



# Experimentální stanovení dynamické odezvy magnetoreologických kompozitů.

## Bakalářská práce

*Studijní program:* B2301 – Strojní inženýrství

*Studijní obor:* 2301R000 – Strojní inženýrství

*Autor práce:* **David Reichmann**

*Vedoucí práce:* prof. Ing. Bohdana Marvalová, CSc.



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2015/2016

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **David Reichmann**

Osobní číslo: **S12000175**

Studijní program: **B2301 Strojní inženýrství**

Studijní obor: **Strojní inženýrství**

Název tématu: **Experimentální stanovení dynamické odezvy magnetoreologických kompozitů.**

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 :

Stanovení dynamické odezvy magnetosensitivních kompozitů s pryžovou maticí, plněných mikročásticemi z karbonylu železa.

Kompozity budou zatěžovány v magnetickém poli o různé intenzitě. Harmonické cyklické zatěžování ve smyku bude mít proměnnou frekvenci a amplitudu.

Postup řešení:

1. Zhotovení experimentálních vzorků
2. Deformací řízené harmonické zatěžování vzorků na Instron Electropuls v proměnném magnetickém poli.
3. Měření silové odezvy.
4. Stanovení tuhosti vzorků v závislosti na intenzitě magnetického pole, na amplitudě a na frekvenci.

Rozsah grafických prací: **dle potřeby**  
Rozsah pracovní zprávy: **cca 40 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.  
[4] GARMEDIA, X., *Experimental Determination of Dynamical Properties of Magnetosensitive Elastomeric Composites*, TUL 2014 (zpráva KMP)

Vedoucí bakalářské práce: **prof. Ing. Bohdana Marvalová, CSc.**  
Katedra mechaniky, pružnosti a pevnosti

Datum zadání bakalářské práce: **18. listopadu 2015**

Termín odevzdání bakalářské práce: **18. února 2017**

  
prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld  
děkan



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

V Liberci dne 1. března 2016

## Prohlášení

Byl jsem seznámen 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 samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce a konzultantem.

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

Datum:

Podpis:

## **Poděkování**

Mé poděkování patří především vedoucí práce prof. Ing. Bohdaně Marvalové CSc. za cenné rady, věcné připomínky a vstřícnost při konzultacích a zpracování bakalářské práce. Dále bych velice rád poděkoval celé Katedře mechaniky pružnosti a pevnosti a jejím akademickým pracovníkům za umožnění využití a zaškolení na příslušném laboratorním vybavení katedry.

## **Anotace**

Práce je soustředěna na experimentální stanovení dynamické odezvy magnetoreologických kompozitů. Stanovení dynamické odezvy magnetosensitivních kompozitů s matricí ze silikonového kaučuku, plněných mikročásticemi z karbonylu železa. Kompozity byli zatěžováni v magnetickém poli o různé intenzitě. Harmonické cyklické zatěžování ve smyku mělo proměnnou frekvenci a amplitudu.

## **Klíčová slova:**

magnetoreologické, magnetosensitivní, elastomery, dynamická odezva, silikonové kaučuky, smykové namáhání silikonů, tlakové namáhání silikonů, vliv magnetického pole

## **Annotation**

This work is dedicated to an experimental determination of dynamical response of magnetorheological composite materials. Determination of dynamical response of magneto sensitive composite, which is composed by silicon rubber matrix and carbonyl iron fillers. Composite was subjected to a magnetic field with a variable intensity. The harmonic cyclic strain of shear stress had variable frequency and amplitude.

## **Key words:**

magnetorheological, magnetosensitive, elastomers, dynamical response, silicon rubbers, shear tests of cilicon, compression tests of silikon, influence of magnetic field

# Obsah

Seznam symbolů a zkratk .....	3
Seznam obrázků.....	4
Seznam tabulek.....	5
Seznam grafů .....	6
1. Úvod.....	8
2. Magnetoreologické elastomery.....	9
2.1. Kompozitní materiály .....	9
2.2. Magnetická plniva.....	9
2.3. Elastomery .....	10
2.3.1. Silikonové elastomery.....	11
3. Modely pro určení mechanických vlastností (MRE).....	13
3.1. Dynamické principy.....	13
4. Příprava vzorků.....	16
4.1. Příprava silikonové pryže .....	16
4.2. Magnetosensitivní částice .....	17
4.2.1. Železné částice .....	17
4.2.2. Karbonyl železa .....	18
4.3. Vzorky pro kompresní testy.....	19
4.4. Vzorky pro zatížení ve smyku .....	19
Tabulka 3 Specifikace vzorků pro smykové testy .....	20
4.5. Výroba .....	20
5. Lepené spoje .....	22
6. SEM analýza vzorků.....	22
7. Konfigurace a nastavení měřícího přístroje Instron.....	23
7.1. Nastavení průběhů testů.....	24



7.1.1 Kompresní testy .....	24
7.1.2 Smykové testy.....	24
7.2. Zajištění magnetického pole, smykové zatížení .....	25
8. Vyhodnocování výsledků .....	25
8.1. Diskrétní Fourierova transformace .....	25
8.2. Výsledky testů.....	26
8.2.1 Smykové namáhání.....	26
8.2.2. Magnetoreologický efekt .....	31
8.2.3. Kompresní testy .....	34
9. Závěr .....	38
Seznam použité literatury .....	41

## Seznam symbolů a zkratek

$MR$	magnetoreologické	
$MRE$	magnetoreologické elastomery	
$DFT$	diskrétní Fourierova transformace	
$DMA$	dynamická mechanická analýza	
$G$	modul pružnosti elastomeru plněný sférickými částicemi	[Pa]
$G_0$	modul pružnosti ve smyku samotného elastomeru	[Pa]
$\Phi$	objemový podíl výztuže	[-]
$u_0$	počáteční posuv	[mm]
$u(t)$	posuv v čase $t$	[mm]
$\Delta u$	amplituda dislokace	[mm]
$f$	frekvence sinusového posuvu	[Hz]
$t$	čas	[s]
$\varepsilon_0$	počáteční deformace vzorku	[-]
$\Delta\varepsilon$	amplituda deformace	[-]
$L_0$	počáteční výška vzorku	[mm]
$F_0$	silové předpětí, statická síla	[N]
$F(t)$	silová odezva	[N]
$\delta$	ztrátový úhel	[rad]
$\sigma_0$	počáteční napětí	[Pa]
$\sigma(t)$	odezva napětí	[Pa]
$\Delta\sigma$	amplituda napětí	[Pa]
$\omega$	úhlová rychlost	[rad/s]
$E'$	paměťový modul	[Pa]
$E''$	ztrátový modul	[Pa]
$\eta^*$	dynamická viskozita	[Pa·s]
$\tau_s$	smykové napětí	[Pa]
$k$	konstanta lepeného spoje	[-]
$S$	styčná plocha	[m <sup>2</sup> ]
$A$	plocha průřezu vzorku při zatížení	[m <sup>2</sup> ]
$A_0$	počáteční plocha průřezu	[m <sup>2</sup> ]
$B$	magnetická indukce	[T]

## Seznam obrázků

Obrázek 1. Typické kompozitní materiály [6] .....	9
Obrázek 2 Železné piliny v magnetickém poli [5] .....	10
Obrázek 3 Mírně zesíťovaný elastomer, vlivem vnějších sil dochází k pružné deformaci [9].....	11
Obrázek 4 Schematická ukázka některých elastomerů [9] .....	11
Obrázek 5 Polymerní síť silikonových elastomerů.....	11
Obrázek 6 Platinová katalizační reakce [13] .....	13
Obrázek 7 Tlakové zatížení vzorku (vlevo), smykové zatížení MRE (vpravo)[13].....	14
Obrázek 8 Odezva napětí při oscilování: V-Newtonovská kapalina (E''), E-Hookeovo těleso(E'), VE-viskoelastický materiál [2] .....	15
Obrázek 9 Závislost dynamického modulu, ztrátového modulu a modulu pro zachování energie.....	16
Obrázek 10 Mikrostruktura železných částic (průměr) [13].....	17
Obrázek 11 Mikrostruktura karbonylu železa [13].....	18
Obrázek 12 Rozměry vzorků pro kompresní testy .....	19
Obrázek 13 Rozměry formy pro proces vulkanizace vzorků určených pro smykové testy .....	21
Obrázek 14 Velikost vzorků pro smykové namáhání .....	21
Obrázek 15 Konečná fáze vzorku pro namáhání smykem .....	21
Obrázek 16 SEM snímek silikonového elastomeru, kompresní test[13].....	22
Obrázek 17 SEM snímek MRE s Fe částicemi kompresní test[13].....	25
Obrázek 18 SEM snímek MRE, smykové namáhání[13].....	25
Obrázek 19 SEM snímek MRE s Fe částicemi, smyk. namáhání[13].....	23
Obrázek 20 SEM snímek MRE s částicemi karbonylu železa, smyk. namáhání[13].....	26
Obrázek 21 Analýza elektromagnetu[13] .....	25

## **Seznam tabulek**

Tabulka 1 Chemická a fyzikální charakteristika [13] .....	17
Tabulka 2 Specifikace vzorků pro tlakové testy .....	19
Tabulka 3 Specifikace vzorků pro smykové testy .....	20
Tabulka 4 Průběh kompresních testů .....	24
Tabulka 5 Průběh smykových testů .....	24

## Seznam grafů

Graf 1 Průměr železných částic jako funkce objemové frakce [13] .....	18
Graf 2 Průměr částic karbonylu železa jako funkce objemové frakce [13].....	18
Graf 3 Čistý silikon smykově namáhán, zeleně označené- zatížen magnetickým polem s magnetickou indukcí 350[mT], červeně označené-bez magnetického pole. Závislost ztrátového úhlu[rad] na frekvenci[Hz] .....	26
Graf 4 Čistý silikon smykově namáhán, zeleně označené- zatížen magnetickým polem s magnetickou indukcí 350[mT], červeně označené-bez magnetického pole.Závislost ztrátového modulu[MPa] na frekvenci[Hz] .....	27
Graf 5 Čistý silikon smykově namáhán, zeleně označené- zatížen magnetickým polem s magnetickou indukcí 350[mT], červeně označené-bez magnetického pole.Závislost paměťového modulu[MPa] na frekvence[Hz] .....	27
Graf 6 MRE s karbonylem železa smykově namáhán, čárkovaně-zatížené v magnetickém poli s magnetickou indukcí 350[mT], plná čára-bez magnetického pole.Závislost ztrátového úhlu[rad] na frekvenci[Hz] .....	28
Graf 7 MRE s karbonylem železa smykově namáhán, čárkovaně- zatížené v magnetickém poli s magnetickou indukcí 350[mT], plné čáry-bez magnetického pole.Závislost ztrátového modulu [MPa] na frekvenci[Hz] .....	28
Graf 8 MRE s karbonylem železa smykově namáhán, čárkovaně- zatížen magnetickým poli s magnetickou indukcí 350[mT], plné čáry-bez magnetického pole.Závislost paměťovém modulu[Mpa] na frekvence[Hz] .....	29
Graf 9 MRE s železnými částicemi smykově namáhán, čárkované- zatížen v magnetickém poli s magnetickou indukcí 350[mT], plné čáry-bez magnetického pole. Závislost ztrátového úhlu[rad] na frekvence[Hz] .....	29
Graf 10 MRE s železnými částicemi smykově namáhán, čárkované čáry- zatížen v magnetickém poli s magnetickou indukcí 350[mT], plné čáry-bez magnetického pole. Závislost ztrátového modulu [MPa] na frekvence[Hz].....	30
Graf 11 MRE s železnými částicemi smykově namáhán, čárkované čáry- zatížen v magnetickém poli s magnetickou indukcí 350[mT], plné čáry-bez magnetického pole. Závislost paměťoho modulu[MPa] na frekvenci[Hz].....	30
Graf 12 MR efekt, MRE vyplněné železnými částicemi. Závislost ztrátového úhlu [rad] na frekvenci [Hz] .....	31

Graf 13 MR efekt, MRE vyplněné železnými částicemi. Závislost ztrátového modulu [MPa] na frekvenci [Hz] .....	31
Graf 14 MR efekt, MRE vyplněné železnými částicemi. Závislost paměťového modulu [MPa] na frekvenci[Hz] .....	32
Graf 15 MR efekt, MRE vyplněné částicemi karbonylu železa. Závislost ztrátového úhlu [rad] na frekvenci[Hz] .....	32
Graf 16 MR efekt, MRE vyplněné částicemi karbonylu železa. Závislost ztrátového modulu [MPa] na frekvenci [Hz] .....	33
Graf 17 MR efekt, MRE vyplněné částicemi karbonylu železa. Závislost paměťového modulu [Mpa] na frekvenci [Hz] .....	33
Graf 18 Kompresní test, čistý silikon. Závislost ztrátového úhlu [rad] na frekvenci [Hz] .....	34
Graf 19 Kompresní test, čistý silikon. Závislost ztrátového modulu [MPa] na frekvenci [Hz] .....	35
Graf 20 Kompresní test, čistý silikon. Závislost paměťového modulu [MPa] na frekvenci [Hz] .....	35
Graf 21 Kompresní test, MRE s 30% karbonylu železa. Závislost ztrátového úhlu [rad] na frekvenci [Hz] .....	36
Graf 22 Kompresní test, MRE s 30% karbonylu železa. Závislost ztrátového modulu [MPa] na frekvenci [Hz] .....	36
Graf 23 Kompresní test, MRE s 30% karbonylu železa. Závislost paměťového modulu [MPa] na frekvenci[Hz] .....	37
Graf 27 Hysterezní křivka čistého silikonu .....	38
Graf 28 Hysterezní křivka, MRE silikon s částicemi karbonylu železa .....	39
Graf 29 Hysterezní křivka, MRE silikon s železnými částicemi .....	39

# 1. Úvod

V současné době se díky tlaku na rozvoj mechanických vlastností materiálů objevilo několik nových vědních oborů např. ferohydrodynamika, s nimiž přišli právě i nové poznatky ve vědě o materiálu.

Ve vývoji je značné úsilí věnováno skupině inteligentních materiálů, jejichž mechanické vlastnosti můžeme různě měnit a ovládat pomocí vnějších účinků dle našich potřeb. Podle vnějších účinků je můžeme rozdělovat do několika kategorií (tlakem, elektricky). Řízení a kontrola nad materiály je právě jejich největší výhodou.

