

Magnetoreologické elastomery a jejich radioabsorpční schopnosti

Bc. Miroslava Horáčková

Diplomová práce
2018



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická
Ústav výrobního inženýrství
akademický rok: 2018/2019

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Miroslava Horáčková**
Osobní číslo: **T17362**
Studijní program: **N3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Výrobní inženýrství**
Forma studia: **kombinovaná**

Téma práce: **Magnetoreologické elastomery a jejich radioabsorbční vlastnosti**

Zásady pro vypracování:

- 1. Literární rešerše na zadané téma**
- 2. Příprava magnetoreologických elastomerů o různé koncentraci a distribuci magnetického plniva**
- 3. Analýza elektromagnetického stínění (výpočtová metoda, vlnovody, antény)**
- 4. Vyhodnocení a srovnání získaných výsledků**

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

1. Sedlačík M., Mrlík M., Babayan V., Pavlínek V.: Magnetorheological elastomers with efficient electromagnetic shielding. *Composite Structures*, 135 (2016) 199–204.
2. Cvek M., Moučka R., Sedlačík M., Babayan V., Pavlínek V.: Enhancement of radio-absorbing properties and thermal conductivity of polysiloxane-based magnetorheological elastomers by the alignment of filler particles. *Smart Materials and Structures*, 26 (2017) 095005.
3. Carlson J.D., Jolly M.R.: MR fluid, foam and elastomer devices. *Mechatronics*, 10 (2000) 555–569.

Vedoucí diplomové práce:

doc. Ing. Michal Sedlačík, Ph.D.

Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce:

2. ledna 2019

Termín odevzdání diplomové práce:

17. května 2019

Ve Zlíně dne 6. února 2019

L.S.

doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.
děkan

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

Příjmení a jméno:

Obor:

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby ¹⁾;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3 ²⁾;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně

.....

¹⁾ zákon č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, § 47 Zveřejňování závěrečných prací:

(1) Vysoká škola nevydělečně zveřejňuje disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce, u kterých proběhla obhajoba, včetně posudků oponentů a výsledku obhajoby prostřednictvím databáze kvalifikačních prací, kterou spravuje. Způsob zveřejnění stanoví vnitřní předpis vysoké školy.

(2) Disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce odevzdané uchazečem k obhajobě musí být též nejméně pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněny k nahlížení veřejnosti v místě určeném vnitřním předpisem vysoké školy nebo není-li tak určeno, v místě pracoviště vysoké školy, kde se má konat obhajoba práce. Každý si může ze zveřejněné práce pořizovat na své náklady výpisy, opisy nebo rozmnoženiny.

(3) Platí, že odevzdáním práce autor souhlasí se zveřejněním své práce podle tohoto zákona, bez ohledu na výsledek obhajoby.

²⁾ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 35 odst. 3:

(3) Do práva autorského také nezasahuje škola nebo školské či vzdělávací zařízení, užije-li nikoli za účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obchodního prospěchu k výuce nebo k vlastní potřebě dílo vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacího zařízení (školní dílo).

³⁾ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 60 Školní dílo:

(1) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení mají za obvyklých podmínek právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla (§ 35 odst. 3). Odpírá-li autor takového díla udělit svolení bez vážného důvodu, mohou se tyto osoby domáhat nahrazení chybějícího projevu jeho vůle u soudu. Ustanovení § 35 odst. 3 zůstává nedotčeno.

(2) Není-li sjednáno jinak, může autor školního díla své dílo užít či poskytnout jinému licenci, není-li to v rozporu s oprávněnými zájmy školy nebo školského či vzdělávacího zařízení.

(3) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení jsou oprávněny požadovat, aby jim autor školního díla z výdělku jím dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence podle odstavce 2 přiměřeně přispěl na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložily, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přihlídně k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

ABSTRAKT

Tato diplomová práce je zaměřena na přípravu vzorků magnetoreologických elastomerů (MRE) za účelem následného vyhodnocení jejich radioabsorpčních vlastností v mikrovlnném pásmu. Jako magnetická složka studovaných MRE byly zvoleny železné mikročástice, které byly homogenně dispergovány do silikonové matrice v různých koncentracích, čímž bylo možné stanovit koncentrační závislost stínění elektromagnetického záření u vyvinutých kompozitních materiálů. Byly připraveny MRE vzorky s různými koncentracemi částic. Měření stínící účinnosti probíhalo na analyzátoru PNA – L s vlnovody pro různá frekvenční pásma. Byl sledován vývoj stínící účinnosti v závislosti na koncentraci částic. Napříč všemi použitými frekvenčními pásmy bylo zjištěno, že stínící účinnost narůstá s koncentrací částic ve vzorcích MRE. Převážně tedy ve vyšších frekvenčních pásmech vykazují výraznou stínící účinnost.

Klíčová slova: kompozit, magnetické plnivo, elastomer, magnetoreologický elastomer, elektromagnetické stínění

ABSTRACT

This diploma thesis is focused on the preparation of samples of magnetorheological elastomers (MRE) in order to evaluate their radioabsorption properties in the microwave zone. As the magnetic component of the studied MREs, iron microparticles were selected which were homogeneously dispersed into the silicone matrix at various concentrations, thus determining the concentration dependence of electromagnetic radiation shielding in the developed composite materials. MRE samples with different particle concentrations were prepared. Shielding efficiency measurements were made on a PNA-L analyzer with waveguides for different frequency bands. The development of shielding efficiency in dependence on particle concentration was investigated. Through all the frequency bands used, it was found that the shielding efficiency increases with the concentration of particles in the MRE samples. Mostly in the higher frequency bands they exhibit significant shielding efficiency.

Keywords: composite, magnetic filler, elastomer, magnetorheological elastomer, electromagnetic shielding

Chtěla bych srdečně poděkovat svému vedoucímu diplomové práce panu doc. Ing. Michalu Sedláčkovi, Ph.D. za jeho odborné vedení a pomoc s vypracováním této práce.

Prohlašuji, že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická, nahraná do IS/STAG, jsou totožné. Prohlašuji dále, že na celé diplomové práci jsem pracovala samostatně a použitou literaturu jsem citovala.

Ve Zlíně

.....

podpis

OBSAH

ÚVOD.....	10
I TEORETICKÁ ČÁST.....	11
1 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY	12
1.1 DĚLENÍ KOMPOZITŮ	13
1.2 MATRICE	14
1.2.1 Termoplastické materiály	14
1.2.2 Reaktoplastické materiály	15
1.2.3 Elastomerní materiály	16
1.3 PLNIVO.....	16
1.3.1 Vláknová plniva	16
1.3.2 Částicová plniva	17
2 MAGNETOREOLOGICKÉ MATERIÁLY	18
2.1 MAGNETOREOLOGICKÉ SUSPENZE.....	18
2.2 MAGNETOREOLOGICKÉ PĚNY	20
2.3 MAGNETOREOLOGICKÉ ELASTOMERY	20
2.4 MAGNETOREOLOGICKÉ GELY	22
2.5 MAGNETICKÁ PLNIVA	22
2.6 MAGNETICKÉ VLASTNOSTI LÁTEK.....	23
2.6.1 Paramagnetické látky	24
2.6.2 Diamagnetické látky.....	24
2.6.3 Feromagnetické látky	25
3 APLIKACE MAGNETOREOLOGICKÝCH ELASTOMERŮ	26
3.1 ADAPTIVNÍ LADĚNÉ TLUMIČE VIBRACÍ	26
3.2 ADAPTIVNÍ VIBRAČNÍ ABSORBÉR	27
3.3 SNÍMAČE SÍLY NA BÁZI MAGNETOREOLOGICKÝCH ELASTOMERŮ	28
4 MAGNETOREOLOGICKÝ EFEKT	29
4.1 FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ MAGNETOREOLOGICKÝ EFEKT	29
4.1.1 Teplota.....	29
4.1.2 Velikost a koncentrace částic	30
5 ELEKTROMAGNETICKÉ STÍNĚNÍ.....	31
5.1 CELKOVÁ ÚČINNOST STÍNĚNÍ	32
5.1.1 Vlivy na celkovou účinnost stínění	32

5.1.2	Vlnovod.....	33
5.2	ELEKTROMAGNETICKÉ VLNĚNÍ	34
6	SHRnutí TEORETICKÉ ČÁSTI.....	36
II	PRAKTICKÁ ČÁST	37
7	CÍLE PRÁCE	38
8	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	39
8.1	MATERIÁLY	39
8.2	MATRICE	39
8.3	TVRDIDLO	40
8.4	MAGNETICKÉ MIKROČÁSTICE.....	40
8.5	CHARAKTERIZACE ČÁSTIC.....	41
8.5.1	Morfologie částic	41
8.5.2	Magnetické vlastnosti.....	41
8.6	PŘÍPRAVA VZORKŮ KOMPOZITU	41
8.6.1	Analyzátor PNA	44
8.6.2	Vlnovod.....	47
8.7	CHARAKTERIZACE KOMPOZITU	47
8.7.1	Analýza elektromagnetického stínění připravených kompozitů	47
9	VÝSLEDKY	48
9.1	CHARAKTERIZACE MAGNETICKÝCH ČÁSTIC	48
9.1.1	Morfologie částic	48
9.1.2	Magnetoreometrie	48
9.2	MĚŘENÍ ÚČINNOSTI STÍNĚNÍ	49
	ZÁVĚR	54
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	56
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	60
	SEZNAM OBRÁZKŮ	62
	SEZNAM TABULEK.....	63

ÚVOD

Cílem diplomové práce je měření radiabsorpčních schopností magnetoreologických elastomerů (MRE) a vyhodnotit účinnost stínění elastomeru. Magnetoreologické elastomery jsou považovány za zvláštní druh kompozitu. Jsou tvořeny, stejně jako klasické polymerní kompozity, matricí a plnivem. Plnivo obecně slouží ke zdokonalení mechanických vlastností, snížení ceny kompozitu a v neposlední řadě zvýšení pevnosti. Magnetoreologické systémy jsou velmi často nazývány jako tzv. „smart“ systémy, a to především díky jejich vlastnostem, které jsou ovlivnitelné vnějším magnetickým polem.

