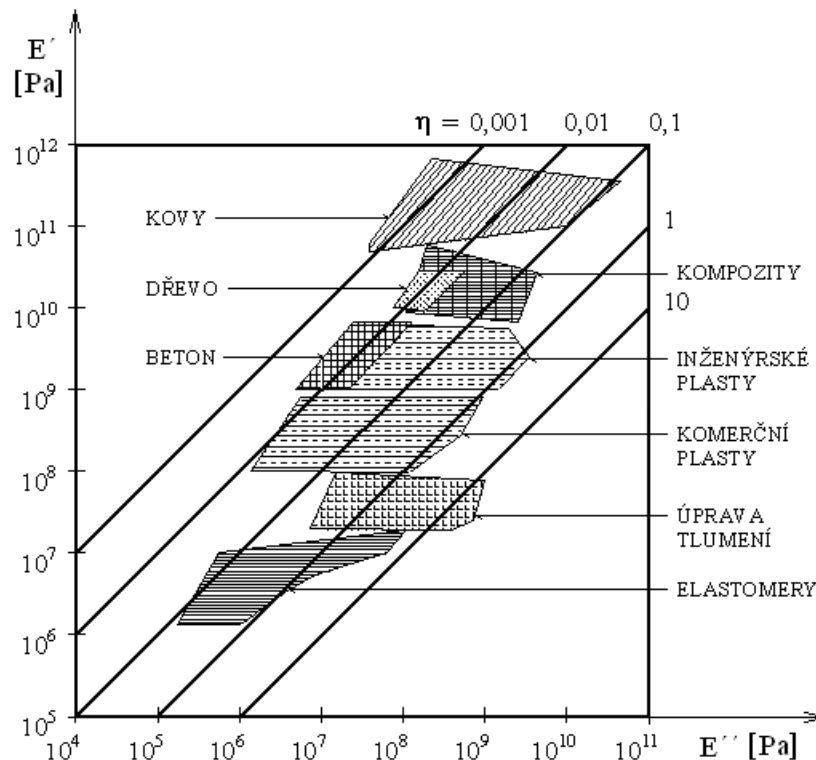
Při znalosti všech složek komplexního modulu lze výsledný modul E vyjádřit obecně v komplexní rovině graficky³:



Obrázek 4: Komplexní modul zobrazený v komplexní rovině

³ Hodnota ztrátového úhlu δ odpovídá hodnotě fázového posuvu z obrázku 2.

Porovnání komplexních modulů pružnosti s dalšími materiály lze pozorovat na obrázku číslo 5.



Obrázek 5: Porovnání rozsahů hodnot složek komplexního modulu pružnosti u vybraných materiálu. [10]

Při dosažení výše uvedených veličin do Hookova zákona, lze odvodit tzv. rozšířený tvar Hookova zákona, a to ve tvaru:

$$\sigma = E \cdot (1 + i \cdot \eta) \cdot \varepsilon \quad (3.10)$$

Veškeré vztahy, o kterých bylo pojednáváno v této kapitole, byly odvozeny pro harmonické mechanické namáhání tahové. Analogicky lze tyto vztahy odvodit a aplikovat také pro smykové namáhání.

3.3. Tuhost pryží

Další významnou vlastností pryží je tuhost. Jedná se o obecnou charakteristiku tělesa, případně soustavy těles.

Obecně lze tuhost definovat jako míru změny délky tělesa vyvolanou působící silou. Matematicky tuto veličinu vyjadřuje vztah 3.11:

$$k = \frac{F}{y}, \quad (3.11)$$

kde F je zatěžující síla a y je pružná deformace tělesa. Na rozdíl od modulu pružnosti, o kterém se mluví jako o materiálové vlastnosti, je tuhost určena nejenom materiálem tělesa, ale také jeho rozměry.

3.3.1. Komplexní tuhost

Stejně jako modul pružnosti lze i tuhost vyjádřit v komplexní rovině. I když se v případě komplexní tuhosti jedná o obecnější charakteristiku, teorie, a především matematické vyjádření se v hlavních směrech shoduje s matematickým vyjádřením komplexního modulu.

Jako všechny veličiny vyjádřené v komplexní rovině se i tuhost skládá z imaginární a reálné složky. Imaginární složka komplexní tuhosti určuje energii, která se při harmonickém mechanickém zatěžování přemění na teplo a je dána vztahem:

$$k' = \frac{F_0}{y_0} \cdot \sin \delta \quad (3.12)$$

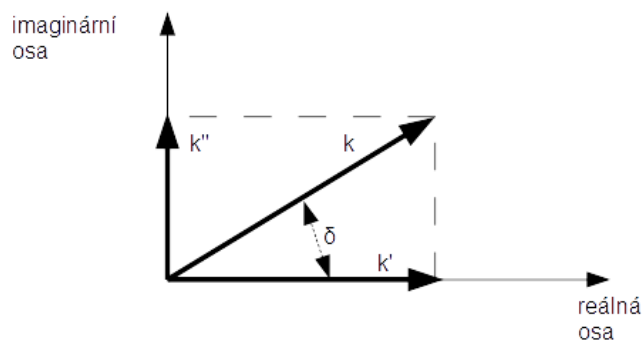
Reálná část poté určuje energii, která se přeměňuje mezi elastickou a setrvačnou složku beze ztrát a je dána vztahem:

$$k'' = \frac{F_0}{y_0} \cdot \cos \delta \quad (3.13)$$

Úhel δ označujeme jako ztrátový úhel a v komplexní rovině svírá úhel mezi reálnou složkou a absolutní hodnotou komplexní tuhosti, která je dána poměrem amplitud F_0 a y_0 :

$$k = \frac{F_0}{y_0} \quad (3.13)$$

Pokud známe veškeré výše uvedené veličiny lze zobrazit tuhost v komplexní rovině.



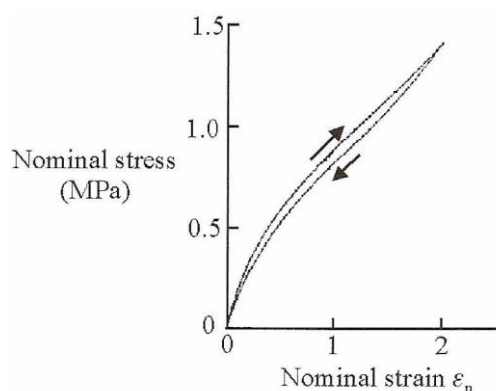
Obrázek 6: Zobrazení tuhosti v komplexní rovině

3.4. Přírodní pryž

První zmínky o využití pryžových materiálů pochází z Jižní Ameriky, kde byla využívána přírodní pryž. Používána byla především k výrobě náboženských předmětů a sportovních potřeb. Do Evropy dovezl první výtvoř z pryže Kryštof Kolumbus po objevení Ameriky. O významnějším konstrukčním využití přírodní pryže se dá hovořit až v 18. století.

Přírodní pryž se vyrábí ze stromu kaučukovník brazilský (*Hevea Brasiliensis*). Jedná se o polymer 1,4 polyisopren, který se skládá z monomerních jednotek. U tohoto monomeru brání dvojná vazba rotaci jeho levé strany vůči jeho pravé straně. Pokud by se jednalo o jednoduchou vazbu, rotace kolem ní by byla velice snadná a vedla by k vysoké ohebnosti molekulových řetězců. Pokud by se tento materiál nacházel v prostředí o pokojové teplotě, vyskytoval by se v tekutém stavu. Tento stav je v praxi nežádoucí, a proto se pro úpravu využívá proces vulkanizace. Tímto procesem se vytvoří příčné vazby v řetězcích a dojde k vytvoření můstku mezi molekulami, následně k vytvoření zesílené struktury. Obsah síry, který se při této přeměně používá, je 1 %. Modul pružnosti ve smyku se při pokojové teplotě pohybuje kolem 1 MPa. Pokud se obsah síry zvýší, je zesíťování velmi intenzivní a dojde ke vzniku velmi tvrdého materiálu tzv. ebonitu.

Typickou vlastností přírodní pryže je především vysoká pružnost. Do původního stavu se po odlehčení vrátí bez trvalé deformace. Tento materiál zvládne prodloužení o několik set procent bez mechanického porušení. Další typickou vlastností přírodní pryže je nízká hystereze – viz obrázek 7.



Obrázek 7: Hysterezní křivka přírodní pryže [3]

3.5. Silikonové pryže

Silikonové pryže se řadí mezi syntetické pryže. Jedná se tedy o uměle vytvořený pryžový materiál. Silikony lze obecně definovat jako polymery, jejichž kostra je tvořena vazbou atomů křemíku a kyslíku. Právě silikonové pryže se často využívají pro výrobu magnetosensitivních elastomerů, jejichž zkoušení je předmětem experimentální části této práce.

Charakteristikou vlastností silikonových pryží je především jejich odolnost vůči vyšším teplotám a vysoká odolnost proti stárnutí pod vlivem klimatických podmínek a UV záření. Jejich další výhodou jsou dobré elektroizolační vlastnosti. Lze je velmi dobře lepit i s jinými druhy materiálů. Dále je možné je pro výsledný výrobek dobře barvit.

Výrobky ze silikonových kaučuků odolávají teplotám v rozmezí od $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ až do $+200\text{ }^{\circ}\text{C}$. Směsi lze po přidání speciálních aditiv používat až do teplot $+300\text{ }^{\circ}\text{C}$, popřípadě $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Výrobky ze silikonových pryží mají široké uplatnění ve zdravotnictví, v automobilovém a leteckém průmyslu, ve stavebnictví a výrobcích pro domácnost. [3] Silikonový kaučuk se vyrábí smícháním tekutého silikonu, plniva a katalyzátoru, a jejich následnému ztuhnutí za pokojové teploty. Tento postup výroby se nazývá RTV (Room-temperature-vulcanization).