Mezi inteligentní materiály patří právě skupina materiálů, jejichž mechanické vlastnosti lze měnit pomocí vlivů účinků magnetického pole. Značnou výhodou je rychlá odezva materiálů a možnost jejich řízení na dálku. V literatuře se tato skupina označuje jako magnetoreologické (MR), někdy slýcháme i magneto-senzitivní. Obvykle se jedná o heterogenní směsi látek, které jsou v zásadě tvořeny magneticky polarizovatelnými kovovými mikročásticemi, rozptýlenými v magneticky neutrálním médiu.[1] Spadají sem MR elastomery, pěny ale také MR kapaliny, které jsou známé už od 60. let, kdy byli vyvinuty skupinou NASA pro řízení oběhu paliva kosmických raket ve stavu bez tíže. V dnešní době však nacházejí uplatnění i v běžném průmyslu. V podobě tlumičů odpružení, magneticky kontrolovatelnými brzdami, řízených spojek apod.

Naše pozornost se bude ubírat trochu jiným směrem a to doposud méně prozkoumanou skupinou MR kompozitů, tedy MR elastomery(MRE), jejichž potenciál pro budoucí užívání je obrovský. Stejně tak i zájem o poznatky těchto materiálů v poslední době vzrůstá a to zejména díky možnosti řízení dynamických, či tlumivých vlastností. Navíc jejich služby by v budoucnu mohli využít různá zákoutí vědních oborů, jako je například biomechanika (návrhy aktuátorů napodobující činnost svalů).

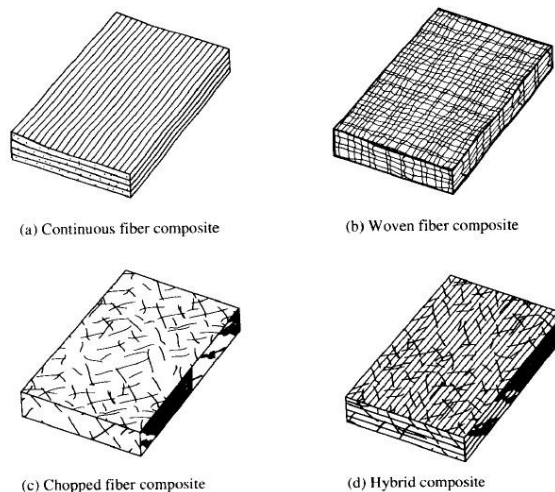
V této bakalářské práci budeme experimentálně zkoumat a vyhodnocovat dynamickou odezvu magnetoreologických silikonů. V jedné kapitole rozebereme problematiku a samotné složení těchto kompozitů. Budeme se zabírat i vhodnou přípravou takovýchto elastomerů a výrobou našich vzorků. V experimentální části byli vzorky cyklicky zatěžovány s různými frekvencemi a to na tlak a na smyk. Vyhodnocování je soustředěno na vliv působení magnetického pole na změnu viskoelastických vlastností, tedy na zobrazení různých závislostí dynamických modulů a jeho složek.

## 2. Magnetoreologické elastomery

Magnetosensitivní elastomery jsou kompozity, tedy heterogenní materiály složené nejméně ze dvou fází. MRE jsou tvořeny maticí z termoplastického, či klasického síťovaného elastomeru tedy magneticky neutrálního materiálu a magneticky polarizovatelným plnivem, nejčastěji kovovými částicemi.

### 2.1. Kompozitní materiály

Jak již bylo zmíněno výše, kompozity jsou heterogenní materiály složené ze dvou a více fází s rozdílnými mechanickými, fyzikálními a chemickými vlastnostmi, které vytváří celek s daleko lepšími mechanickými vlastnostmi než vykazují jednotlivé fáze. Ačkoli mnoho dnešních materiálů sestává z více konsistenčních jednotek, ne všechny jsou brány jako kompozity. Příkladným důkazem jsou slitiny, minerály nebo třeba dřevo. Na rozdíl od nich mají však kompozity mechanicky oddělitelné jednotlivé fáze.[6,7]



Obrázek 1. Typické kompozitní materiály [6]

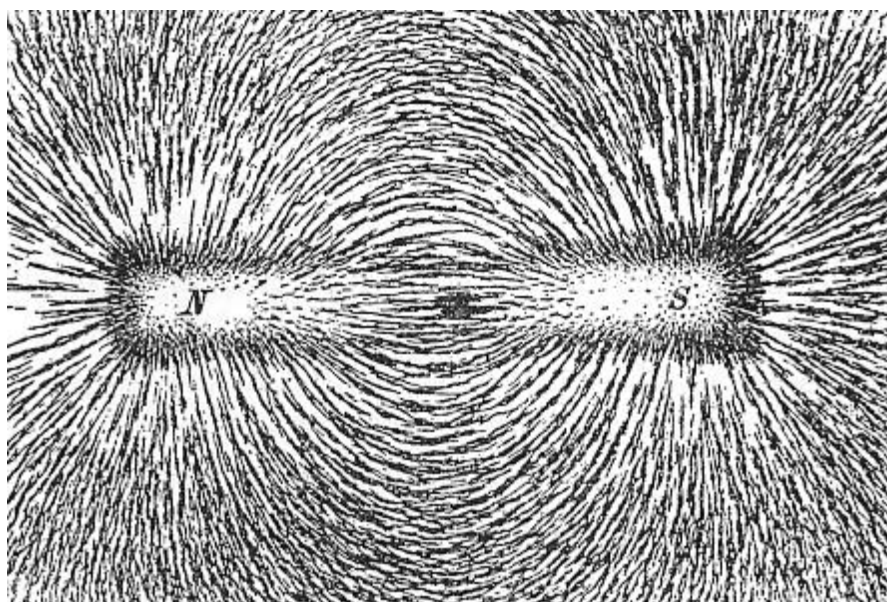
Podstatným ovlivňujícím prvkem výchozích vlastností kompozitu je spojení mezi maticí a výztuží a také rozložení výstužných vláken v matici. V našem případě jsou kovové částice rozmístěné do elastomeru s náhodnou orientací, jelikož výroba kompozitu s orientovanými kovovými částicemi v elastomeru je velice náročná.

### 2.2. Magnetická plniva

Magnetické materiály jsou látky, které po jejich vložení do magnetického pole toto pole více či méně poznamenají. Příčina změny magnetického pole spočívá v tom, že obsahují trvalé nebo polem indukované elementární magnetické momenty, které jsou v magnetickém poli částečně orientovány. Materiály, které mohou vytvářet magnetické pole, se nazývají magnety. Mohou mít formu permanentního magnetu nebo



elektromagnetu. Permanentní magnety nepotřebují k vytvoření magnetického pole žádnou vnější energii. Vyskytují se v některých nerostech v přírodě, ale dají se i vyrobit. Elektromagnety potřebují k vytvoření magnetického pole elektrickou energii.[3,4]

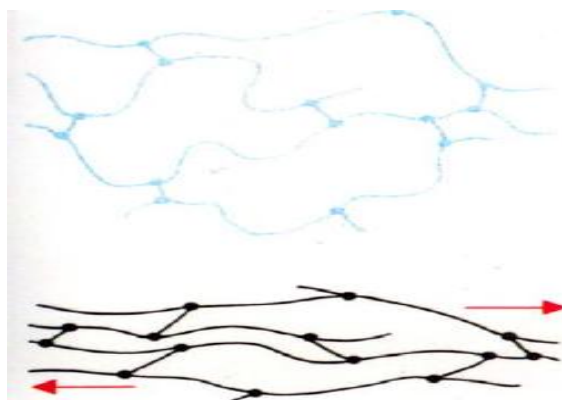


Obrázek 2 Železné piliny v magnetickém poli [5]

Nejčastějším plnivem MRE jsou železné částice. Železo má totiž vysokou permeabilitu (schopnost materiálu "vést" magnetický tok), nízkou remanenci (zvýšená zbytková magnetizace po odstranění magnetického pole) a je dostatečně magneticky nasycené, čímž v polymeru zvyšují mezičásticovou přitažlivost. A tím zajistí možnost ovládnutí tuhosti kompozitu pomocí změny intenzity magnetického pole. Důležitým faktorem u veškerých částic je velikost, tvar a polydisperzita. Největší vliv na magnetoreologický efekt mají částice nepravidelných tvarů o velikosti několika desítek mikrometrů, které jsou však citlivější na mechanické opotřebení. Tím může docházet k rozpadu na drobný materiál, což se posléze může projevit jako problém, jelikož příliš malé částice mohou přestat reagovat na magnetické pole. V polymerech plněných magnetickými materiály je magnetický moment úměrný jejich objemovému podílu. [2]

### 2.3. Elastomery

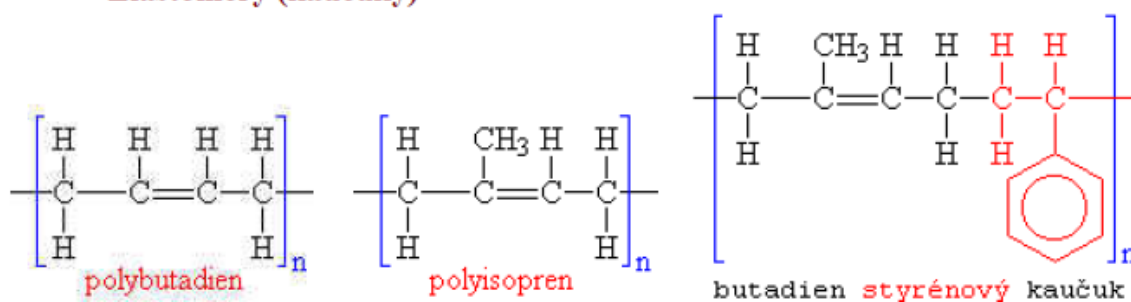
Tyto makromolekulární látky jsou samostatnou kapitolou polymerů, které obvykle vykazují nízký Youngův modul pružnosti a díky tomu za pokojových teplot obstojí při vysokých deformačních energiích. Deformace tedy probíhá převážně vratně. Takovéto vlastnosti získá polymer vulkanizací, při které vzniknou příčné vazby. Mezi makromolekulami poté dojde k potlačení plastického toku a polymer se stává vysoce elastický.[8]



Obrázek 3 Mírně zesíťovaný elastomer, vlivem vnějších sil dochází k pružné deformaci [9]

Elastomery jsou takzvaně viskoelastické materiály což prakticky znamená, že část deformační energie disipuje v elastomeru a část akumulované energie je využito pro odlehčení vzorku. [8]

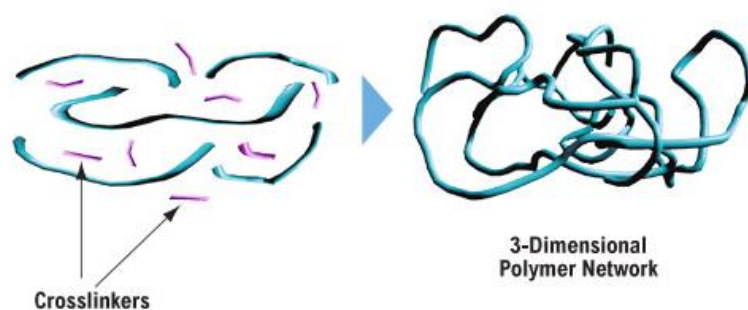
### Elastoméry (kaučuky)



Obrázek 4 Schematická ukázka některých elastomerů [9]

#### 2.3.1. Silikonové elastomery

Silikonový elastomer sestává ze *silikonového polymeru*, *výplně* a *vulkanizačního prvku* (zesíťovadla). Silikonové elastomery jsou tedy zesíťované lineární silikonové kapaliny nebo pryže se třídimensionální strukturou.[12]



Obrázek 5 Polymerní síť silikonových elastomerů

Výplně (fillers) jsou často zpevňujícími elementy již hotové pryže. Nejběžnějšími plnivými jsou saze a křemíkové částice. Někdy je možné nalézt v elastomeru také výplně, které mají za úkol snížit cenu nebo docílit požadované barvy materiálu.[12]

Vulkanizačním činidlem je např. síra, která je schopna reagovat s mnohonásobnými vazbami a tak vznikají polysulfidické můstky. Procesem vulkanizace docílíme zvýšení odolnosti, jelikož provázáním řetězců zvyšujeme pružnost. Na druhou stranu, není možné elastomer dál formovat.[10]

Silikonové polymery často také nazývané polysiloxany nemají mezi základními stavebními prvky řetězce polymeru uhlík, ačkoliv silikon se nachází ve stejné skupině jako uhlík v periodické tabulce prvků. Má tedy trochu jinou strukturu. Na některé silikony je možné narazit i v přírodě v podobě nerostů, minerálů a dokonce i v písku.

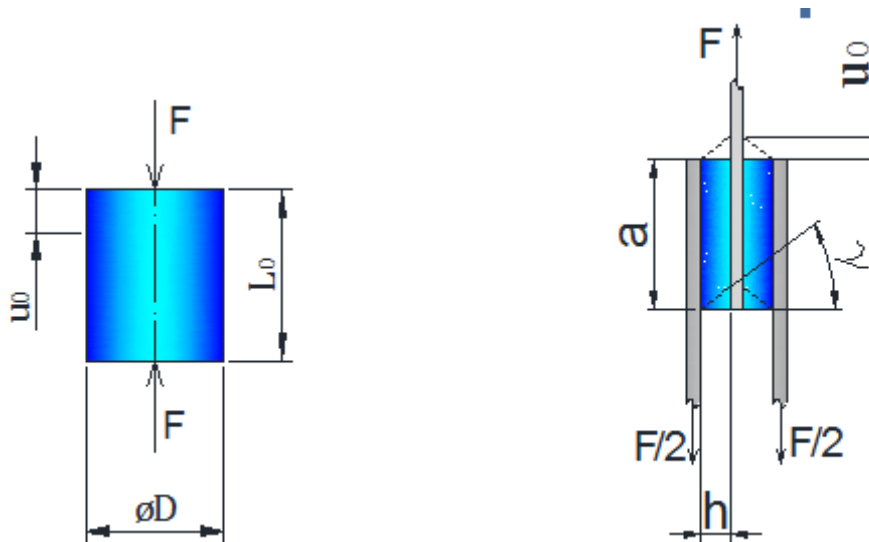
Takovéto polymery mají základní stavební strukturu Si-O.