Tato diplomová práce v teoretické části pojednává o základních vlastnostech kompozitů, polymerů a zvláště magnetoreologických systémů a jejich vlastností, dále pak blíže pojednává o dvou základních složkách, plnivu a matrici. Největší rozsah teoretické části je věnován samotným magnetoreologickým systémům (pěny, elastomery, suspenze, gely), magnetickým plnivům a magnetickým vlastnostem látek. V další části práce jsou uvedeny příklady použití magnetoreologických elastomerů, např. adaptivní laděný tlumič vibrací, adaptivní vibrační absorbér a snímače síly. Důležitou částí práce jsou kapitoly věnované magnetoreologickému efektu, elektromagnetickému stínění a elektromagnetickému vlnění.

V praktické části práce bylo připraveno 5 vzorků MRE se silikonovou matricí, tvrdidlem a kovovými magnetickými mikročásticemi s různou koncentrací plnění. Připravené vzorky byly postupně analyzovány pomocí vlnovodů o různých rozmezích frekvencí v mikrovlnné oblasti připojením k vektorovému síťovému analyzátoru PNA – L. U vzorků pro každou koncentraci a pro každé pásmo bylo měřeno jejich elektromagnetické stínění. Naměřené hodnoty pro odpovídající pásmo byly zavedeny do grafické podoby a v závěru práce jsou tato data vyhodnocena. Vyhodnocení je zaměřeno na účinnost stínění jednotlivých vzorků s různou koncentrací a pro různá frekvenční pásma.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY

Kompozitem je nazýván heterogenní materiál, který je specificky zkombinován ze dvou a více komponent nebo fází, které se výrazně liší fyzikálními a chemickými vlastnostmi. Kompozitní materiály jsou synergické. To znamená, že dané vlastnosti jednotlivých složek jsou horší než celkové vlastnosti kompozitu. Při minimu energického vkladu vzniká maximalizace požadovaných vlastností, což je považováno za velkou výhodu [2].

Jedna ze složek kompozitu se nazývá primární. Primární složka má funkci pojiva, má kontinuální charakter, a je tažná a méně tvrdá. Druhá ze složek se nazývá sekundární, kterou, u polymerních kompozitů, nazýváme plnivo. Sekundární složky jsou nespojitě a tvořené částicemi rozmanitého tvaru. Příkladem jsou vláknité, destičkové a kulovité. Tato sekundární složka je mnohem pevnější než matrice a přenáší zatížení [1].

Soudržnost těchto dvou složek zajišťují chemické a fyzikální vazby, které jsou představovány například Van Der Waalsovými silami. Pro zajištění lepších mechanických vlastností kompozitu se používá přídavek vhodných chemických látek zlepšujících adhezi plniva k matrici. V případě anorganického plniva se používá anorganická funkční skupina těchto chemických látek, které reagují s povrchem plniva. Obsahují také skupiny organické, které reagují s matricí. Nejčastěji používanými chemickými látkami jsou silany a organické sloučeniny titanu. U částicových plniv tato úprava snižuje houževnatost materiálu [1].

Díky výhodám, které kompozity přináší, je považujeme za nedílnou součást konstrukčních materiálů. Tyto výhody jsou nízká hmotnost, odolnost proti korozi a vysoká únavová pevnost. Díky těmto výhodným vlastnostem kompozity nacházejí uplatnění při výrobě konstrukcí letadel, krytů elektronických zařízení, v oblasti lékařského vybavení nebo kosmických lodí. Uvážlivou kombinací různých materiálů získáváme systém s vysoce užitnými, strukturními a funkčními vlastnostmi, kterých nedosáhneme při použití těchto komponent jednotlivě [6].

V konstrukčních aplikacích mají kompozity tyto vlastnosti:

- sestávají ze dvou nebo i více fyzikálně odlišných a mechanicky oddělitelných materiálů,
- vyrobeny jsou smícháním jednotlivých materiálů tak, aby bylo dosaženo kontrolované a rovnoměrné disperze jednotlivých složek,
- kompozity mají výborné mechanické vlastnosti, v některých případech zcela odlišné od jednotlivých složek.

Jako nejpokročilejší aplikace kompozitů se považuje použití na kosmických lodích ve velmi náročném prostředí. V epoxidové polymerní matrici mají tyto pokročilé kompozity vyztužení z vysoce pevných vláken. Mezi vysoce výkonné kompozity se zařazují kombinace materiálů:

- Epoxid/grafit
- Epoxid/kevlar
- Epoxid/boron

Tyto pokročilé kompozity se používají nejčastěji v leteckém průmyslu, ale uplatnění nacházejí také v komerční sféře [1].

1.1 Dělení kompozitů

Kompozity se mohou dělit několika různými způsoby, například podle druhu matrice nebo podle vlastností výztuže. Další kritéria pro dělení kompozitů mohou být geometrický tvar, velikost, orientace nebo rozměry vyztužujících částic [2].

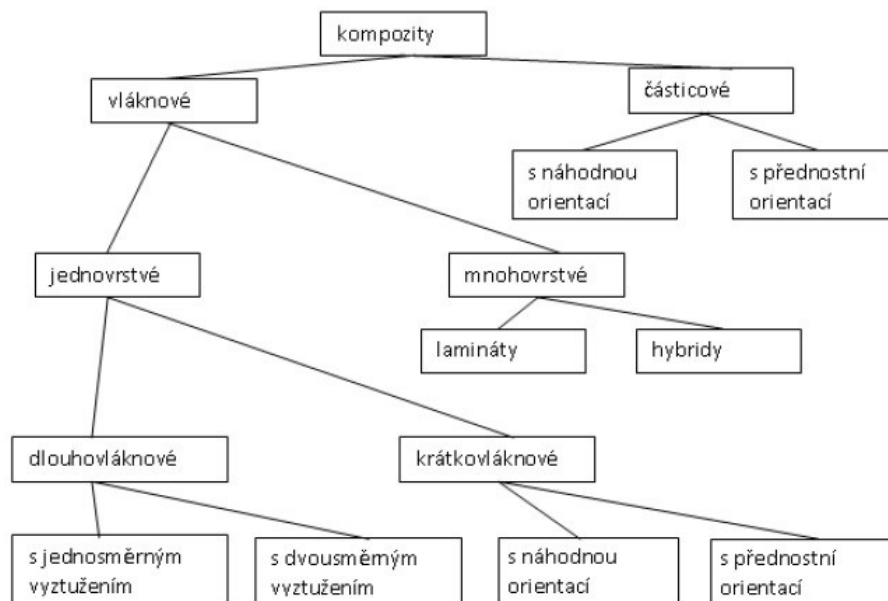
Dělení kompozitů na základě materiálu matrice:

- s kovovou matricí,
- s keramickou matricí,
- s polymerní matricí.

Dělení kompozitů na základě typu výztuže:

- s částicovými plnivými,
- vláknové kompozity,
- laminátové kompozity.

Vláknové kompozity se dále dělí podle typu vlákna na přírodní a syntetické. Kompozity s přírodními vlákny mají biodegradabilní (zelené kompozity) nebo bio nedegradabilní matrici. Mezi přírodní kompozity řadíme hybridní (obsahují více vláken) a textilní kompozity. Obr. 1 znázorňuje klasifikaci kompozitů podle výztuže – plniva [1].



Obr. 1 Klasifikace kompozitu podle geometrie výztuže [1]

1.2 Matrice

Její základní a hlavní úlohou je zajišťování celistvosti kompozitního materiálu. Tímto rozumíme vytvoření vnějšího tvaru a dokonalé spojení nosné části. Vnější tvar zajišťuje řádnou funkci kompozitu. Materiálové vlastnosti matrice a vláken by měly být v souladu. Dojde tím k dosažení optimálních vlastností celého kompozitu. Specifické funkce matrice:

- spojuje vlákna v kompaktní celek,
- zprostředkovává zatížení vláken v místech vnějšího zatížení, v místech přerušení vláken, mezi vlákny u krátkoválnkových kompozitů, mezi vlákny nerovnoměrně zatíženými, přemostuje trhliny ve vláknech,
- vytváří vnější funkční povrch tělesa a estetický vzhled vč. barvy [3]

Další významnou úlohou matrice je chránit vlákna proti oxidaci a korozi. Polymerní matrice můžeme rozdělit na termoplastické a reaktoplastické. Termoplastické materiály při působení tepla měknou a opětovným ochlazením tuhnou. Tyto procesy jsou zpětně vratné a mohou být několikrát opakovány [4]. Reaktoplastické materiály prvně měknou a taví se, následně se, při zahřívání na určitou teplotu, nenávratně vytvrzují a stávají se nerozpustnými a netavitelnými [4].

1.2.1 Termoplastické materiály

Zatímco samotné řetězce drží pohromadě primární kovalentní vazby, jednotlivé makromolekuly jsou vázány sekundárními vazbami. Jejich vzájemné interakce jsou většinou velmi

slabé (Van der Waalsovy síly, vodíkové můstky apod). Tyto vlastnosti řadíme mezi charakteristické znaky termoplastů [4].

Když aktivujeme molekuly teplem, tyto vazby slábnou, materiál měkne a tavi se. Do pevného skupenství tedy přecházejí po zvýšení teploty nad hodnotu charakteristickou pro daný polymer a následném opětovném ochlazení.