3.5.1. Tekutý silikon HT 33 transparent LT

Tekutá silikonová pryskyřice pro odlévání forem byla použita pro výrobu experimentálních vzorků v této práci. Jedná se o tužší formu silikonu, která je velmi pružná a odolná proti roztržení, po vytvrzení dosahuje tvrdosti Shore 33. Tento typ silikonu je vhodný pro větší formy nebo pro méně tvarově náročné formy a výrobky. Pro prodloužení doby zpracovatelnosti je možné použít zpomalovací aditiva. [9]

3.6. Plněná pryž

V technické praxi se často využívají tzv. plněné (ztužené) pryže. Do pryže se s cílem zlepšení jejich mechanických vlastností přidávají nejrůznější plniva. Velmi rozšířenou přísadou jsou tzv. aktivní saze, které se využívají například pro zvýšení odolnosti proti opotřebení pneumatik. Velikost částic těchto sazí se pohybuje okolo hodnoty 20 nm. Tyto částice se shlukují do útvaru mnohem větších rozměrů. Poměr plniva se udává jako počet dílů (nejčastěji hmotnostních) na 100 dílů pryže (phr). Směs plniva promíseného s pryží se vytvoří ještě před vulkanizací. O výsledné směsi hovoříme jako o kompozitu tvořeném tuhými částicemi plniva v elastomerické matici. Mezi částicemi plniva a elastomerickou maticí se utvoří chemicko-fyzikální vazby, v případě termoplastických elastomerů se pak jedná o vazbu kovalentní. Výsledná pevnost těchto vazeb závisí na vlastnostech částic plniva.

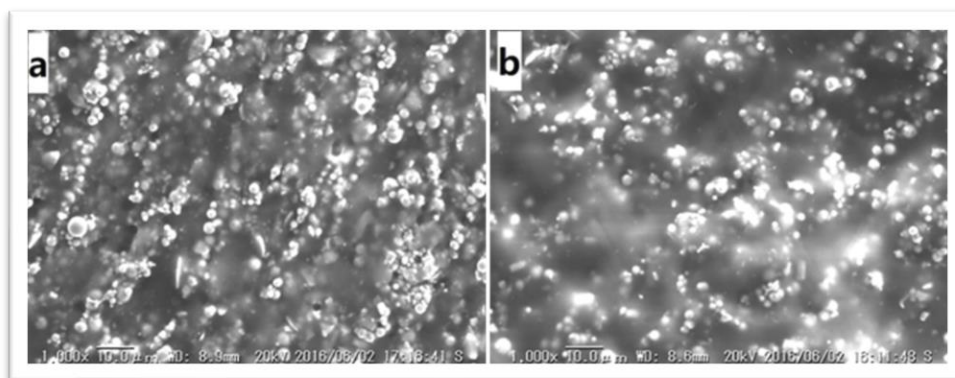
Do pryžových materiálů se přidávají plniva také za účelem optimalizace výroby, případně snížení jejich dopadů na životní prostředí. Mezi tato plniva můžeme řadit různá vulkanizační činidla, stabilizátory, urychlovače, antioxidanty, eventuálně látky sloužící ke zlepšení zpracování výsledné směsi.

4. Magnetosensitivní elastomery

Magnetosensitivní elastomery jsou materiály, které se řadí mezi plněné pryže. Jsou to materiály, jejichž reologické vlastnosti lze kontrolovat za pomoci vnějšího magnetického pole. Magnetosensitivní elastomery (bývají označovány také jako magnetoreologické, dále MRE) se řadí mezi tzv. smart materiály. Tyto smart materiály jsou typické pro svou schopnost měnit své vlastnosti v důsledku změny ve vnějším okolí a posléze se vrátit do původního stavu. Na tyto změny jsou schopné reagovat bez nutnosti připojení externího řídicího systému. Jako příklad z použití v praxi lze zmínit například skla, která mění svou barvu v důsledku intenzity slunečního záření nebo materiály sloužící v medicíně, které jsou schopny uvolňovat léčiva po detekci určitých látek v tělním oběhu.

MRE se skládají z měkké matrice, kterou může být některý z mnoha přírodních nebo synteticky vyrobených plastů. Velmi často bývá používán například silikon. Jako plnivo slouží mikročástice magneticky sensitivní látky. Právě tyto částice způsobují změny vlastností výsledného kompozitu z MRE po vložení do magnetického pole. Využívá se především změn modulu a tlumení. Po vyjmutí MRE z působícího magnetického pole se vlastnosti vrátí do původních hodnot. Mezi hlavní výhody MRE patří jejich dobrá stálost, možnost kontroly nad změnami jejich vlastností, reverzibilita nebo rychlá odezva na změny vnějšího magnetického pole. Právě tyto výhody jsou jedním z důvodů, proč se výzkum MRE začal rozvíjet a tyto materiály se postupně dostaly do praxe.

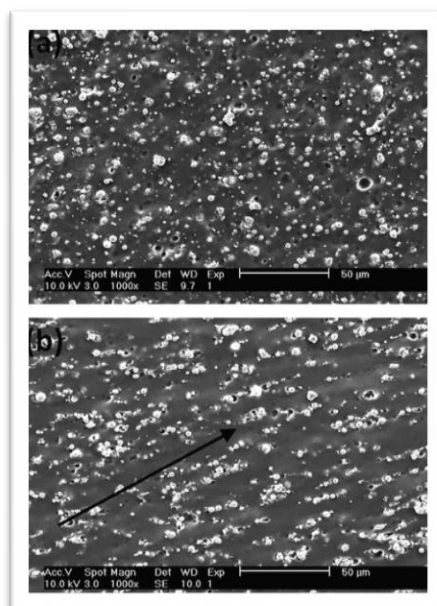
MRE se skládají ze tří částí. Hlavním komponentem MRE jsou magneticky polarizované mikročástice feromagnetického železa. Také se používají slitiny železa a kobaltu, jejich výskyt v MRE kompozitech ovšem není tak běžný. Tyto částice jsou použity jako plnivo do gelové silikonové matrice, která je druhým hlavním komponentem. Třetí částí jsou přídatná aditiva, nejčastěji silikonový olej. Ten se přidává pro zvýšení velikostí mezi molekulami v matrici a tím dojde i ke zvýšení spojitosti molekul. [2]



Obrázek 8: a. MRE bez plniva ve formě silikonového oleje; b. MRE se silikonovým olejem [5]

Velikost železných částic může být různá, ale většinou se pohybuje v rozmezí 3-5 μm . [3] Tvar mikročástic bývá nejčastěji kulový, ale lze použít také částice nepravidelných tvarů. Silikonová matrice se skládá ze samotného silikonu v gelovém stavu a katalyzátoru, který se přidává až po rozmíchání plniva v tekutém silikonu. Po přidání katalyzátoru výsledný kompozit ztuhne.

MRE se mohou dělit do dvou skupin, a to na izotropní a anizotropní. U izotropních MRE se polarizované mikročástice rozptýlí do matrice nahodile. Vlastnosti izotropních MRE jsou tedy homogenní (ve všech směrech mají stejné vlastnosti). U anizotropních MRE se mikročástice během procesu výroby uspořádají do řetězců, které jsou zřetelně vidět na obrázku 9b. Tento proces vzniká tak, že se kompozit MRE ihned po zamíchání vloží do magnetického pole. Při měření vlastností a pevnostních zkouškách anizotropních MRE je nejprve nutno určit směr utvořených řetězců. Následně lze provádět potřebná měření právě s ohledem na směr těchto řetězců.



Obrázek 9: a. izotropní MRE; b. anizotropní MRE [11]

4.1. Vlastnosti magnetosensitivních elastomerů

Na výsledné chování MRE kompozitu může mít vliv celá řada faktorů. Jedním z těchto faktorů je materiál matrice. Je možné vybírat z velkého množství různých elastomerů, z nichž má každý rozdílné vlastnosti. Výběr určitého elastomeru ovlivní například výsledný modul pružnosti, tvrdost nebo odolnost finálního materiálu vůči poškození. Výběr materiálu pro elastomerickou matici je ale především důležitý pro viskoelastické vlastnosti výsledného MRE.

Dalším, neméně důležitým faktorem ovlivňující vlastnosti MRE, je výběr plniva. V případě plniva není důležitý pouze výběr materiálu, ale také velikost částic. V případě druhu materiálu se nejčastěji volí feromagnetické železo. V menší míře se používá slitina železa a kobaltu, kde kobalt slouží ke zlepšení mechanických vlastností železa. Velikost částic ovlivňuje především utváření řetězců mikročástic, které se tvoří za působení magnetického pole. Předpokládá se, že při použití větších mikročástic nemusí dojít k dostatečně rovnoměrnému zmagnetizování. Jako rozhodující velikost se uvádí 1,5 µm [2]. Tento fakt má vliv především na výsledné anizotropní vlastnosti MRE. Vedlejší, spíše praktický význam, má velikost mikročástic na výrobu materiálu, kde velikost může mít vliv při smíchávání jednotlivých komponent. Tento faktor bude patrný pouze v případě, že se velikost mikročástic bude lišit řádově.

Jako další důležitý faktor mající vliv na vlastnosti kompozitu MRE je přítomnost vzduchových bublinek v materiálu. Při rozmíchávání mikročástic plniva v matrici dochází i k mísení se vzduchem. Tento fakt má za následek vznik vzduchových kapsiček v hotovém materiálu, jejichž výskyt je třeba při výrobě minimalizovat.

Prvkem, který významnou měrou ovlivňuje vlastnosti MRE, jsou také vlastnosti působícího magnetického pole. Především intenzita magnetického pole má značný vliv na vlastnosti kompozitu z MRE.

5. Zhotovení experimentálních vzorků

Jak již bylo zmíněno v předcházejících kapitolách samotná výroba materiálu má značný vliv na kvalitu a vlastnosti výsledného produktu. Jedním z cílů této práce je také detailní popis postupu výroby vzorků materiálu z MRE. Zkoumaným materiálem byl silikonový gel obsahující plnivo karbonylového železa.