Silikony jsou obecně stabilní, voděodolný, chemicky inertní a díky tomu nacházejí své uplatnění nejen v medicíně. Nejběžnějším využitím jsou izolace v elektrotechnice. Díky tomu, že se za vysokých teplot nerozkládají a nestávají se viskózními našli své uplatnění i silikonové oleje.[10]

Silikony mohou vznikat jednak *polykondenzací* (C-silikony). U této chemické reakce se při vzniku složitější molekuly uvolňuje ještě další sloučenina, která většinou bývá nízkomolekulárního charakteru. Druhou možností je reakce *polyadiční*, při které nevzniká žádný druhotný produkt(A-silikony). [11]

Pro naši práci využijeme platinový katalizační systém. [13] Výhodou tohoto systému je, že nevytváří žádný vedlejší produkt. Jak již bylo zmíněno v názvu, jako katalyzátor je zde využita platina(Pt). Wilhelm Ostwald (1902) definoval katalyzátor jako „látku, která mění rychlost chemické reakce, aniž se sama objevuje v sumárním zápisu reakce“. Tento "curing" proces je přiváděn mezi dvě stejně hmotnostně obsáhlé základní části. První část obsahuje platinový katalyzátor a druhá nese zesíťovač a inhibitor. [14]





Obrázek 7 Tlakové zatížení vzorku (vlevo), smykové zatížení MRE (vpravo)[13]

Napětí a deformace jsou tedy počítány s ohledem na počáteční předpětí vzorku:

$$\varepsilon_0 = \frac{u_0}{L_0 + u_0} \quad (4)$$

$$\Delta\varepsilon = \frac{\Delta u}{L_0 + u_0}, \quad (3)$$

kde  $L_0$  je původní délka nezatíženého vzorku.

Silová odezva je pak ve tvaru:

$$F(t) = F_0 + \Delta F \cdot \sin(2\pi f t + \delta), \quad (4)$$

kde  $F_0$  je statická síla (předpětí) závisící pouze počáteční dislokaci  $u_0$ .

Jelikož se jedná o stlačitelný materiál  $A_0 \cdot L_0 = A \cdot (L_0 + \Delta u)$ , kde  $A_0$  je plocha průřezu nezatíženého vzorku, kdežto  $A$  je plocha průřezu zdeformovaného vzorku.

Napětí lze tedy vyjádřit ve tvaru

$$\sigma(t) = \frac{F(t)}{A} = \sigma_0 + \Delta\sigma[\cos(\delta) \sin(2\pi f t) + \sin(\delta) \cos(2\pi f t)], \quad (5)$$

kde  $\sigma_0$  je počáteční amplituda napětí,  $\omega$  úhlová rychlost,  $t$  je čas cyklu a  $\delta$  je úhel fáze neboli mechanický ztrátový úhel, který se nachází v intervalu  $0^\circ < \delta < 90^\circ$ .

Dynamickou odezvu napětí lze vyjádřit

$$\sigma(t) = \sigma_0 + \Delta\varepsilon[E'(\varepsilon_0, f, \Delta\varepsilon)\sin(2\pi f t) + E''(\varepsilon_0, f, \Delta\varepsilon)\cos(2\pi f t)] \quad (6)$$

Jak již bylo zmíněno u viskoelastických materiálů, část energie vynaložené pro zatížení disipuje v tepelnou, a část energie se uchová a využije se například pro odlehčení vzorku. Modul pro zachování této energie se označuje  $E'$ . V literatuře často označovaný jako "storage modulus" tedy paměťový modul značně ovlivňující tuhost elastomeru.

Ztrátový modul  $E''$  "loss modulus" naopak charakterizuje, kolik zatěžovací energie je materiál schopen disipovat.

Dále pak  $\epsilon_0$  je maximální amplituda deformace. Z poměru paměťového a ztrátového úhlu jsme pak schopni určit tzv. "dumping effect" ,neboli tlumící efekt či ztrátovou tangentu.

$$\tan\delta = \frac{E''}{E'} \quad (7)$$

Jedná se o míru disipované mechanické energie v teplo po uběhnutí jednoho cyklu.

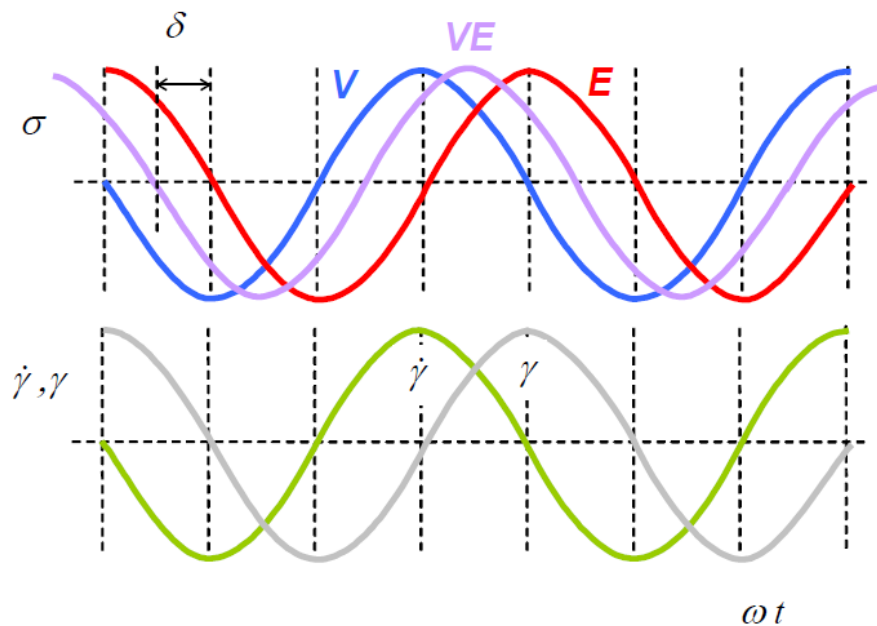
$$E'(\epsilon_0, f, \Delta\epsilon) = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\epsilon} \cdot \cos(\delta) \quad (8)$$

$$E''(\epsilon_0, f, \Delta\epsilon) = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\epsilon} \cdot \sin(\delta) \quad (9)$$

Jestliže amplituda  $\Delta\epsilon$  se zvyšuje pak se modul  $E'$  zmenšuje a disipační modul  $E''$  vykazuje průběh více či méně se podobající logaritmické křivce, čemuž se říká "Payne effect".

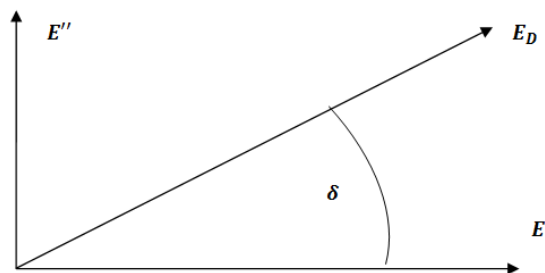
Obecně platí, že viskoelastické materiály s viskózním charakterem mají hodnotu ztrátového úhlu vyšší než  $45^\circ$  ( $90^\circ$  čistě viskózní materiál) a naopak materiály s elastickým charakterem mají tuto hodnotu nižší než  $45^\circ$ . Ideální viskoelastický materiál má hodnotu ztrátového úhlu  $45^\circ$ . Z hodnot dynamických modulů v závislosti na úhlové frekvenci je možno definovat dynamickou viskozitu.[2,15,17]

$$\eta^* = \sqrt{\left(\frac{E'}{\omega}\right)^2 + \left(\frac{E''}{\omega}\right)^2} \quad (10)$$



Obrázek 8 Odezva napětí při oscilování: V-Newtonovská kapalina ( $E''$ ), E-Hookeovo těleso( $E'$ ), VE-viskoelastický materiál [2]

Dynamický modul je komplexní číslo, jehož reálnou složkou je modul pro paměťový  $E'$  a imaginární částí je ztrátový modul  $E''$ . [17]



Obrázek 9 Závislost dynamického modulu, ztrátového modulu a modulu pro zachování energie.

## 4. Příprava vzorků

### 4.1. Příprava silikonové pryže

Pro přípravu vzorků bylo využito materiálů od společnosti Havel composites. Přesněji silikonu ZA 22 a katalyzátoru R ZA 22. Vzorky byly připravované polymerizací za normálních teplot, jelikož pro uskutečnění této metody není třeba žádných speciálních přípravků a pomůcek. Polymerizace za běžných teplotních podmínek byla provedena smícháním dvou komponent (elastomer + katalizační jednotka). Existují dvě technologie pro vytvoření RTV elastomerů (Room Temperature Vulcanization) vytvořených ze dvou komponent. Jednou z nich je kondenzační a druhou z nich je tzv. "přídavková" z anglického překladu "Additional Cure", která byla využita pro přípravu našich vzorků. Jak již bylo zmíněno výše, tento proces se opírá o platinový katalyzátor. Materiál jež byl vytvořen pro tuto práci vykazuje několik kladných vlastností:

- není toxický
- poměr 1:1, tedy jednoduchý pro přípravu
- vysoce chemicky odolný
- vysoká mez pevnosti v tahu
- dlouhodobá dimensionální stabilita
- vysoká teplotní rezistence (200-220°C)
- proces polymerizace probíhá za pokojových teplot



<b>Poměr míchání látek</b>	<b>1:1</b>
<b>Viskozita směsi před vložením katalyzátoru</b>	<b>4000±300cP</b>
<b>Čas míchání směsi za teploty 23°C (73°F)</b>	<b>1min</b>
<b>Čas celého procesu</b>	<b>14-17min</b>
<b>Čas pro ustálení za teploty 23°C (73°F)</b>	<b>1hod</b>
<b>Tvrдость dle Shoreho metody typu A po 24hod.</b>	<b>21±2ShA</b>
<b>Mez pevnosti v tahu</b>	<b>4,0±0,2Mpa</b>
<b>Mez pevnosti v ohledu na deformaci</b>	<b>380±20%</b>
<b>Odolnost proti trvalému porušení metoda Die B</b>	<b>20±1 N/mm</b>
<b>Odolnost proti trvalému porušení metoda Die C</b>	<b>12±1 N/mm</b>

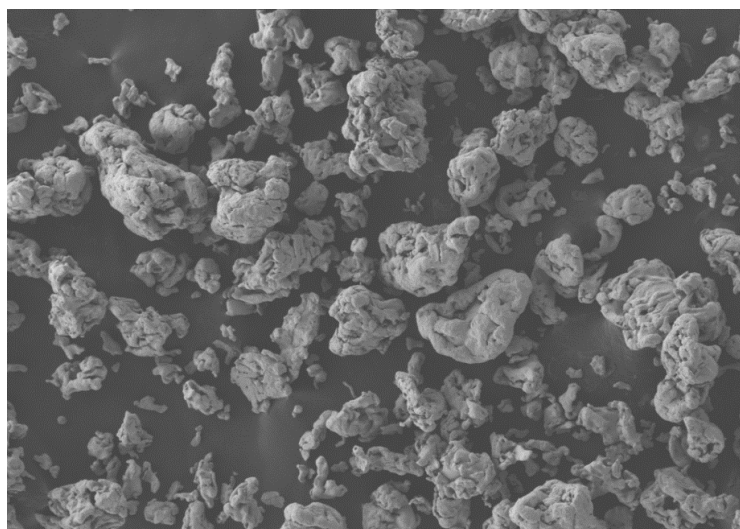
Tabulka 1 Chemická a fyzikální charakteristika [13]

## 4.2. Magnetosensitivní částice

Pro zajištění magnetoreologického efektu bylo použito dvou různých částic. V prvním případě železných částic a v druhém případě karbonyl železa. U obou dvou byl materiál zkoumán pomocí SEM (scanning electron microscope) a poté pomocí softwaru ImageJ byl určen tvar a velikost částic. Jenž byl proveden na Katedře Materiálů na Technické Univerzitě v Liberci.

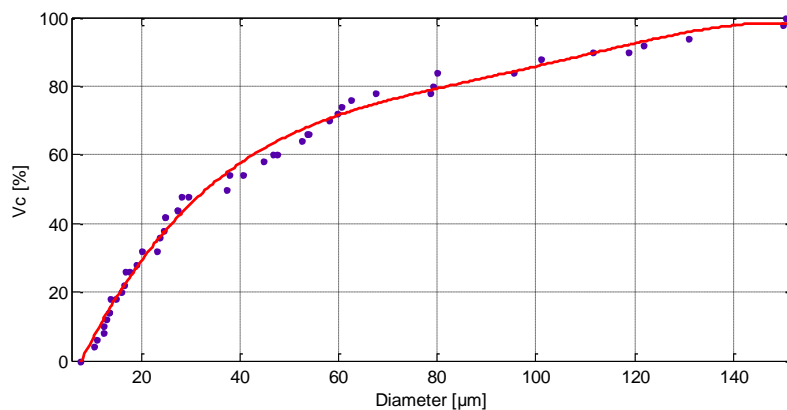
### 4.2.1. Železné částice

Nepřavidelný tvar železných částic byl dokázán díky analýze SEM a stejně tak i široký rozsah velikostí částic.



Obrázek 10 Mikrostruktura železných částic (průměr) [13]

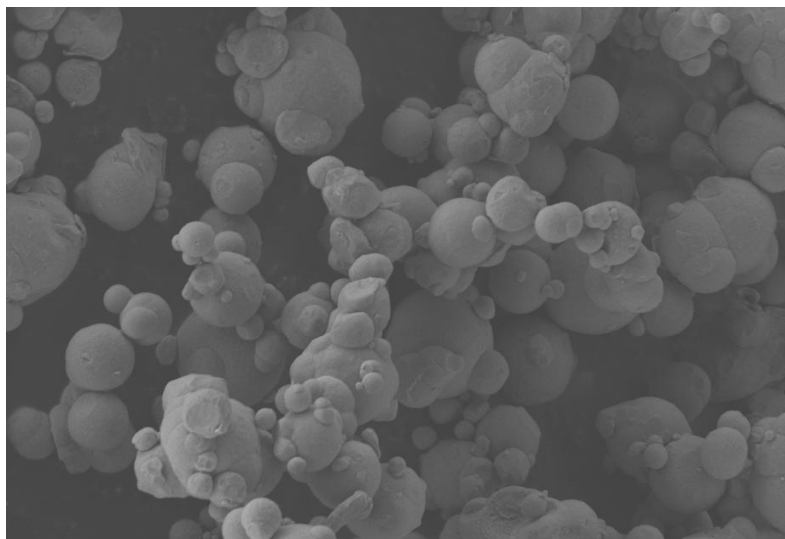




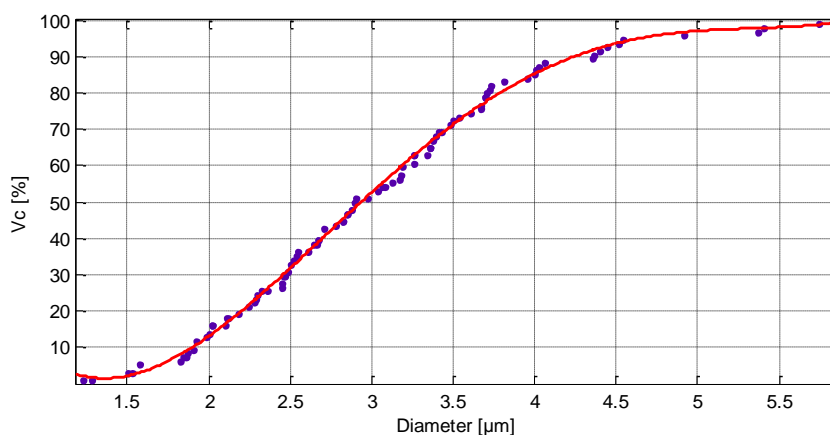
Graf 1 Průměr železných částic jako funkce objemové frakce [13]

#### 4.2.2. Karbonyl železa

Jedná se o částice, které obsahují 99,6% Fe tedy téměř o čisté železo. Zbylé 0,4% jsou nečistoty. Nejčastějšími příklady jsou dusík, uhlík a kyslík. Tvar částic karbonylu železa je sférický a jejich velikosti nejsou natolik rozdílné.