Termoplastické polymerní matrice mohou výrazně snížit cenu kompozitu, a to až o 25 – 80 %, oproti reaktoplastickým. Toto je jedním z důvodů, proč jsou v poslední době středem zájmu. Díky snadnější výrobě a možnosti vyrobit i složitější díly dochází právě k tomuto snížení ceny. Mezi další výhody termoplastů patří zdravotní nezávadnost nebo nízká absorpce vlhkosti. Tyto tepelně vodivé materiály jsou obohaceny o vhodná aditiva, která upravují vlastnosti, jako jsou UV stabilizace, odolnost proti ohni nebo barvení. Rozsahy použití termoplastů se odvíjí od tepelné odolnosti matrice [4].

Existuje množství různých termoplastů pro použití v kompozitech, dělíme je do dvou základních skupin. První skupina obsahuje termoplasty, které se běžně používají v průmyslu, např. polyetylen (PE), polypropylen (PP), polyvinylchlorid (PVC), polystyren (PS), polymetylakrylát (PMMA), polyakrylonitrilbutadienstyren (ABS). Druhá skupina obsahuje vysoce odolné termoplasty vyvinuté pro pokročilé aplikace, např. polyéteréterketon (PEEK) nebo termoplastický polyimid [1].

1.2.2 Reaktoplastické materiály

Existuje několik důvodů pro použití reaktoplastů jako matrice místo termoplastů. Jedním z nich je nízká viskozita v nevytvrzeném stavu. Toto může být výhodou v kombinaci s dlouhými, spojitými vlákny, jakožto i u strukturních kompozitů s vysokou pevností a modulem [1]. Reaktoplasty jsou tavitelné a tvarovatelné materiály. Tavitelnost a tvarovatelnost je ale možná pouze nějakou dobu po zahřátí. Během dalšího možného zahřátí (nebo pomocí katalyzátorů) bude docházet k chemickým změnám, při kterých původní molekuly materiálu zesílují. Od tohoto okamžiku se stávají netavitelnými a netvarovatelnými [5]. Chemické reakce způsobující vznik zesíťovaných struktur se nazývají vytvrzování. Vytvrzování je nevratný proces. Vytvrzený materiál potom nejde znovu tvarovat, svařovat a ani převádět do taveniny. Reaktoplasty jsou amorfní polymery. Výrobky z tohoto materiálu jsou chemicky a tepelně odolné, tvrdé a tuhé. V nevytvrzeném stavu se reaktoplasty nazývají pryskyřice, např. fenol-formaldehydová pryskyřice (PF), epoxidová pryskyřice (EP),

polyesterová pryskyřice (UP) apod. Obr. 2 znázorňuje použití termoplastů (a) a reaktoplastů (b) [5].



Obr. 2 Příklady použití termoplastů (a) a reaktoplastů (b) [5]

1.2.3 Elastomerní materiály

Elastomery jsou vysoce pružné a elastické materiály s nízkou tuhostí, které můžeme za běžných podmínek malou silou zdeformovat bez poškození, kdy tato deformace je převážně vratná. Typický představitel elastomerů je kaučuk, z něhož se procesem vulkanizace (řídce zesítnění sírou) vyrábí pryž, což je vysoce pružný materiál, který velmi dobře odolává trvalým deformacím. Pryž je vulkanizovaným elastomerem a je charakterizována příčnými chemickými vazbami mezi makromolekulami. Tyto vazby tvoří uzly prostorové sítě. V důsledku zesíťování ji považujeme za amorfni polymer [5].

Kompozity s elastomerní maticí oproti kompozitům s reaktoplastickou maticí vykazují vyšší rázovou houževnatost a lépe vstřebávají dopadovou energii. Této vlastnosti je využíváno při konstrukcích a optimalizacích kompozitních dílů odolných proti nárazům [1].

1.3 Plnivo

Jsou to látky organického nebo anorganického původu. Používána jsou částicová plniva v podobě prášku nebo částíček velmi malých rozměrů, např. kuličky. Dále jsou používána vlákna různých délek. Tato plniva mají, vzhledem k účinkům na mechanické vlastnosti polymeru, buď vyztužující, nebo nevyztužující charakter. Pro představu se jedná o moučku získanou rozemletím břidlice, kaolinu, křídly nebo dalších levných materiálů, které se používají ve formě prášků [7].

1.3.1 Vlákenná plniva

Tato plniva jsou především používána pro zvýšení rázové houževnatosti polymerů, nebo také dalších mechanických vlastností jako je mez pevnosti nebo modul pružnosti. Mezi

nejdůležitější vyztužující plniva řadíme kratší (do 3 mm) nebo delší (10 – 16 mm) skleněná, kovová, uhlíková, aramidová, minerální, přírodní nebo jiná vlákna. Mezi nejvíce používaná přírodní vlákna patří např. vlákna kokosu, konopí, lnu nebo sisalu [7].

Plniva v kompozitních materiálech jsou obvykle tuhé pevné látky, které se nedají smísit s matricí, v roztaveném i pevném stavu [1]. Největší přínos pro oblast vyztužených polymerních kompozitů jsou z hlediska mechanických vlastností skleněná nebo uhlíková vlákna, která mají nejširší spektrum těchto mechanických vlastností, kromě toho se stávají čím dál tím levnějšími [7].

1.3.2 Částicová plniva

Polymerní materiály jsou používány pro jejich snadnou obměnitelnost při výrobě složitých dílů. Jejich přednostmi jsou, jak je již uvedeno výše, mechanické a fyzikální vlastnosti, např. rázová houževnatost, nízká měrná hmotnost aj. Naopak jejich izolační vlastnosti jsou považovány za nevýhodu, např. pokud je zapotřebí zvýšená tepelná vodivost a elektrická vodivost. Do polymerů ale dokážeme začlenit elektricky vodivé částice. Kovem plněné kompozity jsou ve srovnání s kovy levnější, lehčí, mají lepší odolnost vůči korozi a lépe se vyrábějí. Aby lépe kompozity vyhovovaly požadavkům zákazníka a následné aplikaci, lze kompozit upravit z hlediska hustoty, koeficientu objemové roztažnosti a dalších jiných vlastností. Upravením jedné vlastnosti ale mohou být ovlivněny vlastnosti ostatní. Proto je nutné umět nalézt kompromis mezi požadavky [1].

Existuje několik druhů aplikací kovem plněných polymerů: elektromagnetické stínění, tepelná vodivost, mikrovlnný absorbér, magnet, antistatické výrobky, elektrické topení, termistor nebo chemické senzory. Tepelná vodivost se nejvíce využívá v elektronickém nebo automobilovém průmyslu, např. kryt elektrozařízení, termoplastická hadice, výměníky, autobaterie [1].

2 MAGNETOREOLOGICKÉ MATERIÁLY

Magnetoreologické (MR) materiály se řadí mezi inteligentní materiály, jejichž reologické vlastnosti je možno rychle a opakovaně nastavovat na základě externího magnetického pole [8]. Inteligentní materiály, které mění své fyzikální, a chemické vlastnosti na základě vnějších vlivů můžeme používat pro vytvoření zařízení ovládaného právě magnetickým polem. Magnetoreologické materiály obsahují magnetické částice velikosti mikrometrů, které jsou rozmístěny v nemagnetické matici. Jejich nastavení závisí na magnetické orientaci každé částice, a proto nejvhodnějšího nastavení dosáhneme různou intenzitou externího magnetického pole v závislosti na požadované aplikaci systému. Výhodou je, že jejich vlastnosti můžeme nastavovat ve velmi krátkém čase, a proto tyto materiály nachází stále nové možnosti uplatnění [8].

2.1 Magnetoreologické suspenze

U těchto systémů je nutné rozlišovat jejich chování v aktivovaném a neaktivovaném stavu. Ve stavu neaktivovaném, kdy systém není ovlivněn magnetickým polem, se tento chová podle typických reologických vlastností disperzní tekutiny a částečně by se dal popsat modelem Newtonské kapaliny. Toto chování popisuje rovnice (1) jako chování ideálně viskózní kapaliny [9].

$$\tau = \eta \frac{du}{dx} = \eta \cdot D \quad (1)$$

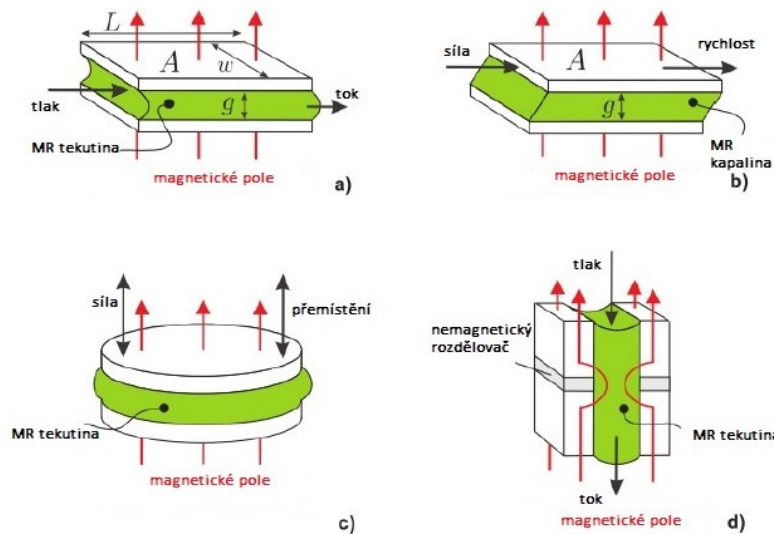
Kde:

η	Pa·s	– dynamická viskozita
D	s ⁻¹	– gradient rychlosti
τ	Pa	– tečné napětí

Dynamická viskozita se vyskytuje u Newtonských kapalin jako konstanta, jejíž hodnota stoupá s rostoucím tlakem a klesá s rostoucí teplotou. Nejdůležitější veličina z hlediska MR suspenzí je gradient rychlosti, který chápeme jako rychlost deformace ve smyku nebo smykový spád. Tyto veličiny jsou aplikovány i pro popis ne-Newtonských kapalin [9].