5.1. Pomůcky k výrobě MRE

Magnetosensitivní elastomery jsou tvořeny matricí a plnivem. Tyto složky jsou pro výroby experimentálních vzorků nejdůležitější. První složkou MRE je dvousložkový silikonový gel⁴, který plní funkci matrice. Jak již bylo uvedeno v kapitole 3.5.1, byl použit tekutý silikon HT 33 – transparent LT. Jeho primární složkou je samotný silikon a sekundární složkou je katalyzátor k HT 33, který se přidává pro výsledné ztuhnutí. Druhou složkou je plnivo. V tomto případě bylo zvoleno karbonylové železo s nízkým obsahem hořčíku. Obsah hořčíku je nižší než 19,5 %.

Další pomůckou potřebnou k výrobě vzorků je forma. Forma využitá pro tento experiment má rozměry 100x80x5 mm a její okraje jsou tvořeny dřevěnými lištami nalepených pomocí lepící pásky na skleněnou⁵ podložku. K výrobě vzorku je dále nutný odměrný válec, ve kterém byly odměřeny objemové podíly obou složek silikonové pryže i částic karbonylového železa. Pro smíchání složek MRE se použije skleněná válcová nádoba a skleněná tyčinka. Pro odstranění vzduchových bublin z materiálu posloužila vakuová nádoba. Pro upevnění vzorku do zkušebního přístroje byly použity kovové upínací pomůcky. Na lepení vzorků bylo použito dvousložkové lepidlo LOCTITE SUPER ATTACK ALL PLASTICS (možné je použití jakéhokoli lepidla na plasty).

Dalšími pomůckami využitými pro výrobu vzorku jsou elektronické posuvné měřidlo, oddělovací řezné nástroje, ochranné rukavice, stopky, ethanolový odmašťovač.

⁴ Z důvodu lepší kvality materiálu je výhodné skladovat silikon v chladícím zařízení.

⁵ Pro využití skleněných pomůcek hovoří snazší práce s materiálem i následné odstraňování zbytkového materiálu z použitých nádob.

5.2. Postup výroby vzorků

Postup výroby MRE je poměrně náročný jak na určování objemových poměrů, tak na preciznost prováděných operací. Vzniklé nepřesnosti mohou poměrně značnou měrou ovlivnit vlastnosti vyrobeného materiálu.

Prvním krokem k výrobě zkušebních vzorků je výroba formy. Jak bylo již zmíněno v předcházejícím odstavci, pro výrobu formy bylo použito skleněné destičky jako podkladu a dřevěných lišt sloužících jako okraje formy. Papírové destičky byly ke skleněnému podkladu připevněny lepicí páskou. Po procesu vulkanizace lze vyrobený plát z formy snadno vyjmout.

Při výrobě samotného materiálu je nejprve důležité určit objemové poměry jednotlivých složek MRE. V tomto případě byl zvolen objemový poměr silikonové matrice a plniva 7:3. Na silikonový gel tedy připadá 70 % z celkového objemu. Tento objemový podíl je třeba rozdělit na primární silikonový gel a sekundární akcelerátor v poměru 1:1. U plniva je důležité, zda se jedná o objem stlačeného nebo nestlačeného materiálu. U nestlačených mikročástic je zřejmé, že skutečný objem materiálu plniva je menší, jelikož prostor mezi částicemi karbonylového železa je vyplněn vzduchem. Z tohoto důvodu bylo zvoleno použití stlačeného materiálu.

Pro odměření objemů jednotlivých složek bylo nejprve nutno určit objem formy. Tento objem, 0,04 litru, byl navýšen na 0,1 litru. Jednotlivé objemové podíly poté činily:

Tabulka 1: Objemové podíly jednotlivých složek MRE

	Objem [l]
Primární složka silikonu	0,035
Sekundární složka silikonu (akcelerátor)	0,035
Plnivo (karbonylové železo)	0,03

Pro samotné odměření objemových podílů byly použity skleněné odměrné válce. Pro určení a stlačení objemu mikročástic plniva bylo výhodné použít úzkého odměrného válce a skleněné tyčinky.

Pro výrobu bylo využito procesu RTV (Room-temperature-vulcanization). Jedná se o postup, při kterém dojde ke smíchání tekutého silikonu, plniva a katalyzátoru, a jejich následnému ztuhnutí za pokojové teploty. Smíchání jednotlivých složek proběhlo v odměrném válci, kam byla nejprve nalita primární složka silikonového gelu. Do silikonu se za pomoci papírové nálevky pomalu přisypávaly mikročástice plniva. Plnivo bylo přidáváno za stálého míchání. Míchání se provádělo do doby, než se z původně bezbarvého a průsvitného gelu stala tmavě šedá, kompaktní, tekutá hmota bez viditelných sypkých částí. Následně byla přidána i složka akceleratoru, která byla opět rozmíchána v již vytvořené substanci.

Jak již bylo zmíněno v předcházejících kapitolách, při míchání vznikají v materiálu vzduchové bubliny, které je nutno odstranit. Odstranění vzduchových bublinek bylo provedeno ve vakuové nádobě, kam byl odměrný válec s materiálem vložen a za pomoci příslušné pumpy byl vzduch z nádoby odčerpán⁶. Odsáváním vzduchu se bubliny v materiálu přemisťují na povrch materiálu⁷ a následně ven z nádoby.

Po odstranění vzduchových bublinek se materiál přelije z válce do připravené formy a následně se celý proces odstranění vzduchových bublin opakuje. Tentokrát je však důležité, aby byla forma do vakuové nádoby umístěná ve vodorovné poloze, z důvodu vzniku konstantní výšky vyráběných vzorků.

Celá forma byla vložena do chladicího zařízení, kde dojde ke zpomalení procesu vulkanizace a prodlouží se čas pro únik vzduchových bublin ze vzorku. Následné práce se ztuhlým materiálem byly sice prováděny až za týden, ale k úplnému ztuhnutí dojde v řádu několika hodin⁸.

Po ztuhnutí byl materiál vyjmut z formy. Materiál bylo následně nutno rozřezat na díly určené k samotnému měření. Parametry zkušebního vzorku odpovídaly vzorku pro smykové zatížení „shear lap“. Velikost zkušebních vzorků byla 20x20 mm. K oddělení materiálu byl využit řezný nástroj s rotačním ostřím.

⁶ Díky předchozímu uložení obou složek silikonu v chladném prostředí byl proces ztuhnutí oddálen. Není proto nutné tyto úkony zvlášť uspěchat.

⁷ Tento proces je možné sledovat pouhým okem. Je tak možné celý proces jednoduše kontrolovat.

⁸ Dodavatel materiálu udává 3 hodiny.

Již nařezané zkušební vzorky bylo nutné přilepit na hliníkové upínací pásky, sloužící k upnutí vzorků do zkušebního přístroje. Pro jeden zkušební vzorek je potřeba tři upínací pásky a dvou vzorků MRE. Vzorky i upínací pásky bylo nejprve nutno očistit a odmastit ethanolovým odmašťovačem v místech slepení. Následně je nutno postupovat dle návodu použitého lepidla. V našem případě byl nejprve nanesen aktivační člen. Poté bylo nutno vyčkat 60 sekund a nanést akcelerator. Následně byl vzorek vložen do svěráku, kde došlo k zatvrdnutí⁹ lepidla a bylo možné pokračovat v lepení dalších prvků. Výsledný vzorek je vyobrazen na obrázku 10.



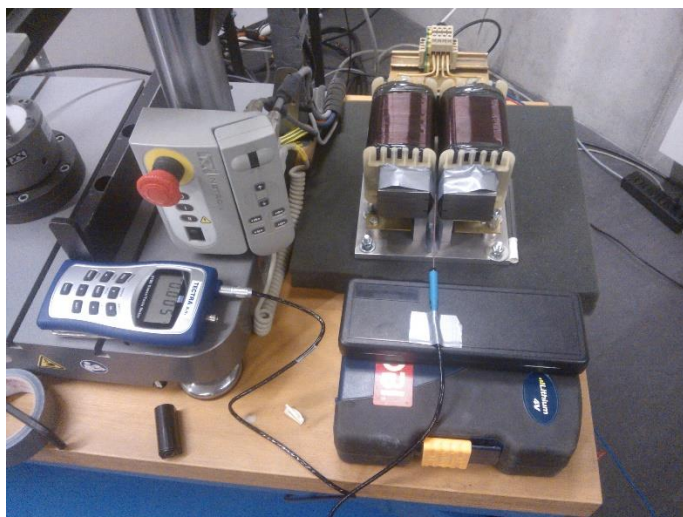
Obrázek 10: Zkušební vzorek MRE

5.3. Měření magnetického pole

Z důvodu stanovení odezvy vzorků na magnetické pole bylo nutné naměřit hodnoty intenzity magnetického pole mezi dvěma vzorky. Výsledkem tohoto měření se stal graf závislosti velikosti magnetické indukce na elektrickém proudu.