Obrázek 11 Mikrostruktura karbonylu železa [13]



Graf 2 Průměr částic karbonylu železa jako funkce objemové frakce [13]

### 4.3. Vzorky pro kompresní testy

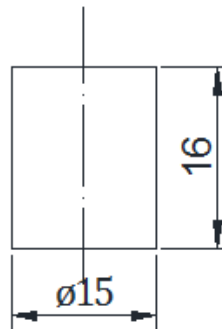
Jelikož je zajímavé porovnat jak moc ovlivní mechanické vlastnosti materiálu přidání železných částic, byli vytvořeny dva druhy silikonů pro kompresní testy a to plněné MRE a čisté silikony.

#### **Specifikace :**

Vzorek	Matrix		Železné částice [%]
	Silikon - objemová frakce [%]	Katalyzátor-objemová frakce [%]	
Silikonový kaučuk	50	50	-
MRE	35	35	30

Tabulka 2 Specifikace vzorků pro tlakové testy

#### **Rozměry vzorků:**



Obrázek 12 Rozměry vzorků pro kompresní testy

### 4.4. Vzorky pro zatížení ve smyku

Pro srovnání bylo opět vytvořeno více druhů vzorků. Jedním z nich je stejně jako v kompresním testu čistý silikonový elastomer. Druhé dva typy vzorků se liší zejména ve výplni. Jedná se tedy o částice železa a karbonylu železa, který by měl dle různých publikací vykazovat velice dobré výsledky.

## Specifikace:

Vzorek	Matrice		Plnivo [%]	Teoplota [°C]	Vlhkost [%]
	Silikon[%]	Katalyzátor[%]			
Silikon elastomer	50	50	-	22,3	27
MRE s karbonylem Fe	35	35	30	21,8	45
MRE s Fe	35	35	30	23,4	52

Tabulka 3 Specifikace vzorků pro smykové testy

## 4.5. Výroba

Proces výroby začíná u mísení silikonového prášku s katalyzátorem a to v poměru 1:1. Tento krok je velice důležitý, je třeba míchat pomalu a důkladně, abychom docílili kvalitního čistého silikonu s co nejmenší pórovitostí.

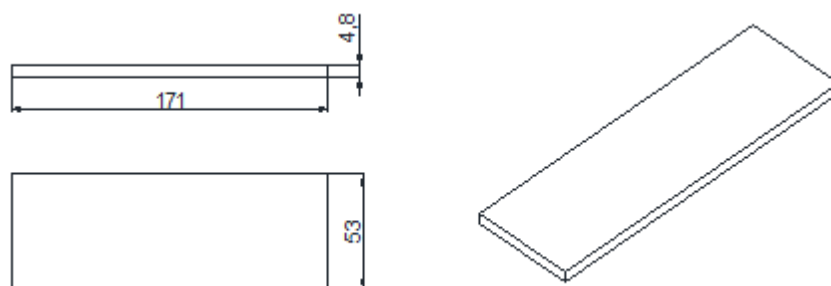
Pro dodržení správných poměrů je nezbytné přesné měření objemů jednotlivých komponent našeho kompozitu. Proto bylo pro vyměření katalyzátoru a silikonové směsi využito injekčních stříkaček a pro určení hmotnostního podílu plniva (částic Fe a karbonylu Fe) se vycházelo z hustoty materiálů.

Po důkladném odměření je možné přejít k samotnému míchání. Nejprve se do skleněné nádoby vloží magneto-senzitivní plnivo a s ním trochu silikonového oleje, aby se byli částice schopny oddělit a nevznikaly tak místa s větším poměrem těchto částic.

Nyní je čas přimíchat další dvě komponenty, tedy silikon a katalyzátor. Opět dbáme na důkladné promíchání. Proces trvá přibližně 25 až 30min, aby již v tomto kroku začal materiál vulkanizovat. Je také důležité, abychom docílili co nejvíce viskózního materiálu, jak je jen možné. Jelikož se při přelévání hmoty do formy snažíme vyhnout usazování částic na dně formy a vytvoření tak dvou materiálních vrstev, tedy spodní vrstvy tvořené převážně částicemi a vrchní složené pouze ze silikonového elastomeru.

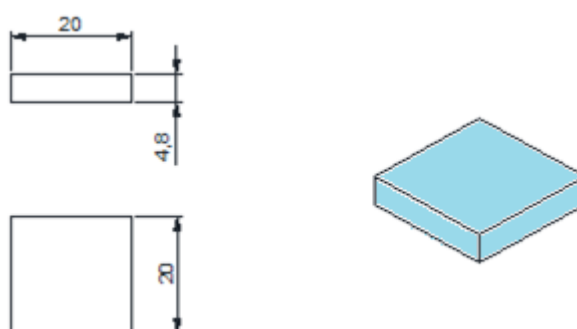
Jak již bylo zmíněno, po smísení komponent byla sloučenina přelita do předem připravené formy, kde probíhal proces vulkanizace. Proto MRE setrval ve formě nejméně 24hod. Důležité zde je opravdu nehybat s formou celých 24hod a postavit ji na rovný podklad pro docílení konstantní tloušťky vzorku.

Rozměry formy:



Obrázek 13 Rozměry formy pro proces vulkanizace vzorků určených pro smykové testy

Po dokončení vulkanizace byl materiál nařezán na menší kusy.



Obrázek 14 Velikost vzorků pro smykové namáhání

Právě tehdy, když chceme docílit smykového namáhání, je třeba upravit upnutí vzorku. Proto bylo využito myšlenky pro ukotvení více vzorků mezi kovové destičky, které budou v zápětí připevněny na měřící přístroj Instron.[16]

Silikony jsou zpravidla méně přilnavými materiály. Proto byl pro spojení silikonu s kovovými "pacičkami" využit aktivátor (IA845 od společnosti Gumex) a kovové destičky byli předem očištěny pomocí etylen alkoholu. Nakonec byli obě části slepeny dohromady pomocí tzv. "vteřinového lepidla" (od společnosti Henkel) a tlaku vytvořeného po několik sekund.



Obrázek 15 Konečná fáze vzorku pro namáhání smykem

## 5. Lepené spoje

Spojování lepením je jednoduchá a energeticky nenáročná záležitost, což vedlo k rozhodnutí využít této technologie pro vytvoření nerozebíratelného spoje silikonových destiček s hliníkovými plíšky. Lepené spoje by z pravidla měli být namáhány na smyk, což je v našem případě taktéž splněno. Smykové napětí ve spoji je možno pak vypočítat:

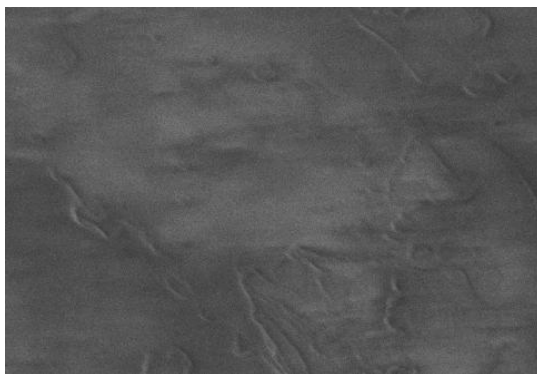
$$\tau_s = \frac{F}{S} \cdot k \quad ; \text{kde}$$

F- amplituda síly, S - styková plocha lepeného spoje, k - součinitel bezpečnosti lepeného spoje.

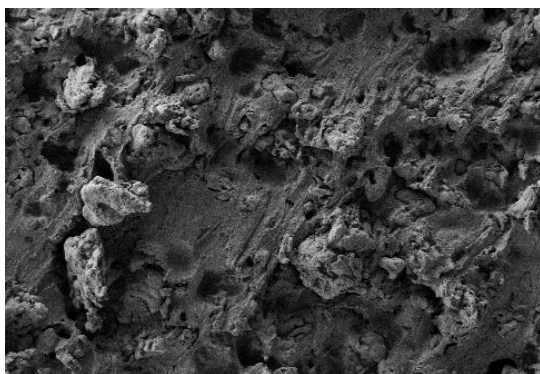
Bohužel lepené spoje nejsou schopny přenést veliké napětí, což je třeba brát na zřetel a vzorky je třeba při měření vystavit menším amplitudám výchylky.

## 6. SEM analýza vzorků

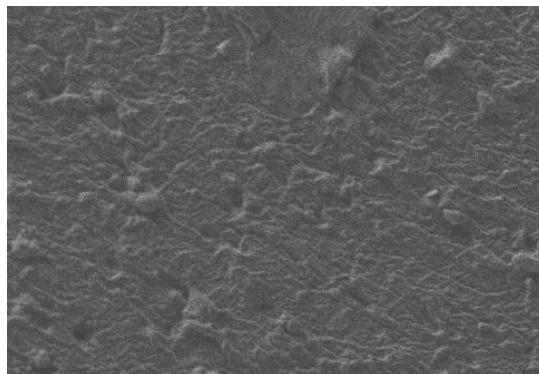
Po dokončení fabrikace a testování vzorků, byla uskutečněna FEM analýza, z níž jsme schopni zjistit pórovitost, drsnost povrchu a celkovou strukturu našeho produktu.



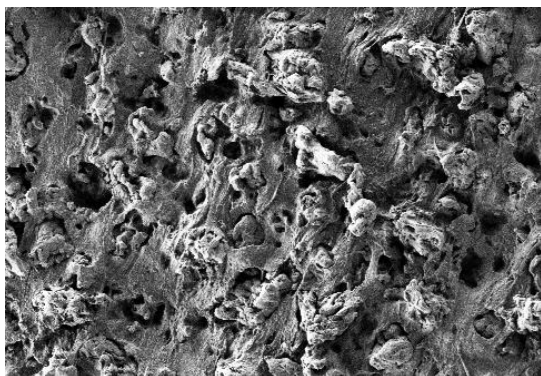
Obrázek 16 SEM snímek silikonového elastomeru, kompresní test[13]



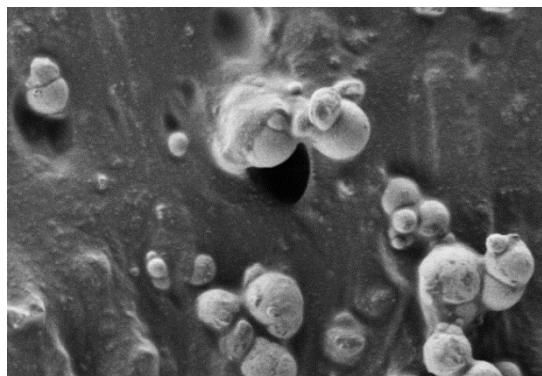
Obrázek 17 SEM snímek MRE s Fe částicemi kompresní test[13]



Obrázek 18 SEM snímek Silikonového elastomeru, smykové zatížení[13]



Obrázek 19 SEM snímek MRE s Fe částicemi,  
smykové namáhání [13]



Obrázek 20 SEM snímek s částicemi karbonylu Fe,  
smykové namáhání [13]

Díky SEM analýze jsme schopni si ověřit, že výroba vzorků byla správná. Jak je vidět ze snímků, vzorky vykazují lehkou pórovitost, čemuž je velice těžké se vyhnout. Podobně je tomu tak i v případě homogenity materiálu. Rozmístění částic v silikonu je nahodilé, přesto jak je ze snímků patrné, je tento produkt dostatečně homogenní.

## **7. Konfigurace a nastavení měřícího přístroje Instron**

Pro experimentální měření dynamické analýzy vzorku využijeme přístroje Instron Electropuls E3000. Jedná se o přístroj s PD (proportional) regulátorem, což znamená, že před samotným měřením je třeba nastavit přibližnou sílu, kterou bude muset přístroj na vzorek vyvinout. V našem případě se jedná o tuhost vzorku. Tu změříme pomocí počátečního konfigurování přístroje (jedná se o test složený z několika málo cyklů, kde si přístroj určí sám tuhost zatěžovaného média).

Po zapnutí softwaru Instron Console je naším prvotním cílem nastavit limity přístroje, abychom se vyhnuli kolizi přístroje, ale i pro vlastní bezpečnost. Proto nastavíme jak primární (vlastní bezpečnost, poškození vzorku), tak sekundární (přetížení přístroje) limity.

V této chvíli je možné přejít k nastavení průběhu testu a k samotnému testování.

## 7.1. Nastavení průběhů testů

Jednotlivé testy se budou vzájemně lišit v závislosti na složení a tvaru vzorku nebo zatížení.

### 7.1.1 Kompresní testy

Krok	Amplituda[mm]	Frekvence[Hz]	Počet cyklů[-]
1	Sjetí do výchozí pozice - Stlačení vzorku o 3mm		
2	0.5	1	80
3	0.5	2.5	120
4	0.5	5	150
5	0.5	7.5	300
6	0.5	10	350
7	Odlehčení vzorku		

Tabulka 4 Průběh kompresních testů

Jelikož magnetické pole při kompresních testech značně ovlivňuje snímač měřícího zařízení Instron, výsledky nejsou dostatečně důvěryhodné. Testování tedy probíhalo pouze bez zatížení magnetického pole.