Módy MR kapalin dělíme na:

- Ventilový (valve mode) – Mezi dvěma rovnoběžnými deskami protéká MR suspenze. Deskami kolmo ve směru toku kapaliny prochází magnetické siločáry. Mechanismus pracuje jako ventil díky seřazení vnitřních částí do sloupcovité struktury a zmenšením silových čar. Tímto jevem vzniká v systému vyšší tuhost, kterou je možno regulovat silou magnetického pole. Popsaný princip je nazýván semi-aktivní regulace a daný mód se používá např. jako MR tlumič [9].
- Smykový (direct shear mode) – Mezi dvěma rovnoběžně umístěnými deskami protéká MR suspenze. Na jednu z desek působí síla boční, čímž se desky vůči sobě pohybují a vzniká smykové napětí. Kolmo k tomuto toku MR suspenze proudí magnetické siločáry a v systému vytváří mez kluzu. S tímto módem je možné se setkat např. u brzd [9].
- Stlačovací tahově/tlakový mód (squeeze mode) – nejméně používaný mód. Magnetoreologická suspenze a magnetické pole fungují stejně jako v předešlých případech. Působící síla přibližuje obě desky k sobě, čímž se ztenčuje vrstva MR suspenze. Posunutí desky závisí na tuhosti systému, podle toho jak je nastavené magnetické pole. Tento mód se využívá např. jako tlumič vibrací s malou amplitudou [9].
- Svírací mód (pinch mode) – Jedná se o nejnovější mód u MR suspenzí. Magnetické pole proudí společně s tokem MR suspenze a tam, kde byla vložena nemagnetická vložka, se rázně mění tok tohoto magnetického pole. Smyslem je zhustit kapalinu kolem stěn a tímto změnit efektivní průměr pro proudění [9].



Obr. 3 Základní módy MR suspenzí: a) ventilový, b) smykový, c) stlačovací, d) svírací [9]

2.2 Magnetoreologické pěny

Pěno-kapalinový přístroj obsahuje MR suspenzi drženou kapilárně v obalu tvořeném ze žínky, pórovitých i hladkých pěn, plstěmi nebo jinými obdobnými látkami. Mezi nejmodernější použití můžeme zařadit kovové pěny [9].

Hlavním úkolem užívání MR pěn je odstranění přebytečných součástí pro utěsnění kapaliny v přístroji, např. těsnicí gumové a ocelové kroužky. V neposlední řadě mezi hlavní úkoly užívání MR pěn je odstranění nutnosti použití přesných výrobních tolerancí a dosažení hladké struktury povrchu [9].

U tlumičů se nejčastěji používají PE pěny s otevřenými póry nasáklé MR suspenzí. Mezi výhody použití MR pěny je úspora MR suspenze. Na příklad v tlumiči mohou být použity pouhé 3 ml MR suspenze. Magnetoreologické pěny nacházejí uplatnění také u brzdových mechanismů, např. v kotoučové brzdě. Další uplatnění nacházejí MR pěny při pohlcování hluku [9].

Rozdělení MR pěn:

- 1) Suché pěny – mají uchycené částice uvnitř struktury.
- 2) Pěny nasáklé MR suspenzí – Nasáknutí je zde pouze částečné. Částečné proto, že je suspenze držena kapilárními silami v pórech pěny, tím dochází k úspoře MR suspenze [9].

2.3 Magnetoreologické elastomery

Magnetoreologické elastomery jsou kompozitní materiály obsahující magnetické plnivo v matici elastomeru schopné měnit své mechanické vlastnosti v závislosti na vnějším magnetickém poli.

Výzkum v oblasti MRE začal už v roce 1985. Přesto první model využití MRE pro nastavitelné tlumiče byl uveden teprve v roce 2001. Tímto uvedením nastalo zvýšení zájmu o oblast MRE. Byla prozkoumána struktura materiálu, začaly se stanovovat základní modely fungování, byly navrženy nové stroje a zařízení, a vylepšil se jejich způsob sestavení s následným prozkoumáním jejich vlastností a možností. Tato zařízení nacházejí uplatnění v leectví, automobilovém průmyslu, strojírenství nebo stavebnictví. V rámci různých konstrukcí zařízení pro tlumení vibrací s obsahem MR elastomerů byly navrženy vibrační tlumiče, vibrační izolátory, adaptivní podstavcové izolátory, silentbloky a v neposlední řadě vrstvené deskové tlumiče.

Tlumiče vibrací, které nazýváme také laditelné tlumiče vibrací, nebo dynamické tlumiče vibrací, nejčastěji tlumí hlavně rotační nerovnováhy, které působí na konstrukce motorů nebo pump [9].

Zásadní vlastnost standardního tlumiče je ta, že dokáže pracovat pouze v určeném intervalu frekvencí. Pokud je tato mez nějakým způsobem překročena, dochází k nesprávnému fungování nebo dokonce ke zvyšování vibrací. Pro tyto aplikace je tedy vhodné, aby si frekvenci nastavovaly automaticky [9].

Matrice u MRE mohou být složeny z velké škály nemagnetických kompozitních materiálů makromolekulární struktury pevného nebo gelového charakteru [10]. V těchto strukturách se stejně jako u MR suspenzí vyskytují částice magnetické, které mohou být rozprostřeny homogenně, tím struktura získává izotropní vlastnosti, a tyto vlastnosti nejsou závislé na směru. Pokud je ale elastomer vystaven externímu magnetickému poli během vytváření nosné struktury, dochází zde k uspořádávání magnetických částic. Tyto částice po vytvrzení struktury zůstanou uzavřené ve svých sloupcovitých polohách. Tímto lze dosáhnout toho, že seřazené elastomery budou mít velmi dobré mechanické, elektrické, magnetické a termální vlastnosti v definovaném směru [10].

Elastomery považujeme za velice komplexní a ucelenou polymerní strukturu tvořící matici, ve které může být rozptýleno několik druhů pevných i kapalných látek. Vliv na reologické a mechanické vlastnosti kompozitu může velmi silně ovlivnit síla interakce mezi plnivem a maticí. Rostoucí koncentrací plniva dochází k poklesu viskoelastického potenciálu elastomeru a následně ke změně podoby na kaučukovou sloučeninu, která po přesáhnutí dané mezní hranice obsahu plniv začne vykazovat tzv. Paynův efekt. Ten se dá definovat jako pokles fázového smykového modulu. Tento modul má závislost na rostoucí amplitudě oscilace, která se zvyšuje s rostoucí koncentrací plniva [10].

Magnetoreologické elastomery mohou být tvořeny i ze tří hlavních složek: nosný viskoelastický polymer, magnetické částice (plnivo), viskózní kapaliny. Mezi viskózní kapaliny můžeme zařadit silikonové oleje, a tyto slouží jako aditivum, které se přimíchává do polymerní struktury. Matrice jsou tvořeny různými druhy kaučuků, např. přírodní kaučuky, silikonové gumičky, pryže a v neposlední řadě syntetické polymery. Matrice by měla vykazovat malou permeabilitu pro lepší uchycení částic. Nejčastěji jsou vyplněny sférickými částicemi. Mezi tyto sférické částice patří železo o velikosti jednotek až stovek mikrometrů [11]. Železo vykazuje velmi dobrou magnetickou saturaci, vysokou permeabilitu, a vykazuje velmi malé zbytkové zmagnetizování. Tyto vlastnosti jsou poskytovatelem silné a

krátkodobé magnetické přitažlivosti částic. Mimo tvaru sférického mohou částice mít tvar tužkový, ploškový nebo jehličkový [10, 11].

Obecně se tedy MRE řadí mezi populární díky jejich unikátním vlastnostem a jejich potenciálu při tlumení vibrací. Právě útlum vibrací se považuje jako vrozená schopnost těchto materiálů, a to díky velkým změnám v modulu a rychlým odezvám v nastavitelnosti (reakční doba), které jsou mnohem nižší než u MR suspenzí [12].

Dalšími výbornými vlastnostmi jsou stabilita, dobrá kompatibilita s mechanickými součástmi a poměrně malá energetická náročnost. Velmi široký rozsah nastavitelností modulů MRE umožňuje efektivnější tlumení vibrací, než tomu bylo u semi-aktivních tlumičů s MR suspenzemi [13].