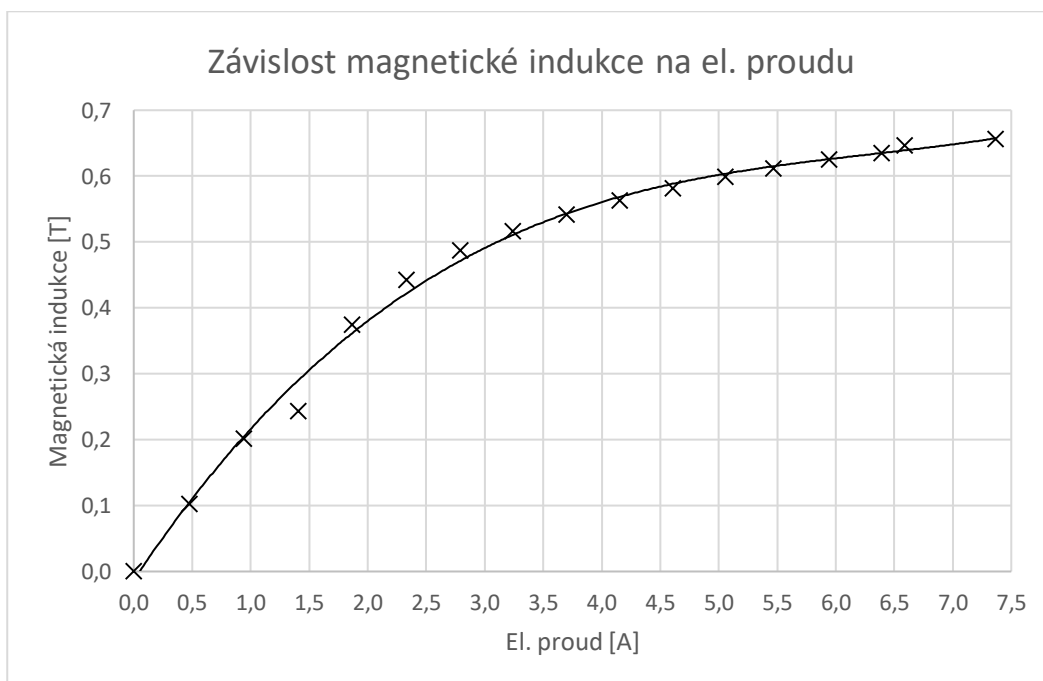
Pro měření magnetické indukce byl použit multimetr s připojenou Hallovo sondou. Tato sonda byla vložena mezi dva vzorky, které byly uchyceny mezi dvě části jádra elektromagnetu. Elektromagnet byl napájen ze sítě střídavým proudem. K řízení proudu protékajícím elektromagnetem byl použit stejnosměrný regulovatelný zdroj: STATRON typ 2228.5. Umístění sondy a upevnění vzorků k elektromagnetům je zobrazeno na obrázku 11.

⁹ K zaschnutí lepidla došlo v řádu několika minut.



Obrázek 11: Měření velikosti mg. pole

Proud byl tedy měřen v závislosti na napětí, které se měnilo v rozsahu 0-48 voltů (což byl maximální rozsah měniče napětí) v krocích po třech voltech. Byla provedena celkem 4 měření, přičemž se vždy nejprve zvyšovalo napětí po daných krocích a následně opět snižovalo na nulovou hodnotu. Výsledky měření jsou zobrazeny na následujícím obrázku a tabulce:



Obrázek 12: Graf závislosti mg. indukce na el. proudu

Tabulka 2: Tabulka naměřených hodnot mg. indukce

Napětí	Elektrický proud	Magnetická indukce
U [V]	I [A]	B [T]
0	0,000	0,000
3	0,474	0,103
6	0,940	0,201
9	1,405	0,243
12	1,864	0,374
15	2,330	0,443
18	2,789	0,487
21	3,238	0,517
24	3,698	0,542
27	4,154	0,564
30	4,610	0,581
33	5,055	0,599
36	5,469	0,611
39	5,944	0,625
42	6,393	0,635
45	6,391	0,647
48	7,365	0,657

Na měření magnetické indukce měla především vliv zvyšující se teplota magnetů a také teplota vodičů v celé soustavě. Při zahřívání vodičů dochází ke zvyšování jejich odporu¹⁰ a následnému snížení elektrického proudu proudícího do elektromagnetu.

¹⁰ Závislost odporu a teplotě: $R = R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta T)$

6. Experimentální měření útlumových vlastností

Veškerá měření byla prováděna na přístroji INSTRON Electopuls 3000, jehož měřicí cykly byly řízeny pomocí softwaru WaveMatrix Dynamic. Cílem měření bylo zjištění závislosti složek komplexního modulu a tuhosti na měnící se frekvenci a zvyšující se intenzitu magnetického pole. Vzorek byl namáhán smykovým harmonickým zatížením. V softwaru byly nastaveny jednotlivé pracovní cykly a výsledky měření byly zaznamenány do tabulky ve formátu .csv. Pro vyhodnocení naměřených hodnot byl využit software MatLab R2018a.

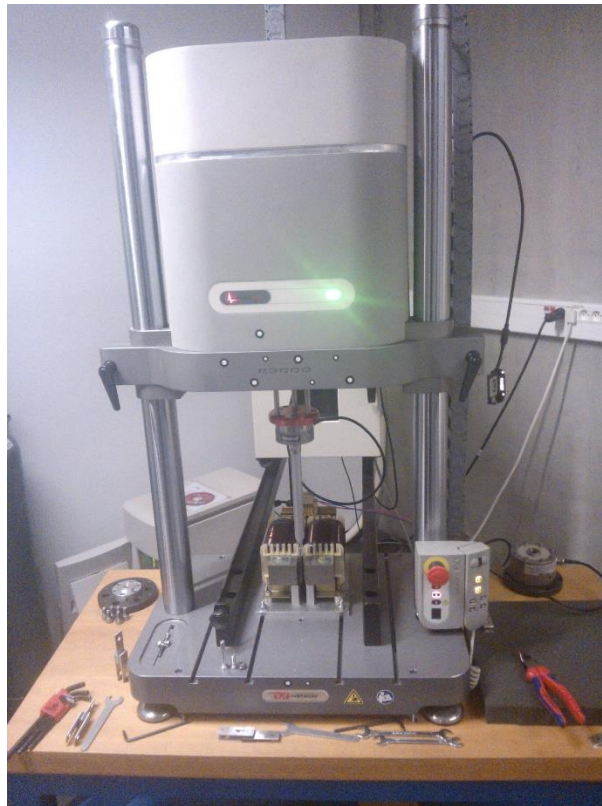
6.1. Nastavení pracovních cyklů

Jak již bylo zmíněno v úvodu kapitoly 6, pracovní cykly byly nastaveny v softwaru WaveMatrix. Jeden pracovní cyklus je dán jednou periodou T . Právě nastavení cyklů umožňuje řízení procesu, při kterém bylo možno určit odezvu vzorku na změnu určitých veličin. Tento program byl využit nikoli pouze k samotnému řízení procesu, ale také bylo možné sledovat přímé zobrazení harmonické křivky budící frekvence a hysterezní křivky v reálném čase.

Zkušební vzorek byl namáhán pouze v jednom směru (hodnoty posuvu byly pouze kladné), a proto bylo nutné v prvním kroku měření nastavit počáteční deformaci vzorku. Hodnota této deformace byla nastavena na $1,5 \text{ mm}$. Na tuto hodnotu je superponována harmonická funkce. Následně byly nastaveny hodnoty frekvencí jednotlivých pracovních cyklů. Obor hodnot měřených frekvencí byl $f = \langle 2; 20 \rangle \text{ Hz}$. Hodnoty frekvence se měnily po 2 Hz . Vzorkovací frekvence byla nastavena na 1000 Hz . Na začátku každého cyklu bylo nutné vyčkat, než se hodnota budících kmitů ustálí. Protože při vyšších hodnotách frekvence je čas nutný k ustálení vyšší, byl nastaven celkový počet kmitů v každém cyklu na hodnotu 80. Při měření bylo pro každý cyklus zaznamenáno posledních dvacet kmitů pro každou frekvenci, a to z důvodu ustálení velikosti amplitudy kmitání.

Protože byla zjišťována závislost nejen na frekvenci, ale především na změně magnetického pole, byl vzorek během namáhání umístěn mezi jádra elektromagnetu

podobně jako tomu bylo při měření magnetické indukce v kapitole 5.3. Celá soustava je zobrazena na obrázku 12:



Obrázek 13: Měření útlumových vlastností

Mezi jednotlivými měřeními se měnilo magnetické pole stejným způsobem jako v tabulce 2. Tímto způsobem byla získána pro každou hodnotu magnetického pole jedna tabulka závislostí naměřených veličin na frekvenci, viz tabulka 3¹¹. Při působení magnetického pole budou mít mikročástice z karbonylového železa tendenci se v silikonové matrici usměrnit. Tento fakt bude mít vliv na tlumící vlastnosti.

Měřeny byly celkem 4 zkušební vzorky. Pro porovnání výsledků bylo provedeno také měření bez působení magnetického pole. Taktéž bylo následně provedeno i měření vzorku, který neobsahoval železné plnivo.

¹¹Tabulka slouží pouze pro ilustraci, skutečný rozsah je 32 258 řádků.

Tabulka 3: Tabulka naměřených hodnot

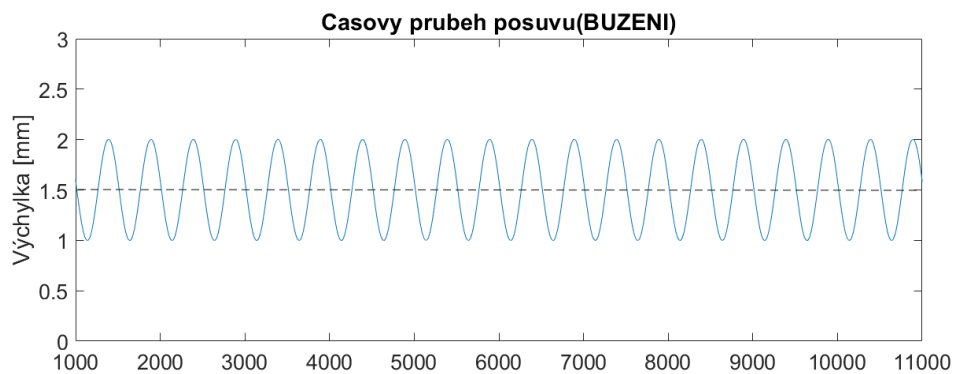
Total Time (s)	Cycle Elapsed Time (s)	Total Cycles	Elapsed Cycle s	Step	Total Cycle Count(ElectroPuls Wave form)	Position (Electro Puls:Position) (mm)	Load(ElectroPuls :Load) (N)	Displacement (ElectroPulsDigital Position) (mm)
5.002	0	1	1	2	1	-10.7	24.36	1.5
5.003	0.001	1	1	2	1	-10.7	24.39	1.5
5.004	0.002	1	1	2	1	-10.7	24.40	1.5
5.005	0.003	1	1	2	1	-10.7	24.40	1.5

7. Vyhodnocení naměřených hodnot

Výstup z experimentu je porovnání tlumících vlastností vzorku. V rámci vyhodnocení experimentu byly především srovnávány hodnoty komplexního modulu pružnosti a tuhosti vzorku. Pro vyhodnocení naměřených hodnot byl použit software MatLab.