### 7.1.2 Smykové testy

Krok	Amplituda[mm]	Frekvence[Hz]	Počet cyklů[-]
1	Natažení vzorku o půl mm		
2	0,5	1	40
3	0,5	5	80
4	0,5	10	120
5	0,5	1	20
6	0,5	1	40
7	0,5	5	80
8	0,5	10	120
9	Odlehčení vzorku		

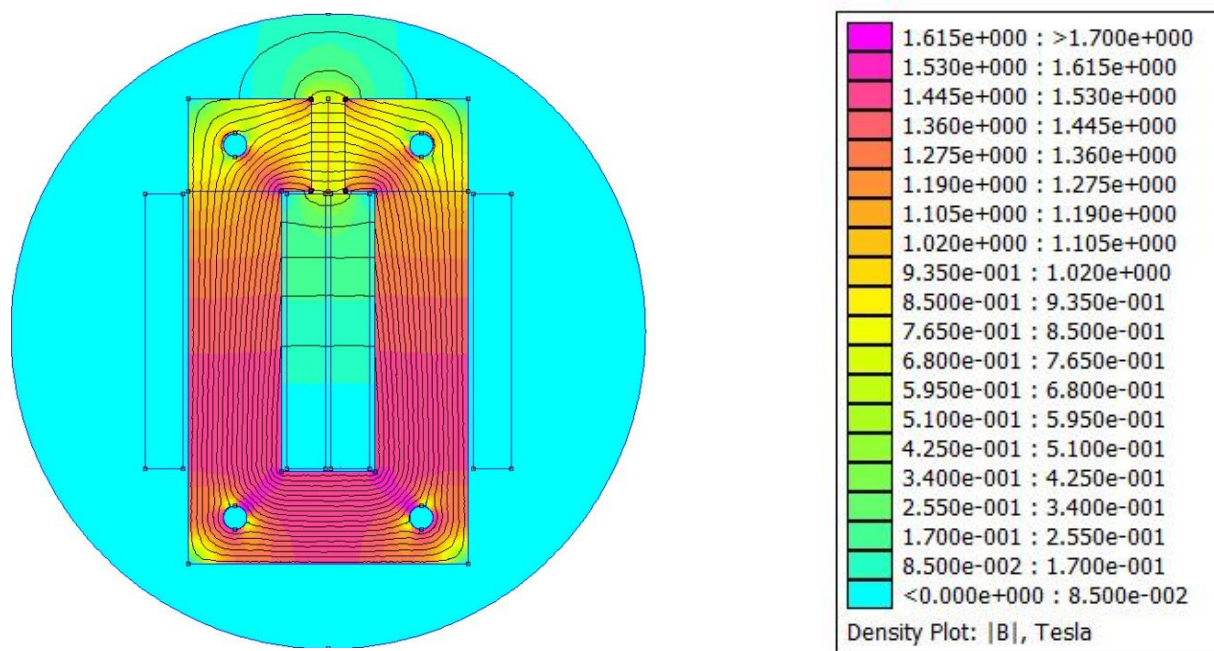
Tabulka 5 Průběh smykových testů

Pátý krok tohoto testu představuje pouhý prostoje, abychom získali čas na zapnutí magnetu a mohl proběhnout ten samý test vzorku ovlivněného magnetickým polem.



## 7.2. Zajištění magnetického pole, smykové zatížení

Magnetické pole pro smykové testování jsme zajistili elektromagnetem, který byl vyroben přesně pro tyto účely. Magnet je schopen vyvinout magnetické pole v místě vzorku až 0,8[T].



Obrázek 19 Analýza elektromagnetu[13]

Při našem měření bylo naměřeno pomocí přístroje 0,3[T], při napětí 11,9 [V] a proudu 2,5[A]. Po vložení vzorku do magnetického pole se magnetické pole zesiluje, jelikož vzduchová mezera se vyplní feromagnetikem. Vzniká tak sekundární vnitřní pole, které se polarizuje, přičemž polarizační pole má stejný směr jako pole primární a tak dochází k jeho zesílení. V našem případě došlo k zesílení magnetické indukce z 300[mT] na 360[mT].

## 8. Vyhodnocování výsledků

### 8.1. Diskrétní Fourierova transformace

Fourierova transformace patří mezi základní mechanismy pro zpracování signálu. Transformuje signál z časové oblasti do oblasti frekvenční a naopak. Jelikož jsme měli konečný počet dat pro zpracování bylo vhodné využít Diskrétní Fourierovy transformace DFT. V Matlabu jsme zavolali funkci fft (Fast Fourier transformation).



Jedná se o efektivní algoritmus pro řešení DFT. Fázový posun mezi sílou a posunutím byl stanoven jako rozdíl mezi fázemi obou signálů při frekvenci buzení.

Výsledkem je jedna goniometrická funkce fázově posunutá.

Předpis Fourierovy transformace:

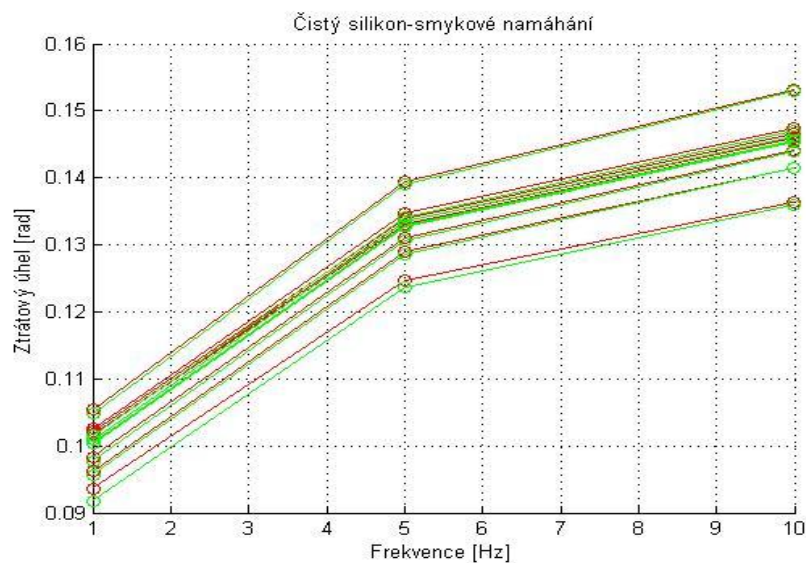
$$f(t) = \frac{1}{2} \cdot a_0 + \sum_{k=1}^{\infty} [a_k \cdot \sin(k\omega t) + b_k \cdot \cos(k\omega t)] \quad (11)$$

## 8.2. Výsledky testů

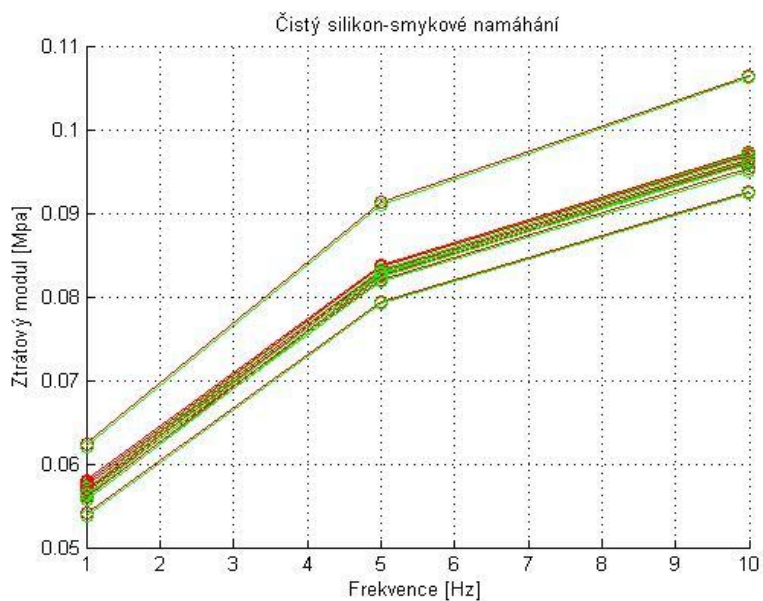
### 8.2.1 Smykové namáhání

#### 8.2.1.1. Čistý silikon

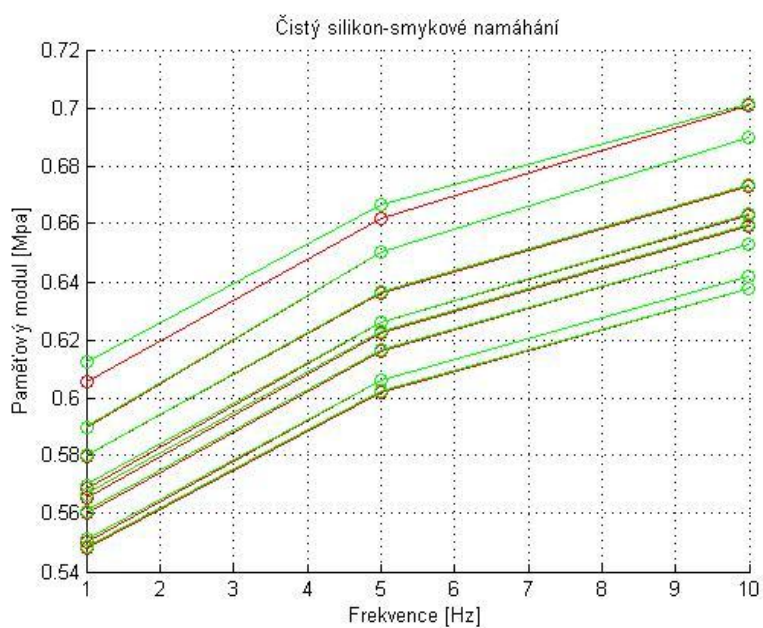
Úvodem byla provedeno DMA měření na vzorcích ze silikonového kaučuku neplněného částicemi a to bez působení magnetického pole a s působením magnetického pole.



Graf 3 Čistý silikon smykově namáhán, zeleně označené- zatížení magnetickým polem s magnetickou indukcí 350[mT], červeně označené-bez magnetického pole. Závislost ztrátového úhlu[rad] na frekvenci[Hz]



Graf 4 Čistý silikon smykově namáhán, zeleně označené- zatížen magnetickým polem s magnetickou indukcí 350[mT], červeně označené-bez magnetického pole.Závislost ztrátového modulu[MPa] na frekvenci[Hz]



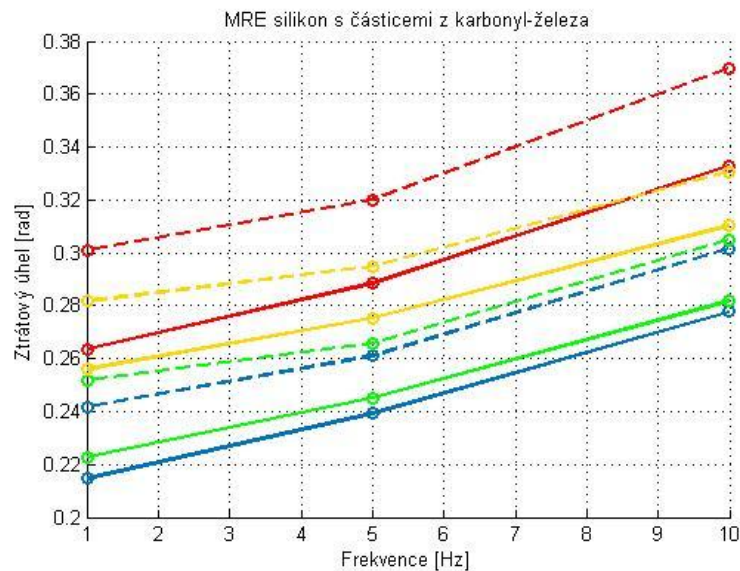
Graf 5 Čistý silikon smykově namáhán, zeleně označené- zatížen magnetickým polem s magnetickou indukcí 350[mT], červeně označené-bez magnetického pole.Závislost paměťového modulu[MPa] na frekvenci[Hz]

Z výsledků je patrné, že magnetické pole nemá absolutně žádný vliv na dynamickou odezvu neplněných silikonových kaučuků. Po vložení vzorku do magnetického pole tedy nenastanou žádné znatelné změny mechanických vlastností materiálu.

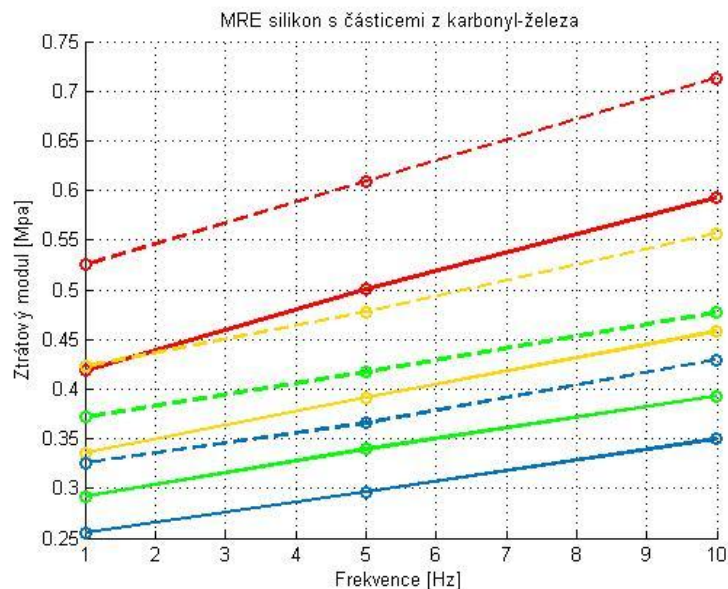
**8.2.1.2. DMA silikonového kaučuku plněného karbonylem železa, namáhaný smykem**

Plnivo v podobě karbonylu železa jsme zvolili, jelikož by mělo vykazovat velice dobrý magnetoreologický efekt. [2,11,13] Jak již bylo zmíněno v kapitole 4.4, objemová frakce plniva činí 30% .