2.4 Magnetoreologické gely

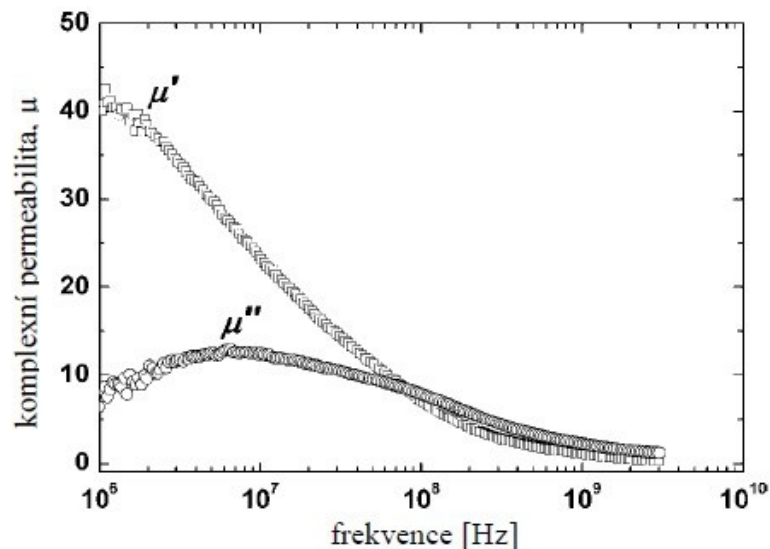
Magnetoreologické gely (MRG) jsou třídou nových magnetoreologických materiálů s měkkými magnetickými částicemi. Tvoří určité rozhraní mezi MR suspenzemi a MR elastomery, kdy opět mohou být jejich reologické a mechanické vlastnosti, jako je prahové napětí, viskozita, dynamické a mechanické vlastnosti, řízeny rychle, kontinuálně a reverzibilně magnetickým polem. Navíc, vzhledem k tomu, že nemagnetická matrice je nahrazena částečně zesíťným polymerním gelem s vysokou viskozitou, u MRG je potlačena sedimentace částic. Magnetoreologické gely mají vyšší relativní MR účinek až o 6000 % ve srovnání s MRE. Tyto vlastnosti umožňují, aby MRG nahradily MR suspenze v určitých aplikacích, např. brzdy, tlumení vibrací, pohony, izolátory, spojky, regulační ventily, magnetoresistory [15].

Tyto aplikace ukazují, že smykové napětí a dynamické mechanické vlastnosti jsou velmi důležité pro konstrukci a praktickou aplikaci MRG zařízení, kde MRG pracují převážně v dynamických režimech [15].

2.5 Magnetická plniva

Nejpoužívanějšími druhy magnetických plniv v MR systémech jsou částice karbonylového železa (CIP), permaloy (slitina Fe+Ni s přísadami Mo, Cu a Cr), alsifer (trojitá eutektická slitina Fe, která dále obsahuje 7-8% Al, a 9-11% Si) a magneticky měkké spinelové a hexagonální ferity [1]. Mezi nejpoužívanější druh patří CIP, které je vyráběno s částicemi o velikosti v řádu mikrometrů, a to tepelným rozkladem pentakarbonyl železa. Mezi důležité vlastnosti CIP patří vysoká magnetizační saturace ($\mu_0 M_s = 2,1 \text{ T}$), magneticky měkké

vlastnosti, snadná dostupnost a v neposlední řadě vysoká počáteční magnetická permeabilita. Hodnota počáteční relativní magnetické permeability CIP při tlaku 1,5 GPa dosahuje cca 40 [1]. Z Obr. 4 je zřejmé magnetické spektrum vzorku CIP (typ SL) získaného stlačením prášku pod velmi vysokým tlakem (1,5 GPa) [1]. Karbonylové železo se vyznačuje širokou rezonancí a nehomogenní strukturou vzorku, což je zřejmé z průběhu komplexní permeability [1].



Obr. 4 Komplexní permeabilita stlačeného vzorku CIP (SL-typ) [1]

Mezi hlavní výhody CIP řadíme možnost změny jeho chemického složení, velikosti částic a tvaru, čímž můžeme získat širokou oblast disperze magnetické permeability v oblasti rádiové frekvence a také v pásmu mikrovln. Karbonylové železo se vyrábí celosvětově, např. ve firmách BASF Corporation, VOGT (Německo), READE, Amidon, Inc. (USA), GAF, INCOMOND (Velká Británie), ONJA (Francie), Labdhi Chemical Industries (Indie) apod. Díky vysokému obsahu železa (97 – 99%) má CIP nízkou chemickou stabilitu, což může být nevýhodou [1].

2.6 Magnetické vlastnosti látek

Charakteristická vlastnost daného prostředí, v němž těleso s nábojem vytváří elektrické pole, je permitivita prostředí. Byla zavedena magnetická charakteristika látky, která byla nazvána permeabilitou, μ . Tato veličina je definována podílem magnetické indukce, B , a intenzitou magnetického pole, H [14].

$$\mu = \frac{B}{H} \quad (2)$$

V případě, že bychom chtěli magnetické látky porovnat, byla zavedena veličina relativní permeabilita μ_r .

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (3)$$

Podle hodnot relativní permeability dělíme látky na:

- Paramagnetické ($\mu_r > 1$),
- Diamagnetické ($\mu_r < 1$),
- Feromagnetické ($\mu_r \gg 1$) – závisí na intenzitě magnetického pole.

Podle Bohrova modelu je každý elektron bodovou částicí, která se pohybuje podle přesně dané trajektorie. Pohyb elektronu vyvolává vznik magnetického pole. Toto magnetické pole se dá popsat veličinou magnetický moment. Magnetický moment je vektorová veličina představující součin proudu procházejícího smyčkou a vektoru plochy. Magnetický moment na jednotku objemu se nazývá magnetizace [14].

2.6.1 Paramagnetické látky

Paramagnetickými látkami nazýváme ty, které zesilují magnetické pole ($\mu_r > 1$). Patří mezi ně například hliník ($\mu_r = 1,000023$), mangan, chrom a platina. Paramagnetické látky, i bez přítomnosti vnějšího magnetického pole, mají magnetický moment různý od nuly.

Je – li tato látka vložena do vnějšího magnetického pole, snaží se magnetické momenty jednotlivých atomů paramagnetika orientovat do směru tohoto pole. Magnetizace paramagnetik je založena na otáčení magnetických momentů atomů do směru působícího magnetického pole. Experimentálně bylo zjištěno, že magnetismus paramagnetických látek je nepřímo úměrný teplotě, tzn., že s klesající teplotou se intenzita magnetického pole zvětšuje [14].

2.6.2 Diamagnetické látky

Diamagnetické látky zeslabují magnetické pole ($\mu_r < 1$). Existuje velmi málo těchto magnetik, ale patří mezi ně všechny inertní plyny, např. He, Ne, Ar, Kr, Xe, Rn, většina organických sloučenin, ale také některé kovy – Cu, Ag, Au, Hg, Bi, a rovněž H_2O . Pokud vložíme diamagnetickou látku do magnetického pole, toto pole nebude působit na nemagnetický atom vcelku, ale začne ovlivňovat pohyb jednotlivých elektronů, které obíhají kolem jádra. Pokud ale vložíme diamagnetikum do vnějšího magnetického pole, začne na obíhají-

cí elektrony v atomech působit další přídavná dostředivá magnetická síla a dochází ke změně úhlové rychlosti elektronu, který je v pohybu [14].

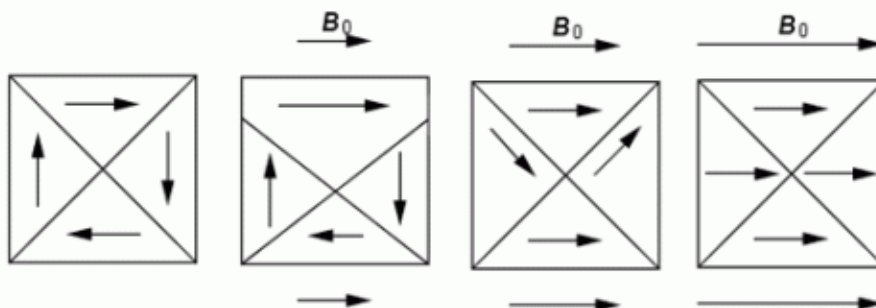
2.6.3 Feromagnetické látky

Díky vysoké μ_r ($10^2 - 10^5$) feromagnetických látek dochází ke značnému zesílení magnetického pole. Feromagnetismus je pozorován u prvků Fe, Co, Ni, Gd a slitin těchto kovů za běžných teplot. Feromagnetismus byl ale zjištěn i u slitin, které feromagnetické prvky neobsahují, např. Heuslerovy slitiny. Jsou to slitiny Mn s Sn, As, Sb, nebo B a Cu. Přitom As, Sb, Bi, a Cu jsou dokonce látky diamagnetické [14].

Feromagnetismus, na rozdíl od diamagnetismu a paramagnetismu, je jev, který závisí na uspořádání atomů v krystalické mřížce. Atomy feromagnetických látek jsou paramagnetické, o čemž svědčí dva jevy. Je-li feromagnetická látka zahřáta na tzv. Curieovu teplotu, ztrácí skokově svoje feromagnetické vlastnosti a stává se paramagnetickou. Při teplotách kolem $600\text{ }^\circ\text{C}$ se značně porušuje uspořádání atomů v krystalické mřížce [14].

Feromagnetické látky se pyšní doménovou strukturou. Jsou to mikro oblasti ve feromagnetiku vyznačující se spontánní magnetizací ve shodném směru. Pokud tato látka není vložena do vnějšího magnetického pole, jsou směry magnetických momentů v každé doméně jiné. Výsledek jejich součtu je nulový a feromagnetická látka se navenek jeví jako nemagnetická [14].

Když se zvětšuje vnější magnetická indukce (Obr. 5), vektory se v jednotlivých místech natočí do směru vnějšího magnetického pole. Stav nasycení nastává v momentě, kdy všechny vektory vnitřní magnetizace jsou natočeny do směru vnějšího magnetického pole [14].