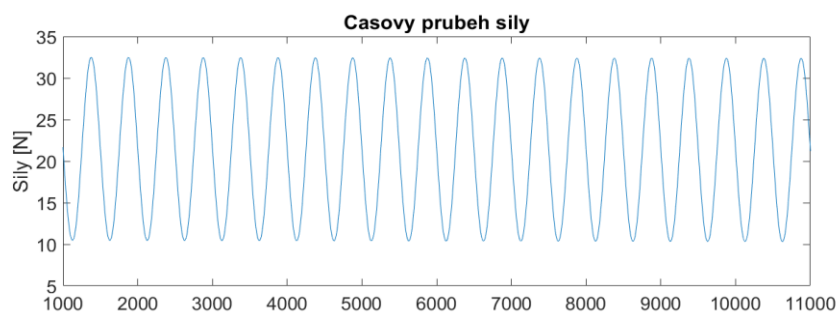
7.1. Průběhy posuvu a síly

Při experimentu byly naměřeny časové průběhy posuvu, jakožto budících kmitů, a snímané síly. Tyto průběhy jsou zobrazeny na obrázcích 14-17.



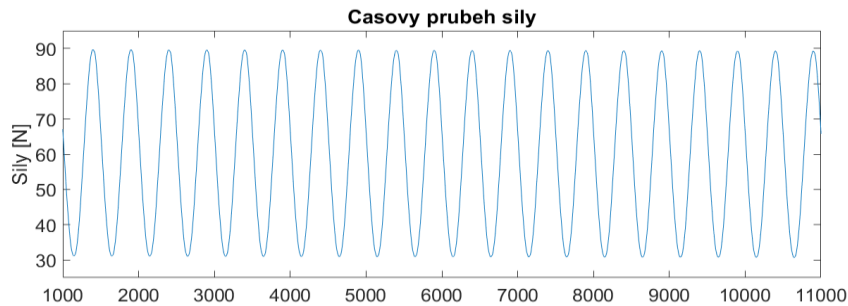
Obrázek 14: Časový průběh budících kmitů

Z grafů časových průběhů síly (jakožto odezvou na harmonické buzení) lze vyčíst, jak velkou silou bylo nutné působit na vzorek, aby bylo docíleno požadované hodnoty posuvu. Obrázek 14 zobrazuje časový průběh síly budících kmitů.

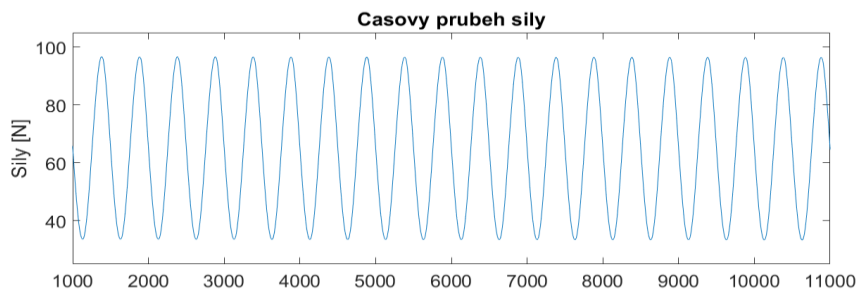


Obrázek 15: Časový průběh snímané síly neplněného vzorku

Na obrázku 15 je vyobrazen časový průběh snímané síly neplněného silikonového vzorku.



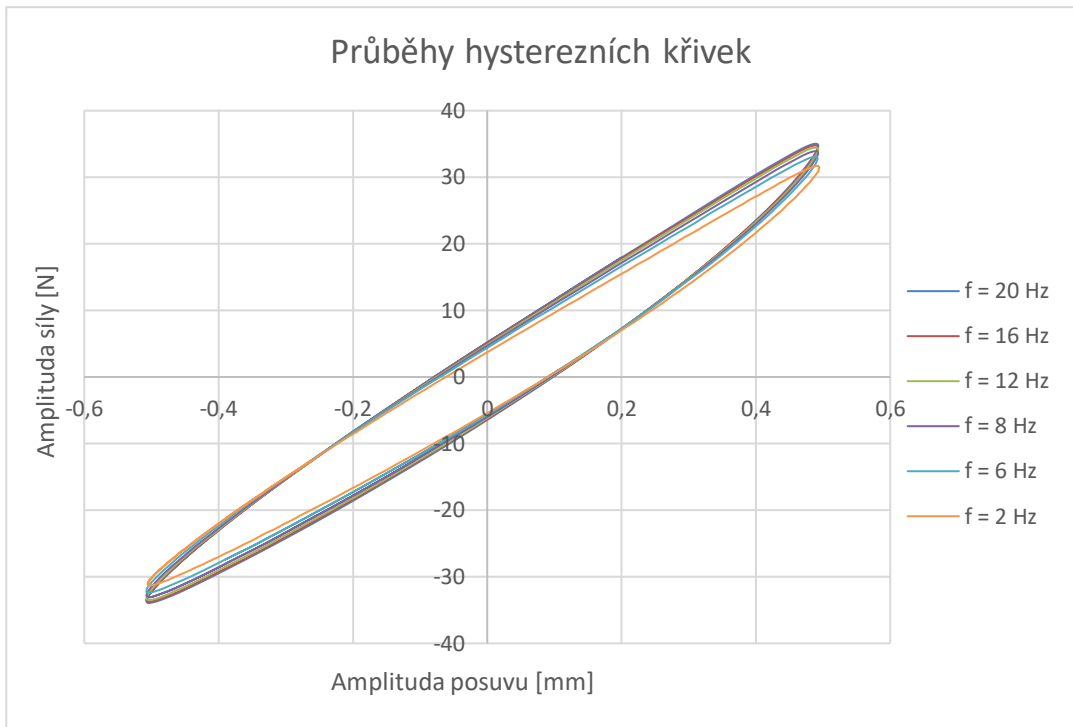
Obrázek 16: Časový průběh snímané síly plněného vzorku ($B = 0 \text{ T}$)



Obrázek 17: Časový průběh snímané síly plněného vzorku ($B = 0,657 \text{ T}$)

Obrázky 16 a 17 ukazují časové průběhy pro vzorek z MRE, přičemž na obrázku 16 nepůsobí magnetické pole a na obrázku 17 má hodnota magnetické indukce velikost $B = 0,657 \text{ T}$, tedy maximální měřenou hodnotu. Je zřejmé, že oproti neplněnému silikonu, je nutné na vzorek z MRE působit vyšší silou, aby bylo dosaženo požadovaného posuvu. Z toho vyplývá, že vzorek z MRE vykazuje vyšší tuhost než vzorek bez přidaného plniva. Podobný nárůst snímané síly a z toho vyplývající zvýšení tuhosti můžeme sledovat, pokud vzorek z MRE vložíme do magnetického pole. Vyhodnocení závislosti tuhosti na magnetické indukci a frekvenci bude blíže popsáno v kapitole 7.3.

Na obrázku 14 je znázorněna závislost síly na deformaci. Výsledkem této závislosti je hysterezní křivka. Průběhy hysterezních křivek na obrázku 18 odpovídají časovým průběhům síly a posuvu pro frekvence $f = 2, 6, 8, 12, 16, 20 \text{ Hz}$. Průběhy hysterezních křivek se pro dané frekvence z intervalu $f = \langle 2, 20 \rangle \text{ Hz}$ se liší svým sklonem. Především se posouvají vrcholy křivek v závislosti na zvyšující se amplitudě síly. Nárůst velikosti amplitudy je procentuálně 3,98 %.



Obrázek 18: Hysterezní křivky

7.2. Vyhodnocení složek komplexního modulu

Z naměřených hodnot byly pomocí vztahů v kapitole 3.2. vyhodnoceny složky komplexního modulu. Vztahy byly upravené pro namáhání na smyk. Z průběhu grafů na obrázku 13 v předchozí kapitole se předpokládá, že s rostoucí hodnotou magnetické indukce budou pravděpodobně růst také složky komplexního modulu ve smyku.

Výpočet složek komplexního modulu byl proveden v programu MatLab R2018a. V tabulce byly následně zobrazeny výsledky ztrátové složky komplexního modulu, komplexní složky a také tuhost vzorku. Pro kreslení průběhu grafu závislosti složek komplexního modulu na frekvenci a magnetickou indukci byl použit program Microsoft Excel.

Při výpočtu v softwaru bylo postupováno následujícím způsobem: při určování složek komplexního modulu bylo nejprve nutné vypočítat amplitudy snímané síly a posuvu. Z těchto hodnot bylo následně možné vypočítat amplitudu smykového napětí τ_0 a také amplitudu smykového úhlu γ_0 . Při znalosti těchto hodnot bylo následně možné určit tzv. absolutní hodnotu komplexního modulu pružnosti ve smyku G z rovnice:

$$G = \frac{\tau_0}{\gamma_0} \quad (7.1)$$

Pro výpočet obou složek komplexního modulu pružnosti ve smyku bylo nutné určit hodnotu ztrátového úhlu δ . Tento úhel byl určen jako rozdíl fází pro maximální hodnoty amplitud snímané síly a posuvu. Při znalosti absolutní hodnoty komplexního modulu pružnosti i ztrátového úhlu δ bylo možné, z následujících rovnic, určit obě složky komplexního modulu ve smyku.

$$G' = \frac{\tau_0}{\gamma_0} \cdot \cos \delta \quad (7.2)$$

$$G'' = \frac{\tau_0}{\gamma_0} \cdot \sin \delta, \quad (7.3)$$

Hodnoty složek komplexního modulu ve smyku byly určeny v závislosti na proměnné frekvenci a magnetické indukci.