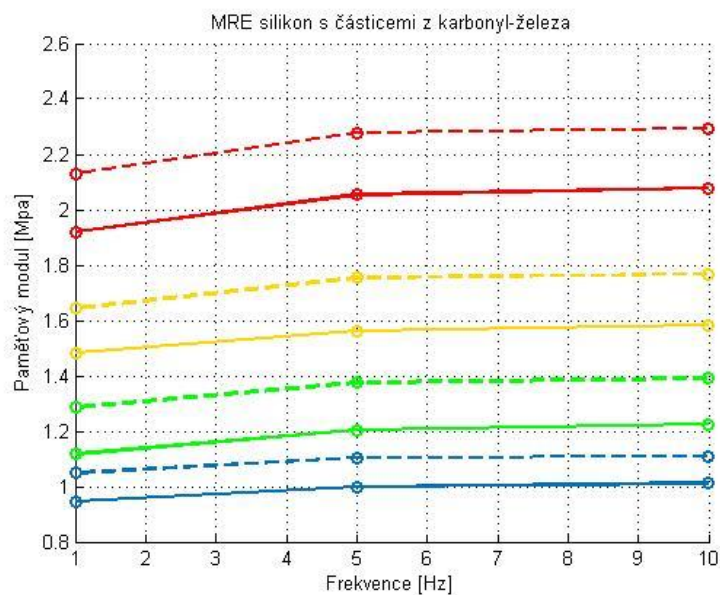
Pro lepší orientaci jsou jednotlivé vzorky v grafech odděleny barevně.



Graf 6 MRE s karbonylem železa smykově namáhan, čárkovaně-zatížené v magnetickém poli s magnetickou indukcí 350[mT], plná čára-bez magnetického pole.Závislost ztrátového úhlu[rad] na frekvenci[Hz]



Graf 7 MRE s karbonylem železa smykově namáhan, čárkovaně- zatížené v magnetickém poli s magnetickou indukcí 350[mT], plné čáry-bez magnetického pole.Závislost ztrátového modulu [MPa] na frekvenci[Hz]

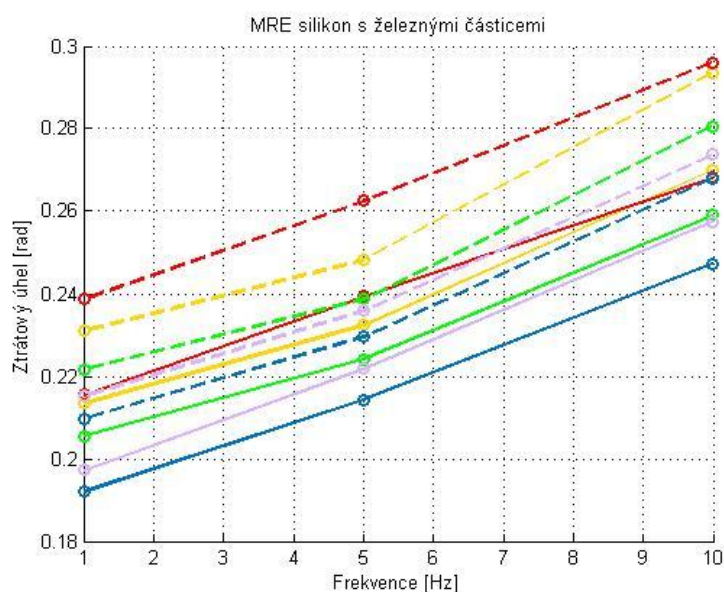


Graf 8 MRE s karbonylem železa smykově namáhán, čárkované- zatížen magnetickým poli s magnetickou indukcí 350[mT], plné čáry-bez magnetického pole.Závislost paměťového modulu[Mpa] na frekvence[Hz]

Z výsledných grafu je zřejmé, že vložením vzorků do magnetického pole jsme značně ovlivnili jejich dynamickou odezvu. K největšímu navýšení jsme dospěli u paměťového modulu, který je takovým "ukazatelem" tuhosti materiálu.

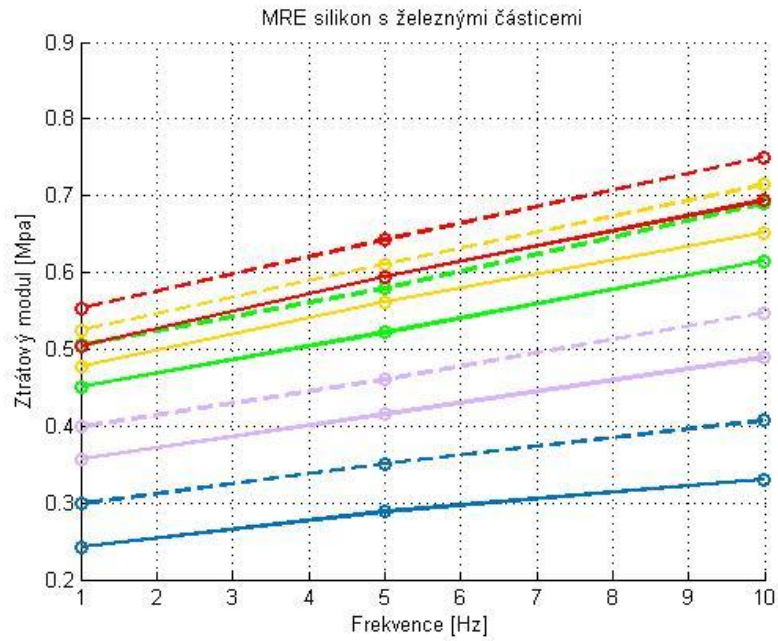
### 8.2.1.3 DMA silikonového kaučuku plněného železnými částicemi, namáhaný smykem

Pro porovnání magnetoreologických vlastností silikonového kaučuku plněného částicemi karbonylu železa bylo provedeno testování smykově namáhaných vzorků silikonového kaučuku plněného částicemi železa.

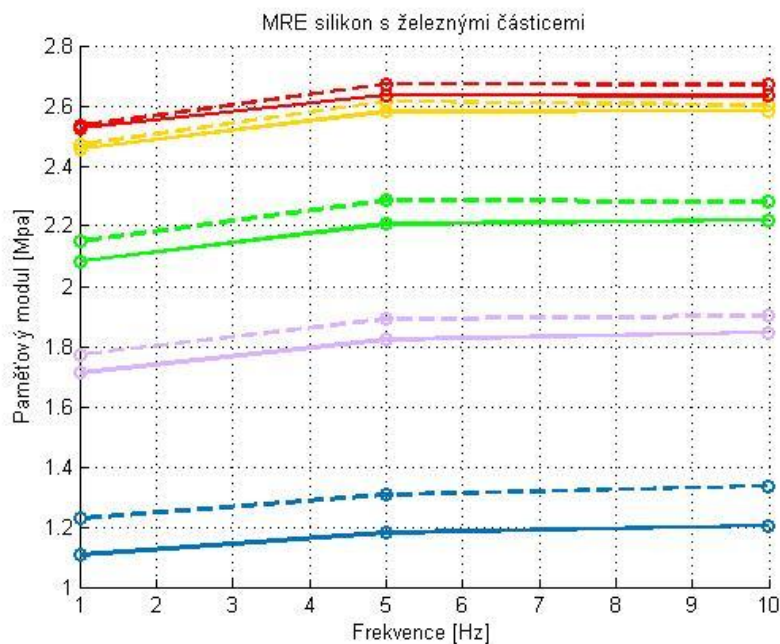


Graf 9 MRE s železnými částicemi smykově namáhán, čárkované- zatížen v magnetickém poli s magnetickou indukcí 350[mT], plné čáry-bez magnetického pole. Závislost ztrátového úhlu[rad] na frekvence[Hz]





Graf 10 MRE s železnými částicemi smykově namáhán, čárkované čáry- zatížen v magnetickém poli s magnetickou indukcí 350[mT], plné čáry-bez magnetického pole. Závislost ztrátového modulu [MPa] na frekvenci[Hz]



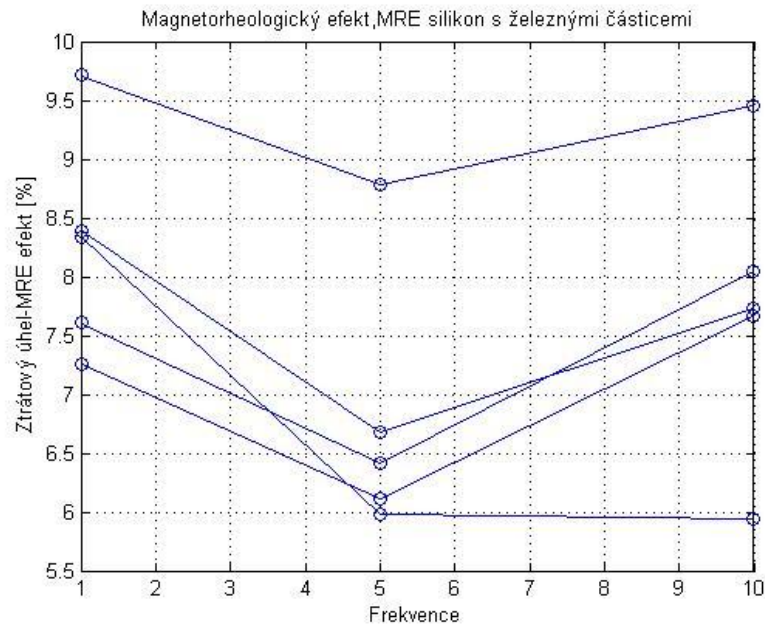
Graf 11 MRE s železnými částicemi smykově namáhán, čárkované čáry- zatížen v magnetickém poli s magnetickou indukcí 350[mT], plné čáry-bez magnetického pole. Závislost paměťového modulu[MPa] na frekvenci[Hz]

MRE plněný železnými částicemi nevykazuje, tak velký nárůst dynamických modulů po vložení materiálu do magnetického pole, jako MRE plněný karbonylem železa. Pozitivem je, že opět můžeme zaznamenat větší nárůst u paměťového modulu než u modulu ztrátového.

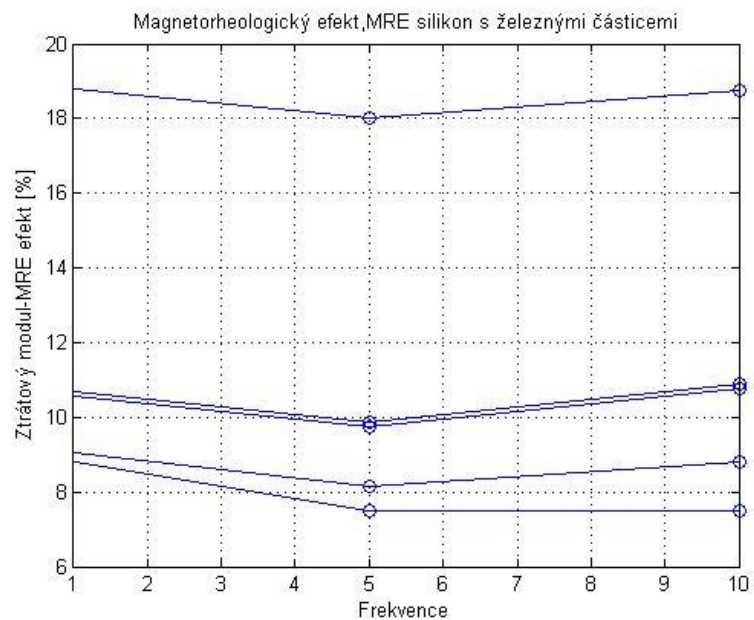
### 8.2.2. Magnetoreologický efekt

Pro sjednocení výsledků byli vytvořeny tyto grafy, které vyjadřují procentuálně MR efekt. Jedná se tedy o procentuální rozdíl hodnot při zatížení bez magnetického pole a v magnetickém poli.

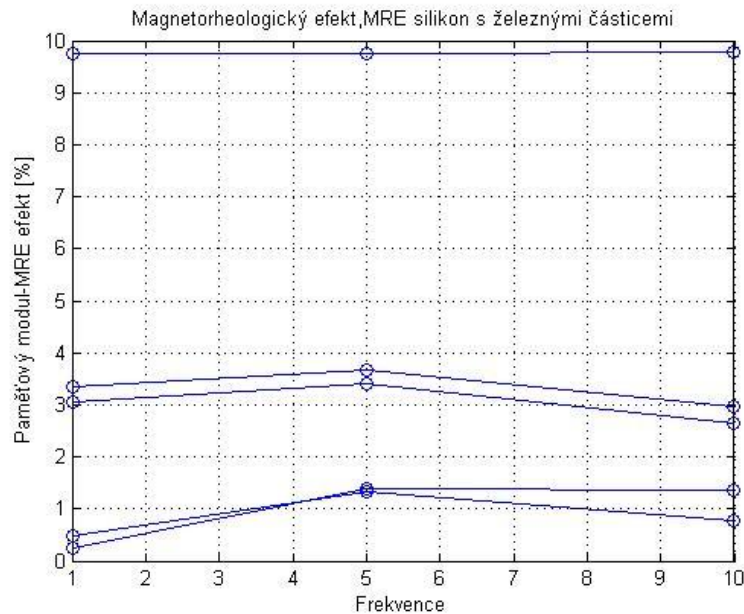
#### 8.2.2.1. MRE plněný železnými částicemi



Graf 12 MR efekt, MRE vyplněné železnými částicemi. Závislost ztrátového úhlu [rad] na frekvenci [Hz]



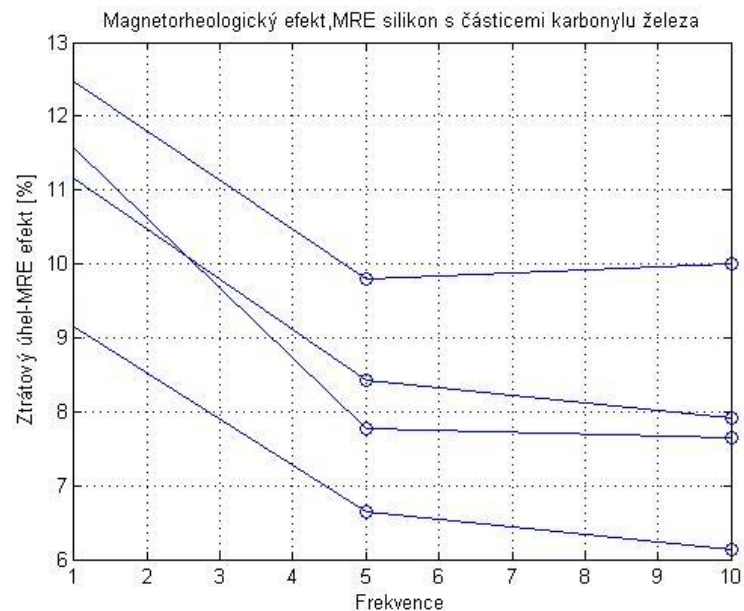
Graf 13 MR efekt, MRE vyplněné železnými částicemi. Závislost ztrátového modulu [MPa] na frekvenci [Hz]



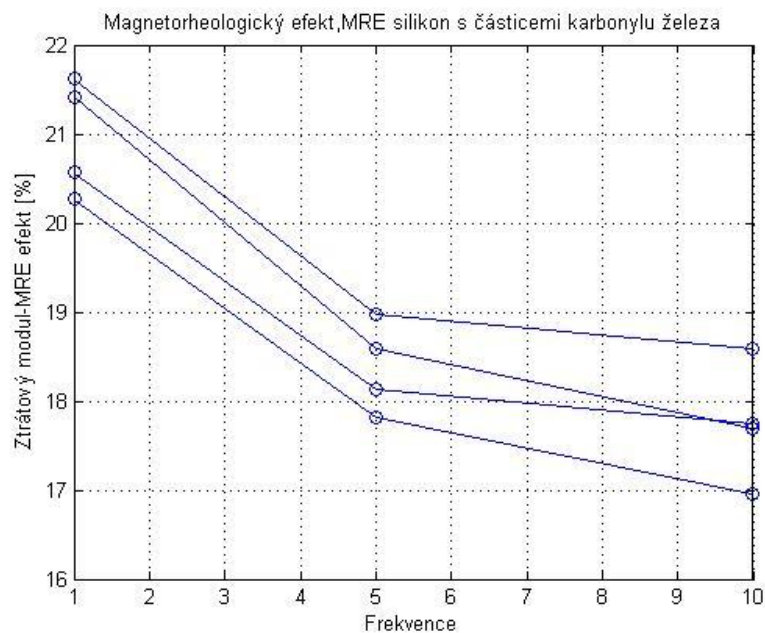
Graf 14 MR efekt, MRE vyplněné železnými částicemi. Závislost paměťového modulu [MPa] na frekvenci[Hz]

MR efekt se zde u paměťového modulu pohybuje okolo 3%. Jedná se tedy o určitý nárůst, který není však tak markantní jako u MRE plněný karbonylem železa. Je patrné, že u jednoho vzorku došlo k poškození např. mohlo dojít k posunutí alumíniových "paciček" a tím došlo k tření mezi povrchem vzorku a magnetu.