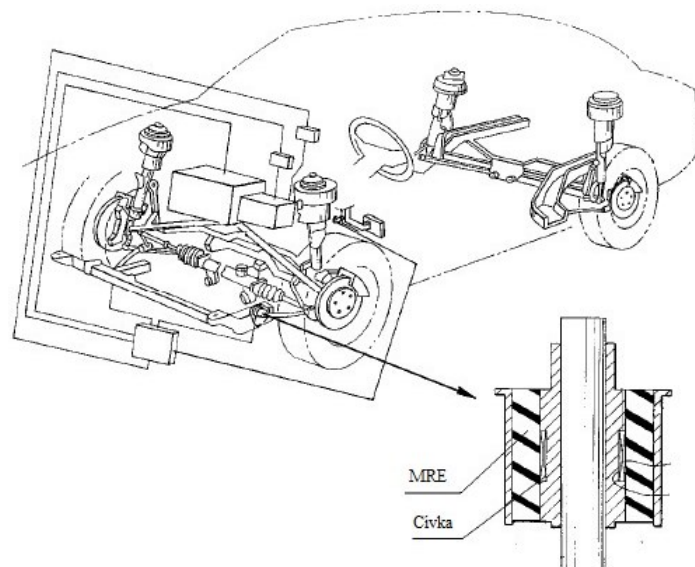
Obr. 5 Natáčení vektoru vnitřní magnetizace, když jsou vloženy do vnějšího magnetického pole [14]

3 APLIKACE MAGNETOREOLOGICKÝCH ELASTOMERŮ

Magnetoreologické elastomery jsou nadějnými materiály pro aplikaci v zařízeních umožňujících změny v tuhosti systému, např. adaptivní laděný tlumič vibrací (ATVA), držáky, závěsy s nastavitelnou tuhostí, povrchy s proměnnou impedancí apod. [1].

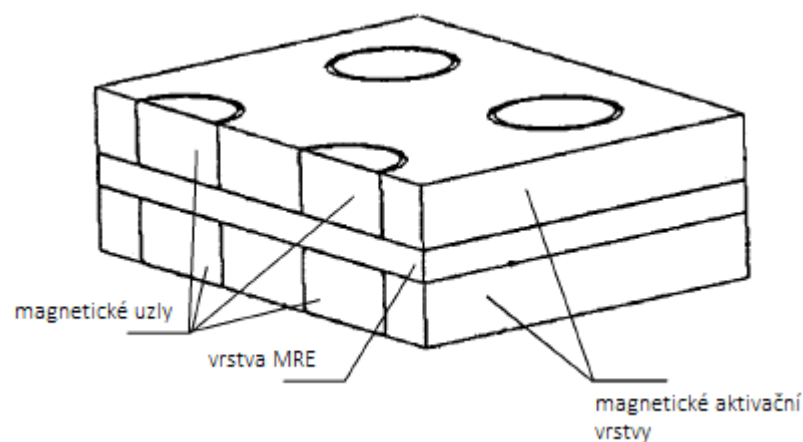
3.1 Adaptivní laděné tlumiče vibrací

Magnetoreologické elastomery umožňují jednoduchou variabilní tuhost zařízení. Průkopnická aplikace MRE byla prezentována v automobilovém průmyslu. Na Obr. 6 je znázorněn nový způsob závěsného pouzdra s MRE. Snižuje otřesy, které způsobují zvýšený hluk, vibrace a tvrdost řízení. Tyto problémy řeší tím, že kontroluje relativní posunutí podélného závěsného členu vzhledem k podvozku motorového vozidla. Ovládací metodou je komunikace brzdícího signálu z brzdy s řídicím modulem závěsu, poté ze signálu brzdy vyhodnotí požadovanou tuhost závěsného pouzdra a generuje elektrický signál. Tento signál je přenášen na elektrickou cívku, která je spojena s MRE. Tímto se generuje magnetické pole tak, aby se změnila charakteristika tuhosti MRE. Jak je znázorněno na Obr. 6, zařízení obsahuje závěsný pouzdrový hřídel, vnitřní ocelový válec prstencově obklopující hřídel závěsného pouzdra, MRE prstencově obklopující hřídel závěsného pouzdra, MRE prstencově obklopující anulární vnitřní ocelový válec a vnější ocelový válec, který prstencovitě obklopuje prstencový MRE. Prstencová cívka je uspořádána kolem vnější obvodové části prstencové vnitřní oceli. Cívka je uzpůsobena tak, aby byla elektricky spojena s elektrickým systémem vozidla pomocí vhodných elektrických kabelů [16].



Obr. 6 MRE závěsné pouzdro [16]

V oblasti MRE bylo mimo jiné vyvinuto také zařízení, které je použito pro izolaci vibrací změnou paměťových a ztrátových modulů jedné nebo více vrstev MRE. Na Obr. 7 je znázorněno vložení těchto magnetických aktivačních vrstev, které obsahují magnetické uzly řídící magnetické pole a tím i tuhost MRE. Proud a napětí dodávané elektromagnetům ovlivňují sílu magnetického pole v MRE a zároveň tuhost MRE. Proud a napětí jsou dány externím zdrojem vibrací a souvisejících sil přenesených na MRE. Tento systém dokáže detekovat, měřit a signalizovat jeden nebo více projevů sil a přeměnit tento signál na příslušný proud a napětí, které se odesílají do magnetu. Zařízení s MRE se používají pro izolaci vibrací a náhodných rázů mechanických systémů [16].

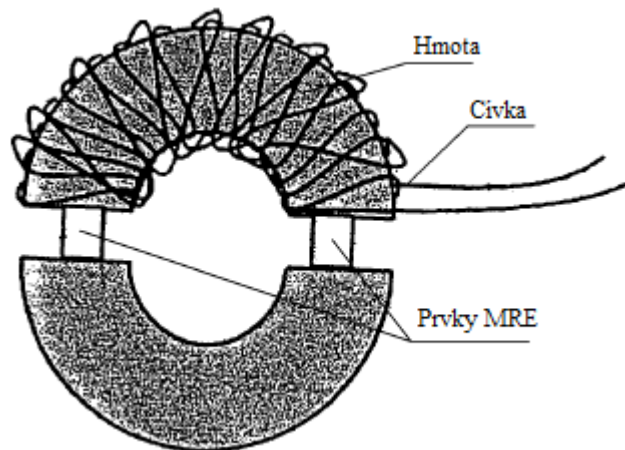


Obr. 7 Zařízení MRE pro izolaci rázů [16]

Na Obr. 7 je znázorněno MRE zařízení pro tlumení rázů. MRE lze použít jako inteligentní pružinu v dynamickém tlumiči vibrací [16].

3.2 Adaptivní vibrační absorbér

Poměrně nedávno byl také představen adaptivní vibrační absorbér (AVA) pracující s MRE. Jak je znázorněno na Obr. 8, AVA je navržen tak, aby fungoval selektivně přes rozsah několika frekvencí, ne jen jedné. Je konfigurován z několika prvků – základní hmoty a absorpční hmoty spojené MRE materiálem. Tato kombinace funguje efektivně jako laditelné pružiny a je zodpovědná za výhodné zvýšení pásma pro potlačení vibrací pomocí AVA [16]. Konfigurace a složení těchto prvků AVA poskytují cestu pro magnetický tok, který je indukovan zdroj magnetického pole. Magnetický obvod prochází právě MRE. Když zdroj poskytuje magnetické pole a tok proudí přes popsany magnetický obvod, změní se vlastnosti MRE a způsobí přirozenou frekvenční změnu systému [16].



Obr. 8 AVA obsahující MRE prvky [16]

Tato změna může být řízena podle potřeby prostřednictvím řídicího algoritmu aplikovaného prostřednictvím procesoru. Bylo představeno několik různých aplikací, např. absorbéry MRE pracující v režimu komprese nebo ve smykovém režimu. Doposud získané výsledky naznačují, že frekvence vibrací absorbéru lze naladit v širokém frekvenčním rozsahu a řízené frekvenční pásmo tímto lze rozšířit [16].

3.3 Snímače síly na bázi magnetoreologických elastomerů

Díky jejich citlivému chování na magnetickém poli jsou MRE považovány za ideální materiály pro snímače a pohony. V příkladové studii byl například popsán způsob převodního zařízení mezi posunem a silou působící na elastomerní MRE tělo. Obsahuje dva konstrukční členy s MRE mezi nimi. K získání dat je k dispozici modul aplikující hnací signál na elektrodu umístěnou ve vrstvě MRE a prostřednictvím této elektrody je sledován elektrický stav MRE [16]. Modul generuje výstupní signál odpovídající změně výchozího elektrického stavu způsobené odchylkami MRE. Tyto snímače zvyšují užitečnost konvenčních elastomerních prvků tak, aby sloužily jako měniče, izolátory nebo otočné spoje. Tato kombinace funkcí snižuje složitost dílů a sestav [16].

4 MAGNETOREOLOGICKÝ EFEKT

Při interakci mezi magneticky polarizovatelnými částicemi a vnějším stejnosměrným magnetickým polem nastává u MR systémů tzv. MR efekt. Pokud na dispergované částice nepůsobí magnetické pole a jejich magnetické dipólové momenty jsou orientovány zcela nahodile a disperzním prostředím je kapalné skupenství, pohybují se Brownovým pohybem. Tato MR suspenze je charakterizována Newtonským chováním. Shlukování dispergovaných částic do řetězcových útvarů skrze nosnou kapalinu způsobují mezičásticové přitažlivé síly, které jsou vyvolány tvorbou magnetických dipólů a magnetickou polarizací. Rovnoběžného seřazení částic do sloupců orientovaných ve směru působení pole lze dosáhnout zvyšováním intenzity magnetického pole, čímž může být dosaženo výrazného zvýšení prahového napětí a viskozity. Magnetickým polem zformované vnitřní struktury musí být odolné proti vlivu oscilačních, tahových a smykových sil, díky čemuž jsou MR suspenze účinné v reálných zařízeních. Důležitým faktorem je čas přechodu mezi stavy, ideálně 1 – 10 ms [18, 21, 22].