Jak už bylo psáno výše, pro porovnání byly nejprve naměřeny vlastnosti neplněného silikonu. Tyto hodnoty jsou zobrazeny v tabulce 4:

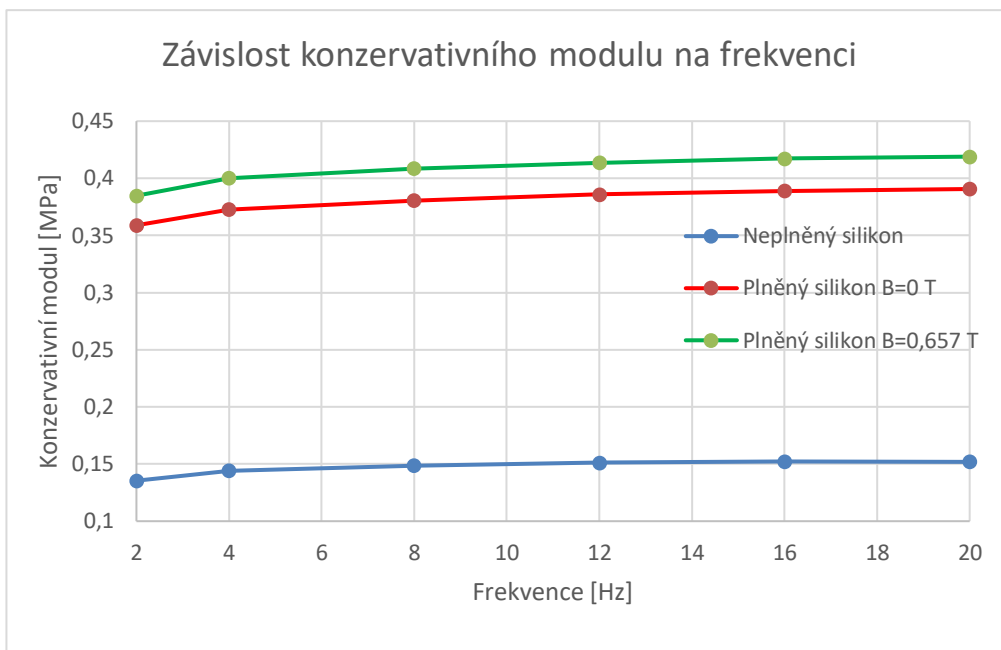
Tabulka 4: Vlastnosti neplněného silikonu HT 33

frekvence f [Hz]	konzervativní modul G' [MPa]	ztrátový modul G'' [MPa]	Ztrátový úhel δ [rad]	tuhost k [N/mm]
2	0,135	0,021	0,128	21,948
4	0,144	0,025	0,140	23,410
8	0,148	0,027	0,147	24,199
12	0,151	0,029	0,152	24,649
16	0,152	0,030	0,155	24,857
20	0,152	0,0319	0,159	24,876

Při pohledu na hodnoty z tabulky číslo 4 je zřejmé, že se veškeré námi sledované hodnoty s růstem frekvence zatěžujících kmitů zvyšují. Tento fakt je zřetelně patrný také v grafu 2, ve kterém jsou již zobrazeny křivky závislosti pro silikon plněný karbonylovým železem.

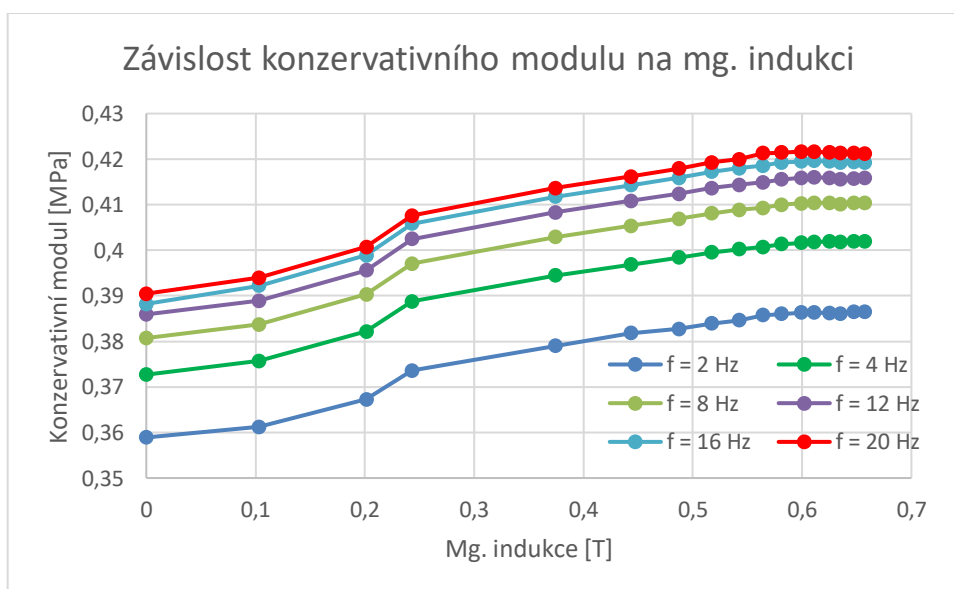
7.2.1. Konzervativní složka komplexního modulu

Závislost konzervativního modulu na zvyšující se frekvenci je zobrazena na obrázku 19. Pro plněný silikon jsou na obrázku 19 zobrazeny křivky jak pro případ bez přítomného magnetického pole, tak pro maximální hodnotu magnetické indukce $B = 0,657 T$. Jak je již zmíněno v předcházející kapitole 7.2., na obrázku je pro porovnání zobrazena také křivka pro neplněný silikon. Hodnoty byly měřeny při pokojové teplotě. Křivku zobrazující závislost modulu na frekvenci při působícím magnetické poli může ovlivnit vyšší teplota elektromagnetu.



Obrázek 19: Závislost konzervativního modulu na frekvenci

Dále je patrné, že pro plněný silikon se tvary křivek téměř shodují. Procentuální nárůst konzervativního modulu je nejvyšší pro neplněný silikon, a to 11,05 %. Pro plněný silikon je pak tato hodnota 8,12 % při $B = 0 \text{ T}$, respektive 8,16 % při $B = 0,657 \text{ T}$. Detailnější pohled na závislost modulu na magnetické indukci je zobrazen na obrázku 20. Na obrázku jsou zobrazeny křivky pro vybrané frekvence.

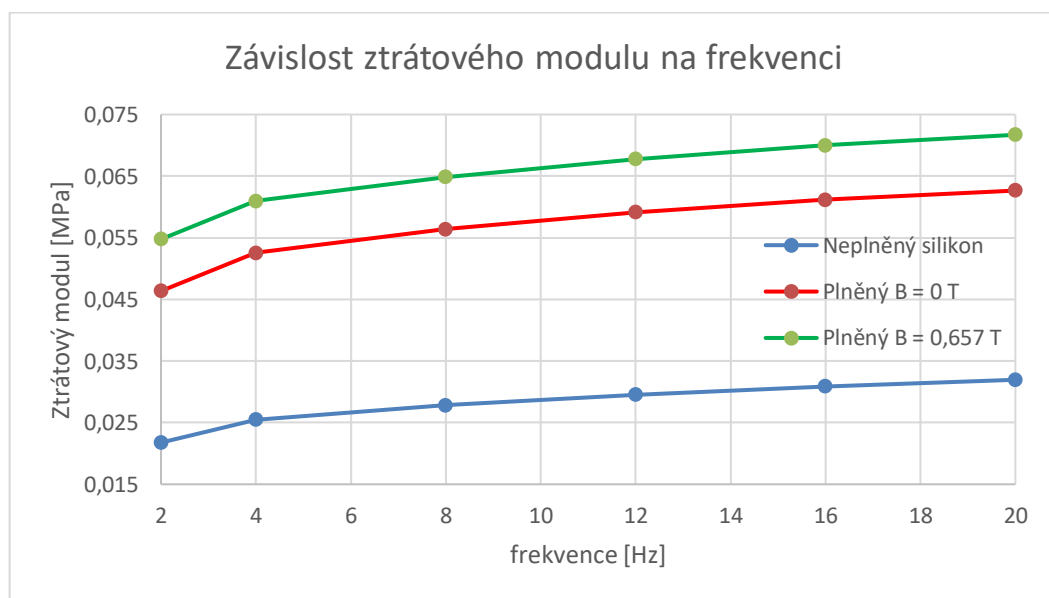


Obrázek 20: Závislost konzervativního modulu na mg. indukci

Z obrázku 20 lze dále vyčíst, že počáteční nárůst konzervativního modulu je strmější a při vyšších hodnotách magnetické indukce růst modulu se ustálí. K ustálení růstu modulu dojde přibližně od hodnoty magnetické indukce $B = 0,6 \text{ T}$. Tato charakteristika růstu se podobá logaritmické funkci. Hodnota maximálního konzervativního modulu pro frekvenci $f = 2 \text{ Hz}$ je $G' = 0,387 \text{ MPa}$, a to při hodnotě magnetické indukce $B = 0,657 \text{ T}$. Procentuální nárůst hodnoty konzervativního modulu je $7,15 \%$. Pro maximální frekvenci $f = 20 \text{ Hz}$ je hodnota $G' = 0,422 \text{ MPa}$, již při hodnotě magnetické indukce $B = 0,611 \text{ T}$. Procentuální nárůst hodnoty konzervativního modulu, pro $f = 20 \text{ Hz}$, je $7,36 \%$.