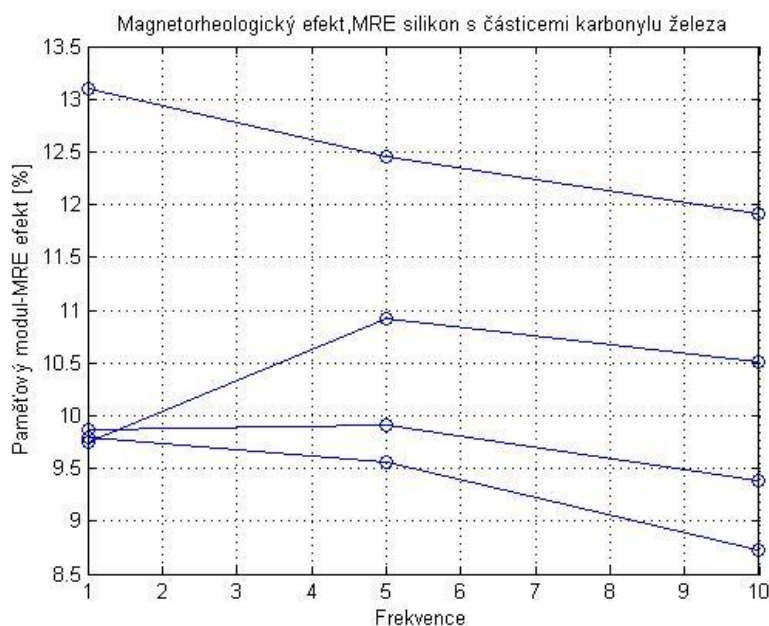
### 8.2.2.2. MRE plněný částicemi karbonylu železa



Graf 15 MR efekt, MRE vyplněné částicemi karbonylu železa. Závislost ztrátového úhlu [rad] na frekvenci[Hz]



Graf 16 MR efekt, MRE vyplněné částicemi karbonylu železa. Závislost ztrátového modulu [MPa] na frekvenci [Hz]



Graf 17 MR efekt, MRE vyplněné částicemi karbonylu železa. Závislost paměťového modulu [Mpa] na frekvenci [Hz]

Z těchto výsledných grafů je zřejmé, že magnetoreologický efekt je velmi znatelný. U paměťového modulu, tedy modulu, který ovlivňuje tuhost materiálu okolo 10%. Proto mnozí z autorů [2,11,13] uvádějí, že karbonyl železa je nejvhodnějším plnivem pro dosažení MR efektu.

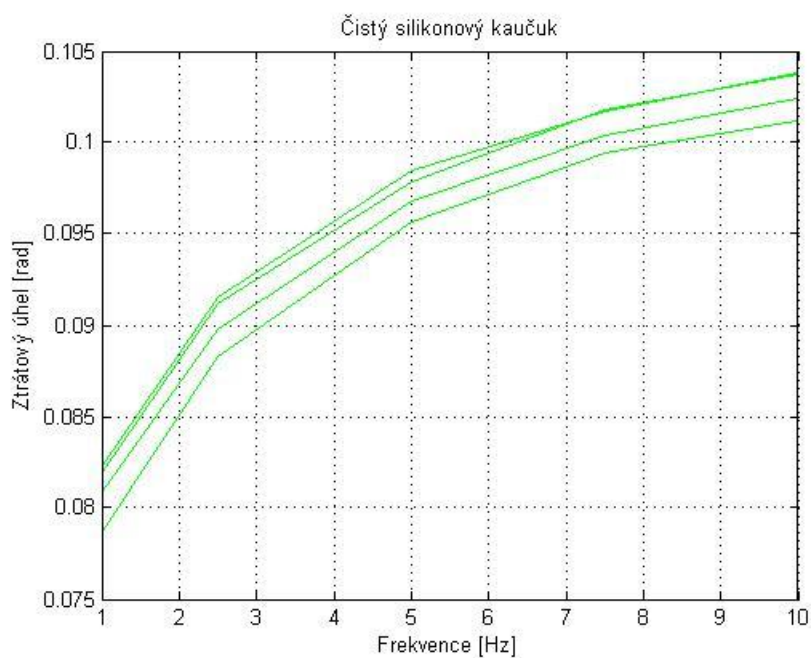


### 8.2.3. Kompresní testy

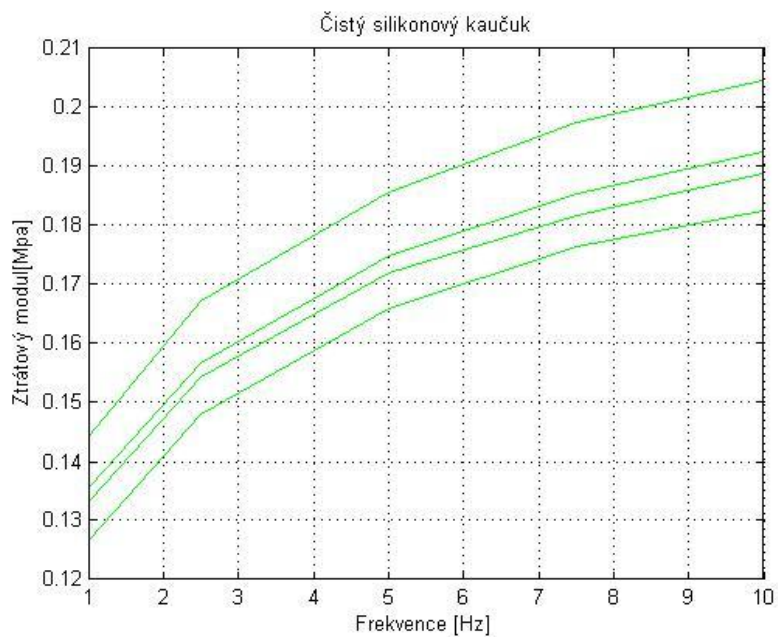
Kompresní testy byli provedeny pro určení dynamické odezvy bez zatížení magnetickým polem, jelikož přiložením permanentního nebo elektromagnetu do měřicí soustavy dochází k ovlivnění měřicí hlavy přístroje Instron a výsledky jsou pak diskutabilní až nepřesné.

#### 8.2.3.1. Čistý silikonový kaučuk

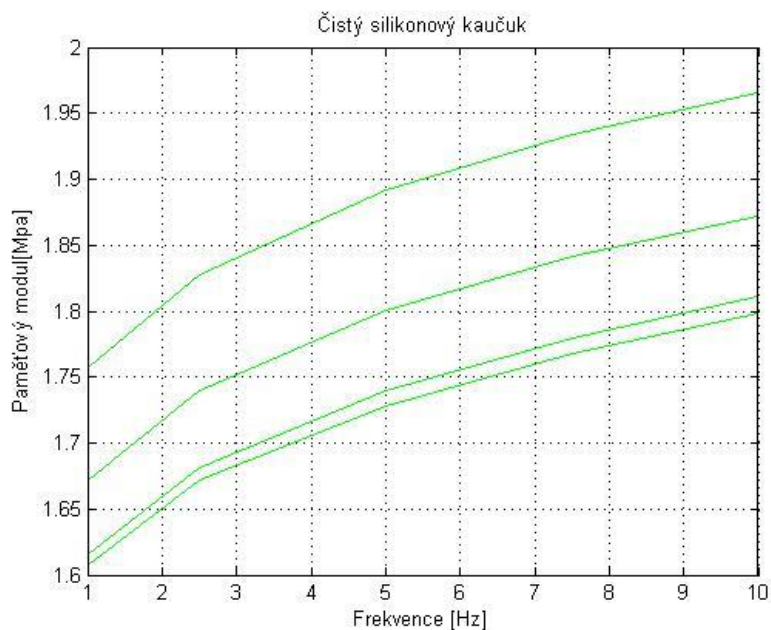
Čistý silikon byl naměřen, abychom výsledky mohli porovnat s ostatními, tedy plněnými silikonovými kaučuky, jelikož v mnoha publikacích[13,1,2] autoři udávají, že pouhým přidáním magneto-senzitivního prášku do silikonového kaučuku se zlepši mechanické vlastnosti.



Graf 18 Kompresní test, čistý silikon. Závislost ztrátového úhlu [rad] na frekvenci [Hz]



Graf 19 Kompresní test, čistý silikon. Závislost ztrátového modulu [MPa] na frekvenci [Hz]

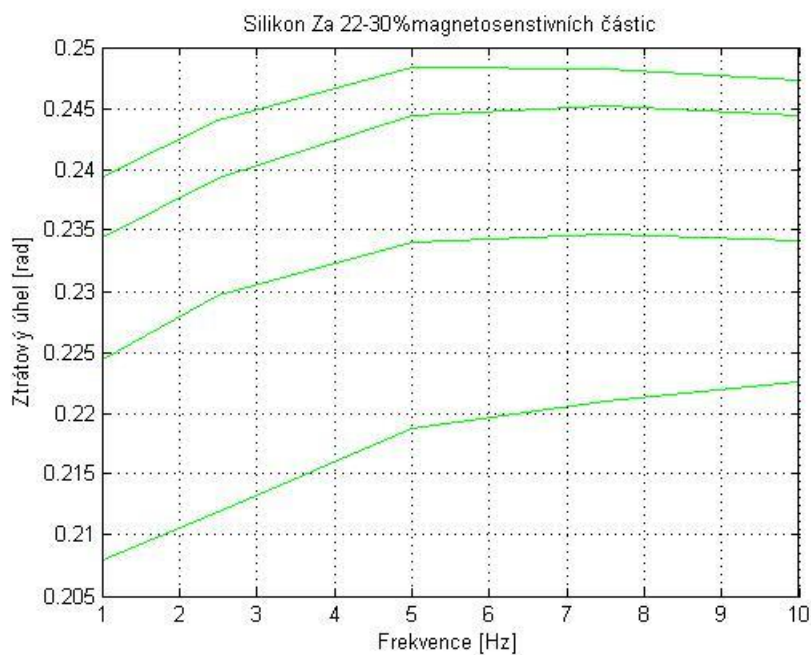


Graf 20 Kompresní test, čistý silikon. Závislost paměťového modulu [MPa] na frekvenci [Hz]

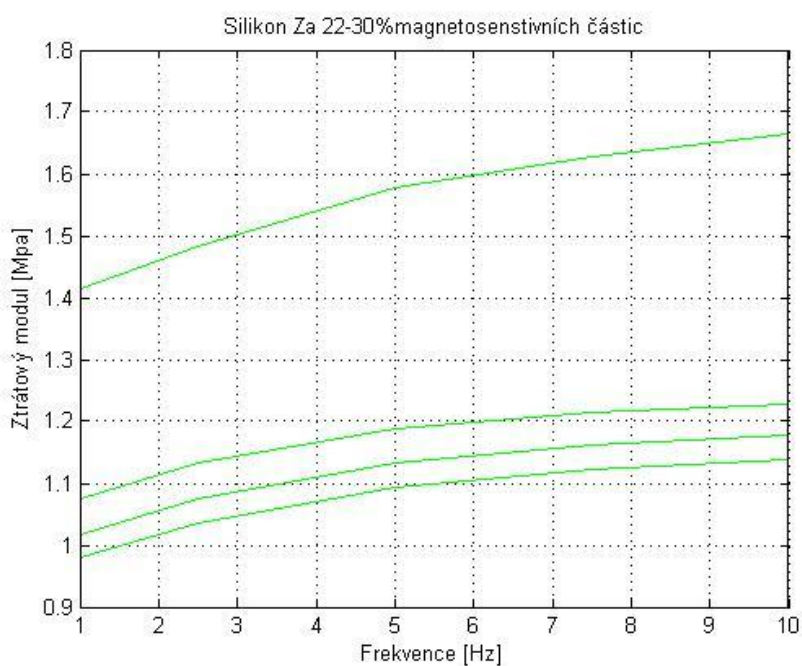
Z výsledků si můžeme všimnout, že rozdíl mezi ztrátovým a paměťovým modulem není až tak veliký. Čistý silikonový kaučuk tedy procentuálně rozptýlí poměrně velké množství zatěžovací energie v teplo.