4.1 Faktory ovlivňující magnetoreologický efekt

4.1.1 Teplota

Tepelné změny mají zásadní vliv jak na reologické, tak i na magnetické vlastnosti MR systémů [25]. Pro snadnější pochopení budou dále diskutovány MR suspenze. Se zvyšující se teplotou se snižuje viskozita (látka lépe teče). Z důvodu zvýšené střední rychlosti molekul se čas potřebný k interakci, za zvyšující se teploty, snižuje. Pro makroskopické měřítko to znamená, že je potřeba menší síly pro zajištění toku kapaliny. Dá se uplatnit empirický exponenciální vztah [25]:

$$\eta = \eta_0 \cdot \exp(-bT) \quad (4)$$

kde:

η_0 a b jsou empirické konstanty.

Jak je patrné, změna teploty může mít zásadní vliv na výsledek určitého experimentu (přítomnost teploty v exponentu). Proto je kladen velký důraz na udržování konstantních teplot. Vhodným empirickým modelem pro vliv teploty na magnetické vlastnosti materiálů je rovnice (5) [25].

$$M = M_s \cdot \left(\frac{1}{\tan h(m\mu_0 H k T)} - \frac{1}{m\mu_0 H k T} \right) \quad (5)$$

kde:

M_s magnetická saturace,

μ_0 permeabilita vakua,

H intenzita magnetického pole,

k Boltzmanova konstanta,

T termodynamická teplota [25].

4.1.2 Velikost a koncentrace částic

Koncentrace pevných částic hraje velmi důležitou roli při hodnocení MR efektu. Hlavním úkolem v systému je docílit optimálního podílu částic ideálně reagujícím na magnetické pole. Koncentrace, která je pro systém optimální, je mezi 20 – 40 % magnetických částic celkového objemu [23]. Koncentrace menší než 15 % objemu způsobuje tvorbu nedostatečně pevné struktury, která je méně odolná proti působícím silám. Koncentrace vyšší než 40 % objemu způsobuje růst viskozity systému bez aplikace vnějšího stejnosměrného magnetického pole snižující ve výsledku celkovou účinnost systému. Velikost částic by měla být ideálně 0,5 – 10 μm . Důsledkem této velikosti částic dochází k překonávání Brownova pohybu a zároveň zabránění výrazně sedimentace částic. Menší částice v suspenzi snižují smykové napětí. Při zvyšování podílu jemných částic oproti hrubějším, dochází ke snižování viskozity ve stavu neaktivovaném [16, 24].

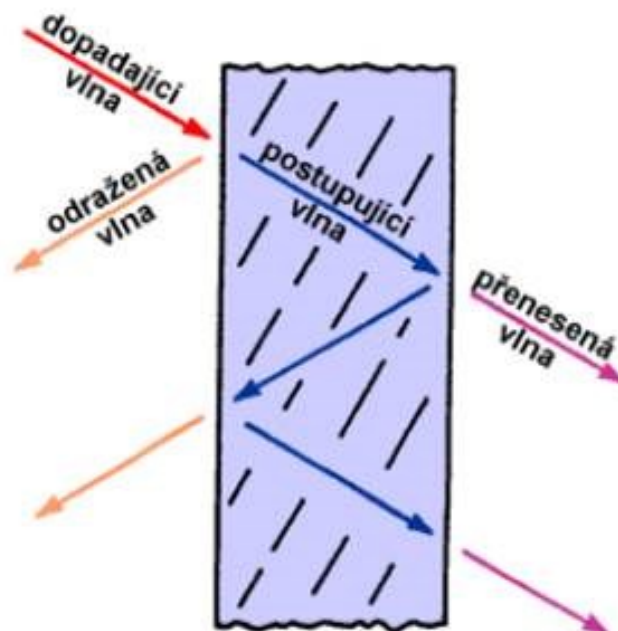
5 ELEKTROMAGNETICKÉ STÍNĚNÍ

Intenzitu stínění elektromagnetického vlnění lze určit tzv. koeficientem stínění KS . Prakticky je používána míra koeficientu nazývaná se efektivnost nebo účinnost stínění (útlum stínění) [19]. Účinnost stínění stínicí desky, na kterou dopadá kolmo rovinná elektromagnetická vlna putující ve směru osy z , se stanoví z rozborů energií elektromagnetického vlnění [19]. Nejhorší případ, který může nastat z hlediska stínění, je ten, kdy vlna dopadá kolmo na kovovou plochu. Když vlna dopadne v jiném úhlu, je tato vlna, která prochází stínicí přepážkou, menší. Určení efektivnosti stínění znamená stanovení složky elektromagnetické vlny. Tato vlna proniká do stíněné oblasti, kdy jsou známy velikost a parametry stínicí přepážky a parametry okolního prostředí [19].

Rozbor účinnosti stínění závisí na:

- útlumu odrazem, který vzniká vlivem částečného odrazu energie vlny na impedance rozhraní mezi vzduchem a kovovou stěnou přepážky,
- absorpční útlum vzniká při pohlcení části energie elektromagnetické vlny, když prochází stínicí přepážkou.

Na rozhraní mezi prostředím a přepážkou dochází k útlumu vlivem mnohonásobných odrazů (Obr. 9) [19].



Obr. 9 Stínicí účinky a jejich rozhraní [19]

Index výkonnosti stínění

Stínění je vyjádřeno v decibelech [dB]. Hodnota vyjadřuje stupeň oslabení elektromagnetické vlny. Poměr mezi intenzitou elektromagnetického pole před stíněním a intenzitou stínění (útlum) je vyjádřen v log [17].

$$\text{Stínící výkon (dB)} = 20 \cdot \log \quad (6)$$

5.1 Celková účinnost stínění

Elektromagnetická účinnost stínění (SE – shielding efficiency) je parametr, který popisuje schopnost daného materiálu omezit průchodu vysokofrekvenčního signálu přes bariéru [31]. Útlum odrazem a absorpční útlum přepážky jsou nejdůležitějšími pro určení celkové účinnosti stínění [19]. Stejně důležitá, pro určení celkové účinnosti stínění, je vzdálenost elektromagnetického pole, kdy vlna vykazuje v prostoru konstantní charakteristickou impedanci. Se vzdáleností zdroje vlnění od stínící plochy se silně mění i účinek stínění [19].

Je rozeznáváno [19]:

- blízké elektrické pole,
- blízké magnetické pole.

5.1.1 Vlivy na celkovou účinnost stínění

Vliv na celkovou účinnost stínění mohou mít: otvory a technologické netěsnosti [20]. Stínící kryt musí, mimo zajištění požadované účinnosti stínění, splňovat i další technické požadavky, které jsou důležité pro chod celého zařízení:

- správný tepelný režim
- technologičnost konstrukce
- opravitelnost zařízení
- přístup ke vstupům a výstupům

Tyto funkce nelze zajistit tak, aby se nenarušila kompaktnost, celistvost a homogenita kovové stínící plochy. Každý stínící kryt obsahuje nepravidelnosti, netěsnosti a přerušování. Do značné míry se tímto mění jeho skutečná účinnost stínění. Rozlišujeme tři druhy nehomogenit v kovovém stínění [20]:

- otvory, štěrby a jiné otevření stínící plochy,
- špatně vodivé, vysokoimpedanční, části stínění.

Na výslednou účinnost stínění kovových krytů tedy mají otvory ve stínící ploše výrazný vliv. Jakýkoli malý otvor v tenké kovové přepážce, na kterou dopadá elektromagnetická vlna, se vůči stíněnému prostoru chová jako anténa. Tímto dochází ke zhoršení účinnosti stínění přepážky [20].

Skutečné hodnoty stínění reálných krytů jsou mnohem nižší než ty teoretické (Tab. 2) [20].

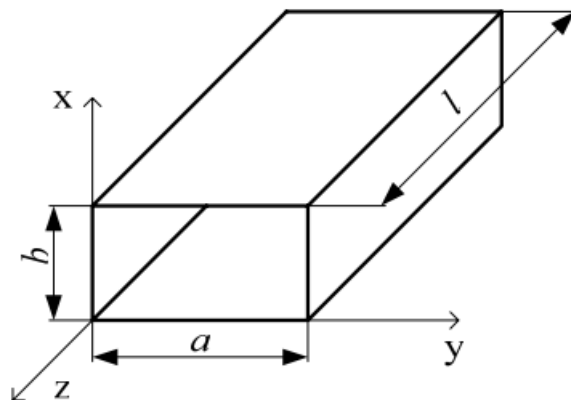
Tab. 1 Účinnost stínění [20]

Účinnost stínění [dB]	Kategorie – hodnocení
0 ÷ 10	Nedostatečné stínění.
10 ÷ 30	Stínění pro minimální požadavky.
30 ÷ 60	Stínění dostačující pro většinu běžných požadavků.
60 ÷ 90	Velmi dobré stínění.
90 ÷ 120	Vysoce kvalitní stínění.

Použití MRE systémů je cesta, kterou je možné negativa jinak velmi efektivních stínících materiálů částečně vyřešit [20].

5.1.2 Vlnovod

Vlnovod je dielektrické těleso, které má plášť z dobře vodivého materiálu. Dokonalá vodivost zabezpečuje nulové tepelné ztráty [27].



Obr. 10 Obdélníkový vlnovod [27]

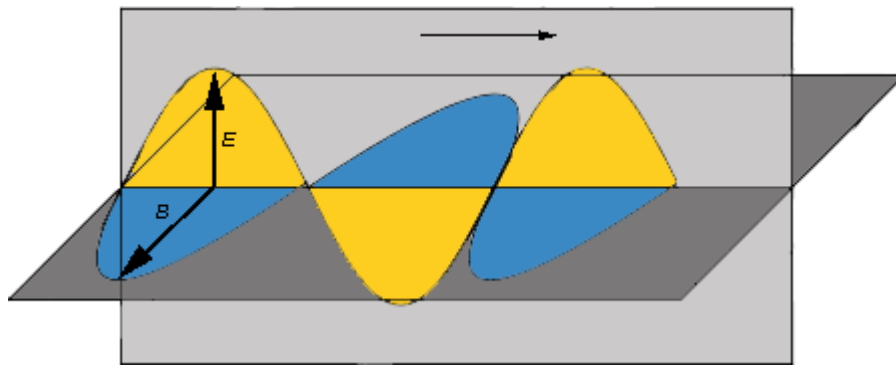
Hlavní roli pro šíření vlny ve vlnovodu je směr v podélné ose (v ose z, viz Obr. 10), která představuje podélnou složku pole a příčné složky pole (v osách x a y) [27].