7.2.2. Ztrátová složka komplexního modulu

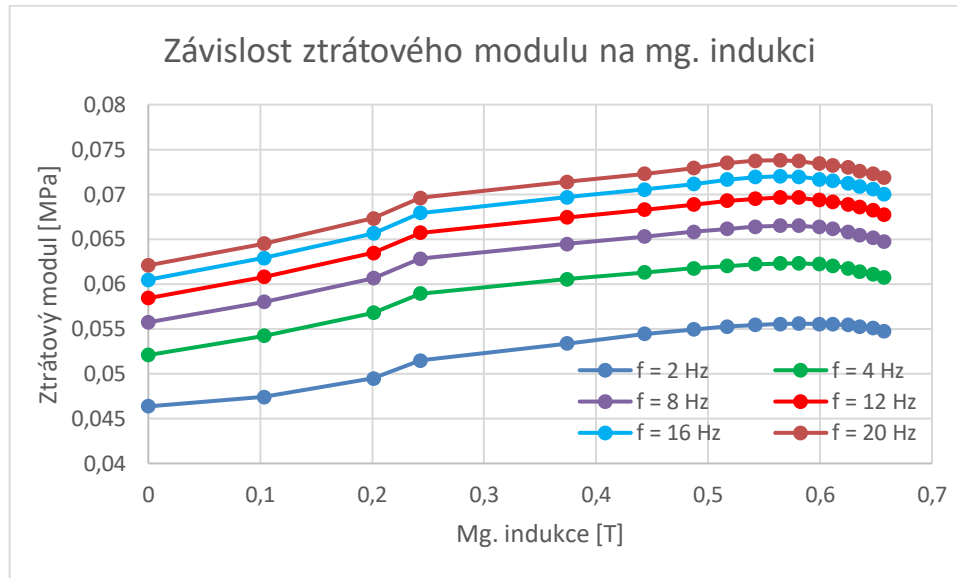
Stejně jako v kapitole 7.2.1. je závislost ztrátové složky zobrazena na obrázku 21. Pro plněný silikon jsou na obrázku 21 zobrazeny křivky jak pro případ bez přítomnosti magnetického pole, tak pro hodnotu magnetické indukce $B = 0,657 \text{ T}$. Stejně jako v případě konzervativní složky je pro porovnání zobrazena také křivka pro neplněný silikon. Podmínky měření se shodují s podmínkami popsány v kapitole 7.2.1.



Obrázek 21: Závislost ztrátového modulu na frekvenci

Tvar křivek pro plněný silikon se shoduje podobně, jako tomu bylo v případě konzervativní složky. Procentuální nárůst ztrátového modulu je poměrně značný. Pro neplněný silikon je tato hodnota $31,88 \%$. Pro plněný silikon vlivu magnetického pole je procentuální nárůst $26,01 \%$. Při působení magnetického pole je tato hodnota

23,64 %. Detailnější pohled na závislost modulu na magnetickou indukci je zobrazen na obrázku 22. Na obrázku jsou zobrazeny křivky pro vybrané hodnoty frekvence.

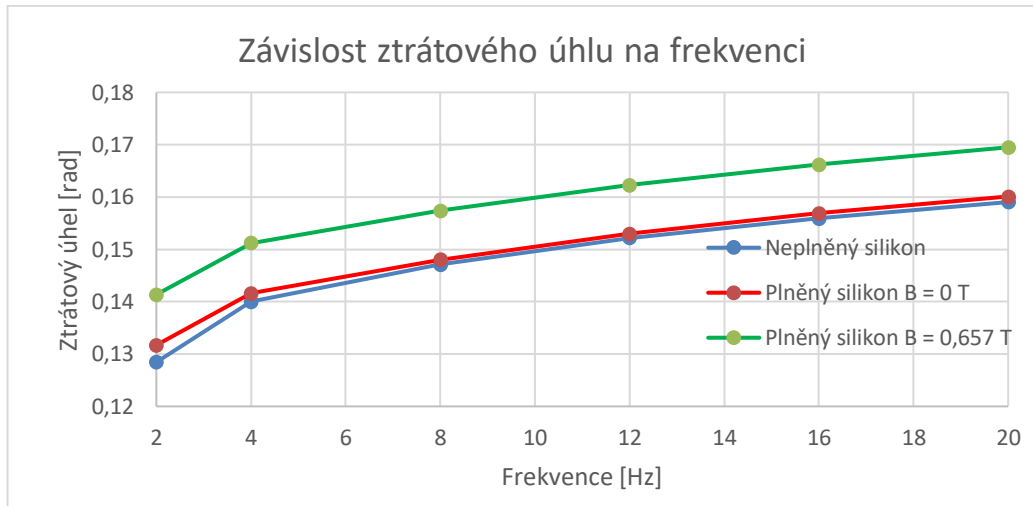


Obrázek 22: Závislost ztrátového modulu na mg. indukci

Oproti konzervativní složce komplexního modulu jsou tvary křivek ztrátového modulu odlišné. Po počátečním mírném nárůstu dochází, od hodnoty magnetické indukce $B = 0,564 \text{ T}$, k mírnému poklesu hodnot ztrátové složky modulu. Maximální naměřená hodnota pro ztrátový modul při frekvenci $f = 2 \text{ Hz}$ je tedy $G'' = 0,056 \text{ MPa}$ a při frekvenci $f = 20 \text{ Hz}$ je maximální hodnota $G'' = 0,074 \text{ MPa}$. Nárůst hodnoty ztrátového modulu v procentech pro $f = 2 \text{ Hz}$ je 16,57 % a pro $f = 20 \text{ Hz}$ je tato hodnota 15,87 %.

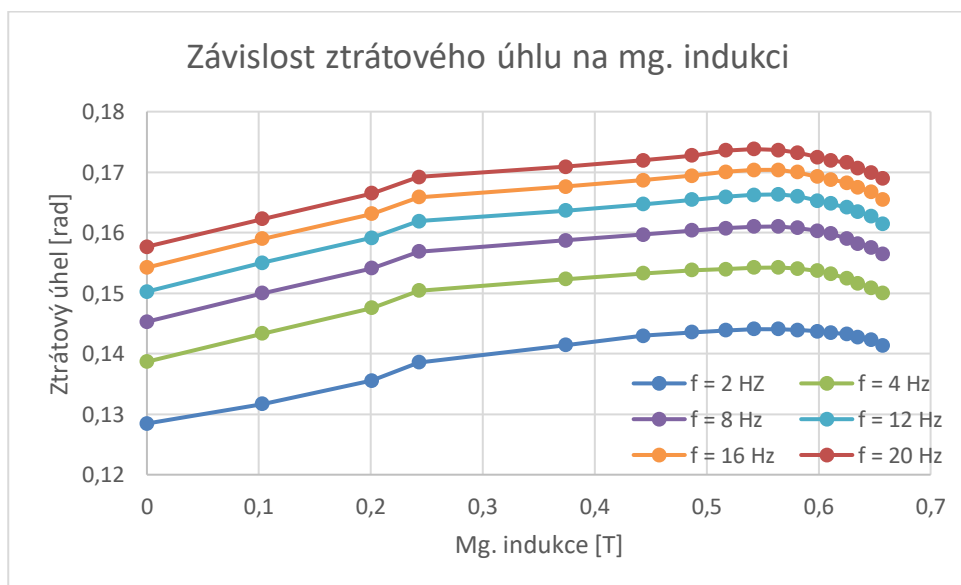
7.2.3. Ztrátový úhel

Při pohledu na měnící se hodnoty ztrátového úhly bylo možno určit, jestli má vzorek spíše elastické nebo tlumící vlastnosti. Tato závislost je zobrazena na obrázku 23. Ztrátový úhel by vypočítán jako rozdíl fází mezi působící silou a posuvem.



Obrázek 23: Závislost ztrátového úhlu na frekvenci

Z obrázku 23 je patrné, že křivka pro neplněný a plněný silikon, na který nepůsobí magnetické pole, se téměř shodují, ale křivka plněného silikonu v magnetickém poli je posunutá směrem k vyšším hodnotám ztrátového úhlu. Pro všechny křivky platí, že mají rostoucí tendenci, což nám říká, že rostou tlumící vlastnosti vzorků. Nárůst ztrátového úhlu v procentech činí pro neplněný silikon 19,22 %, pro plněný bez vlivu mg. pole 17,74 % a pro plněný s maximální hodnotou mg. indukce 16,60 %. Růst ztrátového úhlu platí i pro závislost na magnetické indukci, která je zobrazena na obrázku 24. S rozdílem, že maximální hodnoty ztrátového úhlu bylo dosaženo při hodnotě magnetické indukce $B = 0,542 T$. Poté už došlo k jeho ustálení.



Obrázek 24: Závislost ztrátového úhlu na mg. indukci

Maximální hodnoty ztrátového úhlu tedy jsou, pro frekvenci $f = 2 \text{ Hz}$, $\delta = 0,144 \text{ rad}$ a pro frekvenci $f = 20 \text{ Hz}$ je ztrátový úhel $\delta = 0,174 \text{ rad}$. Procentuální nárůst mezi minimem a maximem ztrátového úhlu pro $f = 2 \text{ Hz}$ je $10,83 \%$ a pro $f = 20 \text{ Hz}$ je tato hodnota $9,28 \%$. Jak již bylo psáno výše, pro hodnoty magnetické indukce, které odpovídají maximální hodnoty ztrátového úhlu, lze říci, že jsou tlumící vlastnosti vzorku nejvyšší.