### 8.2.3.2. MRE z 30% plněný částicemi karbonylu železa

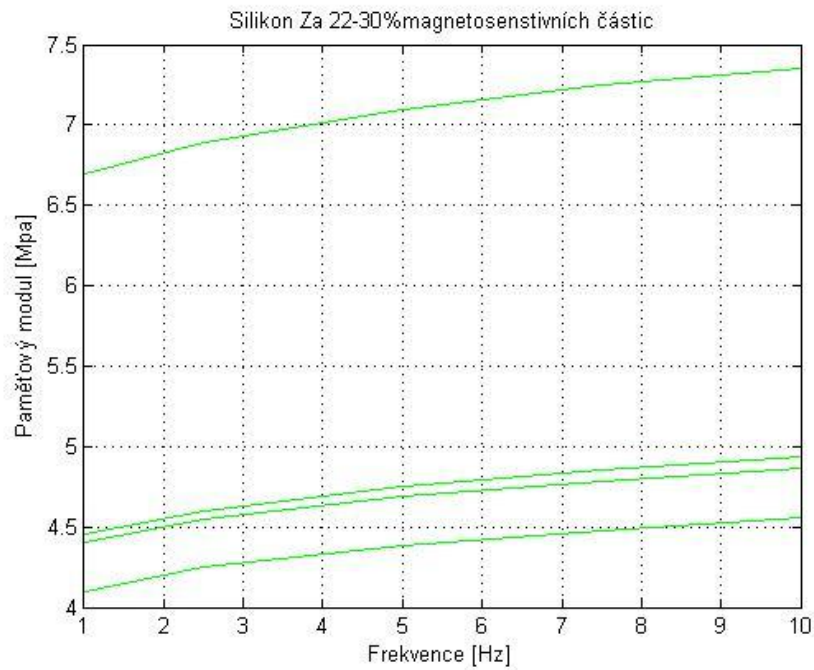
Opět jsme zvolili objemovou frakci 30% pro plnění MRE, jelikož je to nejvhodnější poměr plnění pro naše využití. [2,11,13,15]



Graf 21 Kompresní test, MRE s 30% karbonylu železa. Závislost ztrátového úhlu [rad] na frekvenci [Hz]



Graf 22 Kompresní test, MRE s 30% karbonylu železa. Závislost ztrátového modulu [MPa] na frekvenci [Hz]



Graf 23 Kompresní test, MRE s 30% karbonylu železa. Závislost paměťového modulu [MPa] na frekvenci [Hz]

U silikonových kaučuků plněných 30% je vidět, že rozdíl mezi paměťovým modulem a ztrátovým modulem je znatelně větší než u čistého silikonu. Markantně větší procento energie se tedy akumuluje než disipuje v teplo. Materiál je tužší, jelikož dokáže rozptýlit celkově větší zatěžovací energii.

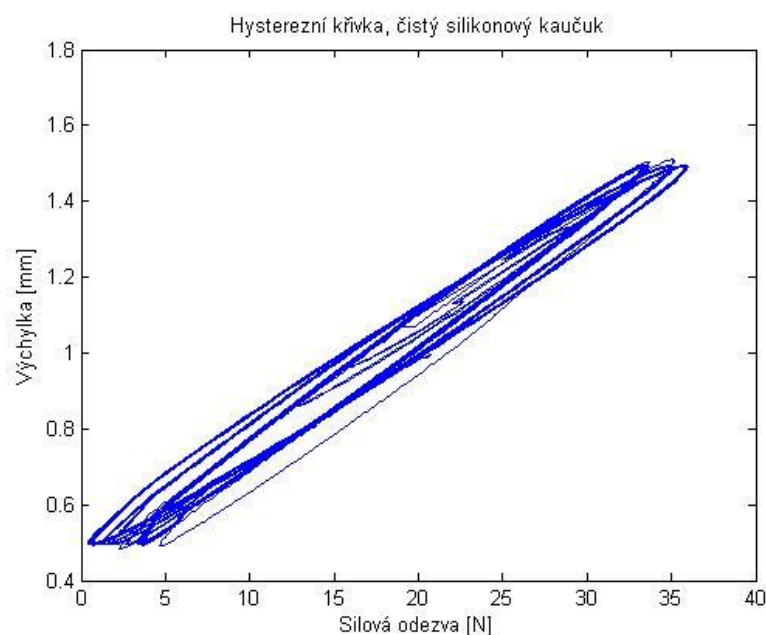
## 9. Závěr

Z provedených experimentálních měření je vidět nepatrná variabilita výsledků, jelikož jsme využili lepených spojů a bohužel není v našich silách docílit stejné adheze u spojovaných ploch každého ze vzorků.

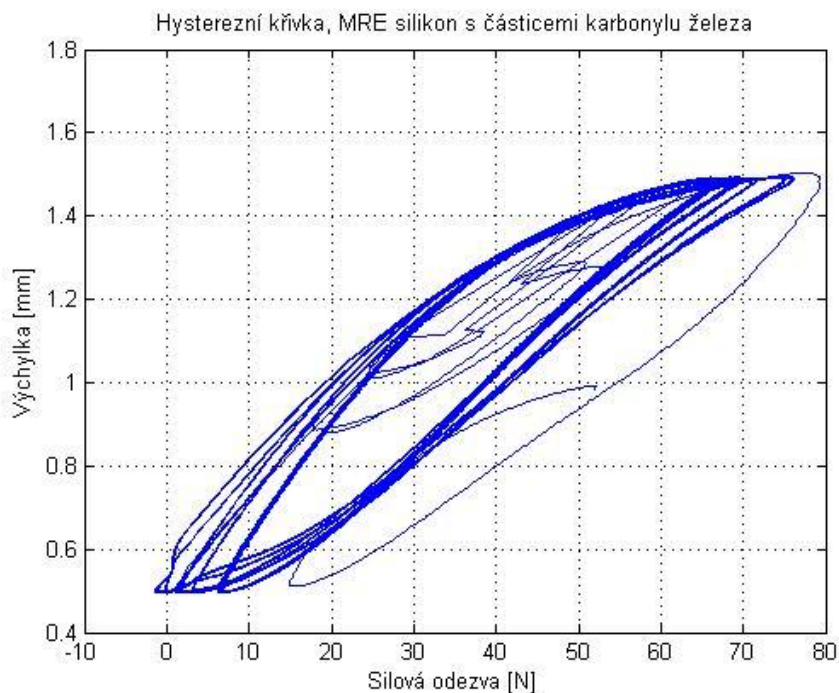
Jak bylo předpokládáno při zatěžování čistého silikonu se výsledky nijak nemění po zapojení magnetického pole. Potvrdilo se tedy, že magneticky nepolarizovatelný materiál neobsahující žádné magneto-senzitivní částice nezlepší tuhostní vlastnosti.

Oba dva druhy MRE dokonce i nezatížené magnetickým polem se pyšní větší tuhostí než má čistý silikon.

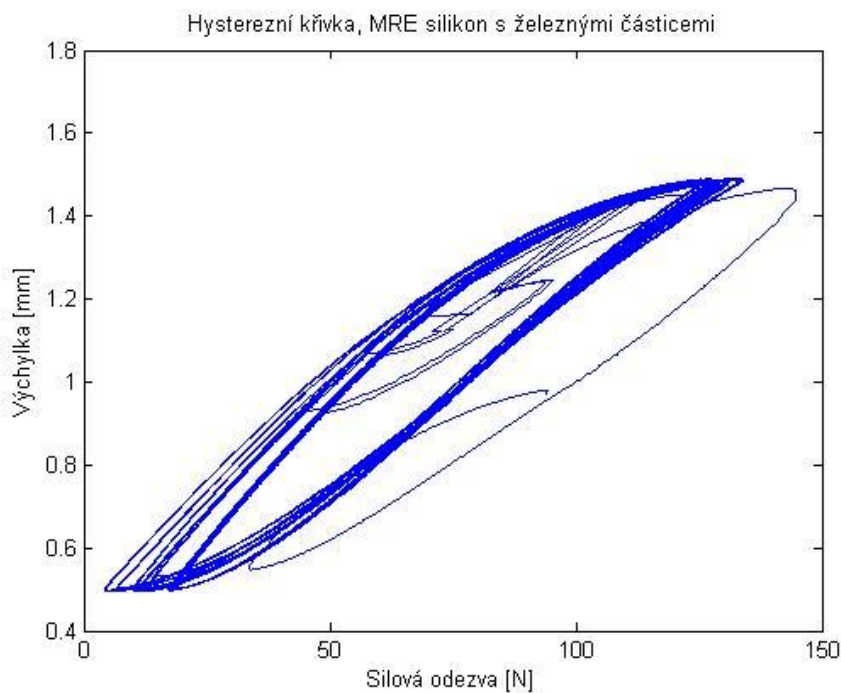
Z níže uvedených hysterezních křivek je zřejmé, že čistý silikon je schopen disipovat méně energie vynaložené pro zatížení vzorků oproti MRE materiálům, jelikož čistý silikon nedisponuje širokou hysterezi, kdežto MRE materiály mají znatelnou disipační plochu, tedy širokou hysterezi. Čím více je schopen materiál disipovat zatěžující mechanické energie, tím větší tuhost vykazuje.



Graf 24 Hysterezní křivka čistého silikonového kaučuku



Graf 25 Hysterezní křivka, MRE silikon s částicemi karbonylu železa



Graf 26 Hysterezní křivka, MRE silikon s železnými částicemi

Nejlepší výsledek s ohledem na MR efekt tedy zlepšení dynamického modulu v závislosti na změně magnetického pole vykazuje MRE s částicemi karbonylu železa. Proto je karbonyl železa nejvhodnějším plnivem silikonů určených pro mechanické systémy, jejichž tuhost je možné ovládat změnou intenzity magnetického pole.

Jak již bylo výše zmíněno, objevují se rozdíly ve výsledcích jednotlivých měření a to především v důsledku porušení lepených spojů, které bohužel nejsou jeden jako druhý. Tímto bych směřoval k návrhu pro další diplomovou či bakalářskou práci a pokusil bych se vzorky určené k smykovému zatěžování navulkanizovat na alumíniové úchyty pro lepší adhezi spojů. Ta by zejména umožnila řízení experimentu větší amplitudou výchylky po delší dobu testování. Díky velkému navýšení cyklů bychom byli schopni zkoumat jak se vzorek zahřívá. Pryžové materiály mají obecně malou tepelnou vodivost a poměrně vysoké hysteretní ztráty s probíhajícími cykly. Tyto vlastnosti by mohli vést k zahřívání vzorku s narůstajícími cykly. Narůstající teplota snižuje dynamický modul a tuhost materiálu.[18,19] Takovéto testování by mohlo vykazovat velice zajímavé a zejména přínosné výsledky např. pro zařazení MRE v technickém využití.

Dalším zajímavým bodem budoucí práce nebo dokonce i samostatnou prací by mohlo být uplatnění těchto inteligentních materiálů v inženýrské praxi a konstrukční zapojení materiálu do mechanického prvku např. brzdného systému. Elastomery s MR efektem nejsou v technice rozšířenými materiály a právě proto je zajímavé a důležité se této oblasti nadále věnovat a hledat jejich budoucí využití.



## Seznam použité literatury

- [1] Lin CHEN, Xing-long GONG, Wan-quan JIANG, Jing-jing YAO, Hua-xia DENG and Wei-hua LI. *Investigation on magnetorheological elastomers based on natural*: Springer, Science+Business Media, págs. 5483–5489. 2007
- [2] Bc. Petr KLUČÍK. *Využití modifikovaného magnetického plniva pro přípravu elastomerních kompozitů*: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta technologická, diplomová práce
- [3] EISEN, W. B., FERGUSON, B. L., R. GERMAN. *Powder Metal Technologies and Applications*: ASM Handbook Volume 7: ASM International, 1998, s.175. ISBN 978-087170-387-3.
- [4] Cullity, B. D., GRAHAM, C. D. *Introduction to Magnetic Materials*: 2nd ed. Wiley 2009, s.359. ISBN 978-0-471-47741-9.
- [5] WEST, A. R., *State Chemistry and Applications*: Solid Wiley and Sons, 2003.
- [6] Ronald F. GIBSON. *Principles of composite material mechanics*: Department of mechanical engineering, Wayne State University Detroit, Michigan
- [7] Sanjay K. MAZUMDAR, Ph.D., *Composites Manufacturing: Materials, Product, and Process Engineering*, ISBN 0-8493-0585-3 CRC press
- [8] Robert A. SHANKS and Ing KONG. *General Purpose Elastomers: Structure, Chemistry, Physics and Performance*: Springer
- [9] V. ŠVORČÍK. *Polymery "stručně"*: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze dostupné z: <http://docplayer.cz/4894705-V-svorcik-polymery-polymery-strucne.html>
- [10] *Silicone Rubber Chemistry and Properties*. s.l. : Silicones Simplified Xiameter dostupné z: [www.xiameter.com](http://www.xiameter.com)
- [11] VIACH,J., TUAN, H. S. & MARVALOVÁ,B.: 2009. *Experimental and numerical research of magnetosensitive elastomers*. In Proc. of 47 int. conf. Experimental stress analysis. Sychrov. 283-290.
- [12] *Silicone Polymers*. s.l. : Virtual chembook, 2003.  
dostupné z: <http://chemistry.elmhurst.edu/vchembook/404silicone.html>
- [13] GARMEDIA, X., *Experimental Determination of Dynamical Properties of Magnetosensitive Elastomeric Composites*, diplomová práce, TUL 2014
- [14] Regina M. MALCZEWSKI, Ph. D., Donald A. JAHN, and William J. SCHOENHERR. *Peroxide or Platinum? Cure System Considerations for Silicone Tubing Applications*: Dow Corning Healthcare



- [15] Marke KALLIO. *The elastic and damping properties of magnetorheological elastomers*: ESPOO 2005 VTT publications 565
- [16] ALBERDI-MUNIAIN, A., GIL-NEGRETE, N., & KARI, L. 2013 *Modeling energy flow through magneto-sensitive vibration isolators*
- [17] Jan RŮŽIČKA, Hoang Sy TUAN, Bohdana MARVALOVÁ. 2007 *Dynamic Measuring Methods of Viscoelastic Properties of Materials*, Structure and Structural Mechanics of Textiles, TU Liberec, Czech Republic
- [18] I. PETRÍKOVÁ, B. MARVALOVÁ & P.T. NHAN. *Influence of Thermal Ageing on Mechanical Properties of StyreneButadiene Rubber*: Technical University of Liberec, Czech Republic
- [19] B. MARVALOVÁ, I. PETRÍKOVÁ, J. NOVÁK: *Self-Heating of Filled Rubber during Cyclic Loading* Dpt. of Applied Mechanics, Faculty of Mechanical Engineering, Technical University of Liberec, Czech Republic
- [20] Bohdana MARVALOVÁ. *Modelling of Magnetosensitive Elastomers*, Technical University of Liberec, Czech Republic
- [21] DORFMANN, L., & OGDEN, R. W. (2014). *Nonlinear theory of electroelastic and magnetoelastic interactions*, Springer