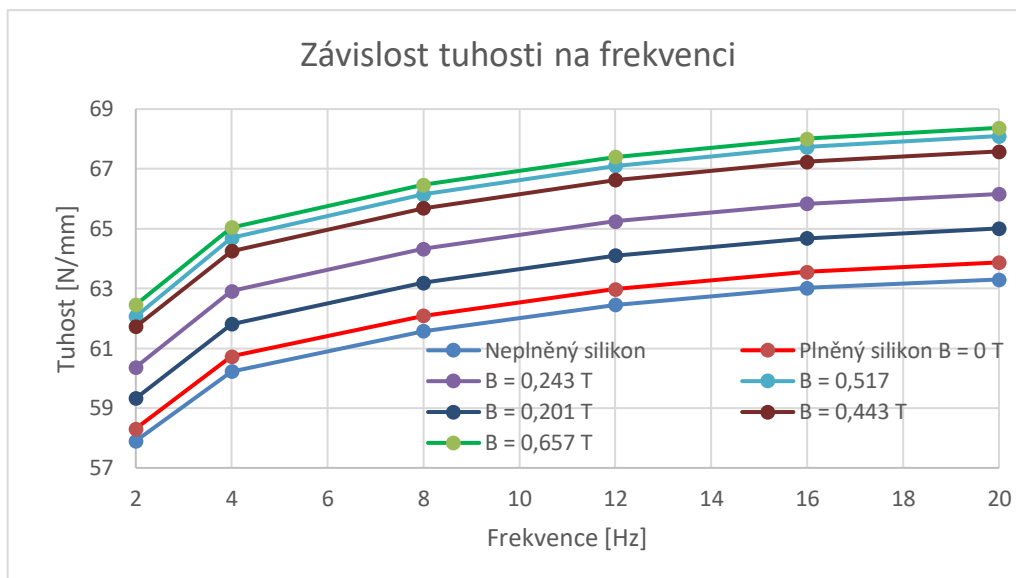
7.3. Vyhodnocení tuhosti

Jak již bylo zmíněno v kapitole 3.3, tuhost pryží je další ze základních vlastností, která určuje útlumové vlastnosti pryže. Tuhost bylo určena pomocí naměřených hodnot zatížení a posuvu. Hodnoty veličin, z nichž byla tuhost vypočítána byly zjišťovány v závislosti na frekvenci kmitání snímané síly a v závislosti na velikosti magnetického pole. Stejně jako v kapitole 7.2. bylo pro porovnání naměřených hodnot také provedeno měření vzorku silikonu, který neobsahoval železné plnivo.

Pro výpočet tuhosti zkušebního vzorku z MRE bylo využito vztahu pro absolutní tuhost odvozeného již v kapitole 3.1.1.:

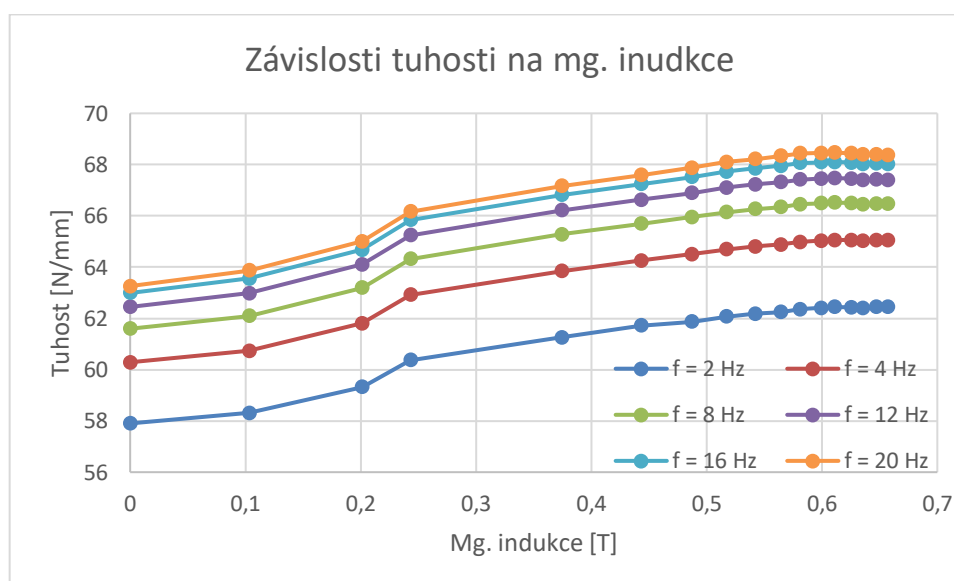
$$k = \frac{F_0}{y_0}, \quad (7.4)$$

kde právě hodnoty amplitudy zatížení F_0 a amplitudy deformace u_0 byly zjištěny experimentálně. Podmínky experimentu již byly popsány v kapitole 6.1. Závislost tuhosti na frekvenci je zobrazena na obrázku 25, kde jsou zobrazeny křivky pro vybrané hodnoty mg. indukce. Procentuální rozdíl mezi extrémními hodnotami tuhosti činí pro neplněný silikon $8,53 \%$, pro plněný silikon bez vlivu mg. pole je rozdíl $8,27 \%$ a pro plněný silikon při maximální hodnotě mg. indukce je tato hodnota $8,57 \%$.



Obrázek 25: Závislost tuhosti na frekvenci

Na obrázku 25 jsou opět zobrazeny křivky závislosti pro neplněný i plněný silikon. Stejně jako složky komplexní tuhosti i tuhost vykazuje vůči frekvenci růst. Závislost tuhosti na magnetické indukci je zobrazena na obrázku 26.



Obrázek 26: Závislost tuhosti na mg. indukci

Maximální hodnoty tuhosti při frekvenci $f = 20$ Hz nebylo dosaženo při maximu magnetické indukce, nýbrž při hodnotě $B = 0,611$ T. Tato hodnota činila $k = 68,476$ N/mm. Pro frekvenci $f = 2$ Hz je maximum tuhosti $k = 62,456$ N/mm a bylo ho dosaženo při maximu magnetické indukce $B = 0,657$ T. Kolem hodnoty mg. indukce

$B = 0,6 \text{ T}$ je opět vidět, že se sledovaná veličina, v tomto případě tuhost, ustálí. Procentuální rozdíl mezi maximální a minimální hodnotou tuhosti pro $f = 2 \text{ Hz}$ je $7,29 \%$ a pro hodnotu frekvence $f = 20 \text{ Hz}$ je tato hodnota $7,62 \%$.

8. Závěr

Cílem této práce bylo zjištění útlumových vlastností vyrobeného experimentálního vzorku v závislosti na intenzitě aplikovaného magnetického pole. Nejprve byl vyroben experimentální vzorek z MRE a v rámci srovnávání byl použit také vzorek silikonu bez obsahu plniva z karbonylového železa. V průběhu experimentu byly vyrobené vzorky vystavené působení smykového harmonického zatížení, kdy zároveň docházelo ke změnám podmínek měření, především magnetického pole. Z měření bylo získáno velké množství dat uspořádaných v tabulkách.

Získaná data byla vyhodnocena za pomoci softwaru MatLab R2018a. Vyhodnocením bylo zjištěno, že sledované útlumové vlastnosti experimentálního vzorku se mění v závislosti na měnících se podmínkách experimentu, tedy na měnící se frekvenci a měnící se intenzitě aplikovaného magnetického pole. Bylo zjištěno, že útlumové vlastnosti vzorku se s rostoucí frekvencí zvyšují. Stejně tak dochází k růstu tlumících vlastností při zvyšování aplikovaného magnetického pole. Dále bylo zjištěno, že k nejstrmějšímu růstu útlumových vlastností dochází při nižších hodnotách magnetické indukce aplikovaného pole. Po dosažení určité hodnoty magnetické indukce (která je pro různé frekvence jiná) dojde ke stagnaci růstu útlumových vlastností.

Vyšší útlumové vlastnosti magnetosensitivních elastomerů při vyšší frekvenci dynamického namáhání lze využít například v uložení dynamicky namáhaných strojních součástí. Magnetické pole by bylo možno využít například k řízení útlumových vlastností tlumičů užitkových vozidel, kde by bylo možné měnit útlumové vlastnosti při různé hmotnosti transportovaného nákladu.

Seznam použité literatury

- [1] ZUBÍK, Martin. *Materiálové vlastnosti pryže pro výpočtové modelování dynamiky pohonné jednotky* [online]. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2011. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/4055>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav automobilního a dopravního inženýrství. Vedoucí práce Pavel Novotný.
- [2] Ruddy, C., Ahearne, E., & Byrne, G. (2012). *A review of magnetorheological elastomers: properties and applications*. *Advanced Manufacturing Science* (AMS) Research. http://www.ucd.ie/mecheng/ams/news_items/Cillian%20Ruddy.pdf Accessed, 20.
- [3] PETRÍKOVÁ, Iva. *Mechanické vlastnosti pryží*. Liberec, 2009. Habilitační práce. Technická univerzita v Liberci.
- [4] MARVALOVÁ, B.; PETRÍKOVÁ, I. *Experimental research and numerical simulation of the damping properties of Magnetorheological Elastomers*. In: *Constitutive Models for Rubber X*. CRC Press, 2017. p. 11-18.
- [5] SUN, Shulei; PENG, Xiongqi; GUO, Zaoyang. *Study on macroscopic and microscopic mechanical behavior of magnetorheological elastomers by representative volume element approach*. *Advances in Condensed Matter Physics*, 2014, 2014.
- [6] TIAN, Tongfei; NAKANO, Masami. *Fabrication and characterisation of anisotropic magnetorheological elastomer with 45° iron particle alignment at various silicone oil concentrations*. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2018, 29.2: 151-159
- [7] LI, Yancheng, et al. *A state-of-the-art review on magnetorheological elastomer devices*. *Smart materials and structures*, 2014, 23.12: 123001.
- [8] <https://www.rubena.eu/cz/produkty/silikonove-produkty/silikonova-technicka-pryz/>
- [9] <http://www.havel-composites.com/shop/388-SILIKONY/2925-Tekuty-silikon-HT-33---tranparent-LT.html?pls=0>
- [10] http://ufmi.ft.utb.cz/texty/env_fyzika/EF_06.pdf

[11] LI, Rui; SUN, L. Z. *Viscoelastic responses of silicone-rubber-based magnetorheological elastomers under compressive and shear loadings. Journal of Engineering Materials and Technology*, 2013, 135.2: 021008.