U obdélníkového vlnovodu, pro jehož parametry platí $a \geq b$ (viz Obr. 11), je možno, díky nezávislosti rovnic, rozdělit vlny na transverzálně elektrické a transverzálně magnetické [27].

$$\Psi_{TE(n,m)} = \cos \frac{n\pi x}{a} \cos \frac{m\pi y}{b} \quad (7)$$

5.2 Elektromagnetické vlnění

V případě změny elektrického pole se tvoří magnetické pole. Jeho indukční čáry jsou vždy uzavřené a kolmé k siločarám elektrického pole. V případě změny magnetického pole vzniká elektrické pole. Siločáry elektrického pole jsou uzavřené a kolmé k indukčním čarám magnetického pole. Takto periodicky střídající se elektrické a magnetické pole tvoří jedno fyzikální pole a je nazýváno elektromagnetické pole [26].



Obr. 11 Schematické znázornění elektromagnetických vln [26]

Elektromagnetické pole, stejně jako jiná pole, má energii, která se šíří prostorem v podobě vlnění. Ve stejnorodém prostředí mají elektromagnetické vlny kulový tvar. Na rozdíl od mechanického vlnění nepotřebuje elektromagnetické vlnění ke svému šíření žádné látkové prostředí a šíří se tedy i vakuem [26].

Bylo dokázáno, že elektromagnetické vlny se odráží i lámou. Odrazu elektromagnetických vln např. na kovové desce se využívá při radiolokaci. Jednotlivé druhy elektromagnetického záření se liší vlnovou délkou a tvoří spektrum elektromagnetického záření [26].

Tab. 2 Druhy elektromagnetického záření, jejich vlnové délky a frekvence [26]

Elektromagnetické záření	Vlnová délka ve vzduchu	Frekvence [Hz]
Rádiové záření	30 km – 1 m	$3,8 \cdot 10^{14} - 7,7 \cdot 10^{14}$
Mikrovlny	1 m – 0,03 mm	$3 \cdot 10^8 - 10^{13}$
Infračervené záření	0,3 mm – 790 nm	$10^{12} - 3,8 \cdot 10^{14}$
Světlo	790 nm - 390 nm	$3,8 \cdot 10^{14} - 7,7 \cdot 10^{14}$
UV záření	400 nm – 10 nm	$7,7 \cdot 10^{14} - 3 \cdot 10^{16}$
Rentgenové záření	10 nm – 1 pm	$3 \cdot 10^{16} - 3 \cdot 10^{20}$
Záření Gamma	< 300 pm	$> 10^{18}$

Mezi jednotlivými druhy elektromagnetického záření nejsou ostré hranice. Přejechy mezi nimi jsou plynulé, nebo se oblasti jednotlivých druhů záření překrývají. Každý druh elektromagnetického záření má své charakteristické vlastnosti [26].

6 SHRUTÍ TEORETICKÉ ČÁSTI

První kapitola teoretické části se zabývá kompozitními materiály, mezi které patří termoplastické, reaktoplastické a elastomerní materiály. Popsána byla dále nejčastější dělení plniva a matrice.

Druhá kapitola byla zaměřena na magnetoreologické materiály, mezi které patří magnetoreologické pěny, suspenze, gely a elastomery. Byla popsána také magnetická plniva, magnetické vlastnosti látek.

Třetí kapitola se zabývá aplikací magnetoreologických elastomerů, např. adaptivní tlumič vibrací, adaptivní vibrační absorbér nebo snímače síly na bázi magnetoreologických elastomerů.

Čtvrtá kapitola se zabývá magnetoreologickým efektem, faktory ovlivňujícími magnetoreologický efekt, jako např. teplota, velikost a koncentrace částic.

Pátá, závěrečná, kapitola obsahuje téma elektromagnetického stínění, je zde popsán index výkonnosti stínění, celková účinnost stínění a vliv na celkovou účinnost stínění. Dále je popsán vlnovod, který byl použit při měření v praktické části a v neposlední řadě je zde popsáno obecně elektromagnetické vlnění.

II. PRAKTICKÁ ČÁST

7 CÍLE PRÁCE

Podle zadání diplomové práce byly stanoveny následující cíle:

- Příprava magnetoreologických elastomerů o různé koncentraci magnetického plniva
- Analýza elektromagnetického stínění pomocí měření ve vlnovodech
- Vyhodnocení a srovnání získaných výsledků

8 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

8.1 Materiály

Praktická část diplomové práce se zabývá MR kompozitem tvořeným silikonovým elastomerem plněným kovovými částicemi Hogānas ASC 200, kdy z těchto komponent bylo následně připraveno 5 vzorků kompozitu, u nichž byl zkoumán právě vliv koncentrace magnetického plniva na radioabsorpční schopnosti vzorků za využití měření pomocí vlnodů v mikrovlnné oblasti.

8.2 Matrice

Jako matrice pro přípravu MRE byl použit silikonový elastomer pod obchodním názvem Tekutý silikon ZA 22 – BLUE od výrobce HAVEL Composites. Jedná se o dvousložkový systém (základ a katalyzátor), kdy vybrané vlastnosti jsou uvedeny v Tab. 3.

Tab. 3 Vlastnosti Tekutého silikonu ZA 22 – BLUE [28]

Směšovací poměr	1:1
Viskozita nekatalyzované směsi	4000 ± 300 cP
Doba mísení při 23°C	1 min
Doba zpracování při 23°C	WT = 14 – 17 min
Tvrdość Shore A po 24 hod	21 ± 2 shA
Pevnost v přetržení	3,0 ± 0,2 N/mm ²
Protažení při přetržení	380 ± 20%
Pevnost v roztržení (DIE B)	>20 ± 1 N/mm
Reprodukovatelnost detailů	2 mikrony
Změna rozměrů po 24 hod	-0,05%

Mezi základní přednosti zvolené matrice silikonu patří [28]:

- vysoká chemická odolnost vůči agresivním komponentům některých pryskyřic,
- extrémně vysoká pevnost v roztržení (tato vlastnost zaručuje vysokou odolnost proti opotřebení a natržení),
- vysoká přesnost při reprodukci i velmi drobných detailů,
- vysoká dlouhodobá rozměrová stálost a nedeformovatelnost,

- vynikající odolnost vůči vysokým teplotám a stárnutí,
- výborný separační efekt (nelepivost).

Praktické aplikace zvoleného typu silikonu pro přípravu MRE vzorků [28]:

- vytváření forem a modelů (díky své kopírovací přesnosti, vysoké rozměrové stálosti a vysoké mechanické pevnosti),
- Keramické umělecké formy a betonové formy (pro svou výbornou reprodukční přesnost a vysokou mechanickou pevnost).

8.3 Tvrdidlo

Jako tvrdidlo pro přípravu MRE byl použit Katalyzátor k ZA 22 od výrobce HAVEL Composites. Jde o tekutý katalyzátor vhodný pro odlévání forem a výrobků.

Tab. 4 Vlastnosti tvrdidla Katalyzátor k ZA 22 [29]

Směšovací poměr	1:1
Doba zpracovatelnosti	15 min
Doba odformování	1 hod
Viskozita	5000 cPs
Tvrdość Shore A po 24 hod	22 shA

8.4 Magnetické mikročástice

Pro přípravu MRE byly použity částice kovového prášku Hogānas ASC 200 od výrobce Hogānas, které v podstatě prvkovým složením odpovídají čistému železu (C < 0,01 %, O = 0,08 %). Distribuce velikosti částic je uvedena v Tab. 5.

Tab. 5 Sítová analýza částic Hogānas ASC 200 [30]

>212 μm	0
150 – 212 μm	7
45 – 150 μm	70
<45 μm	23

8.5 Charakterizace částic

8.5.1 Morfologie částic

Částice plniva byly zkoumány pomocí skenovací elektronové mikroskopie (SEM). Pro zobrazení vzorku, získání představy o velikosti a uspořádání jeho vnitřních struktur, je vhodný skenovací (rastrovací) elektronový mikroskop, který je schopen dosáhnout rozlišení ≤ 0.8 nm při urychlovacím napětí 30 kV [33].

Vysokým napětím (v řádu jednotek až desítek kV) urychlený primární svazek elektronů dopadá na povrch zkoumaného vzorku. V průběhu měření poté dochází k uvolňování elektronů, které snímá detektor. Obraz je poté zvětšen. Za pomoci stínítka je obraz převeden na viditelné záření, které je zaznamenáváno CCD kamerou [33]. Sekundární elektrony (SE) jsou detekovány. Jsou to primárním svazkem excitované elektrony z vnějších slupek atomů. Dále jsou to odražené elektrony (BSE), ovlivněné atomovým jádrem. SE detekce přináší informace o reliéfu vzorku ve velkém rozlišení a s velkou ostrovtí. Detekce těchto odražených elektronů přináší také informace o chemickém složení vzorků. Kompozitní režim je nejpřínosnějším režimem BSE, jsou zde od sebe rozlišeny oblasti s odlišným prvkovým složením. Oblasti s prvky s nízkým protonovým číslem jsou tmavé. Oblasti s prvky s vyšším protonovým číslem jsou světlé [33].

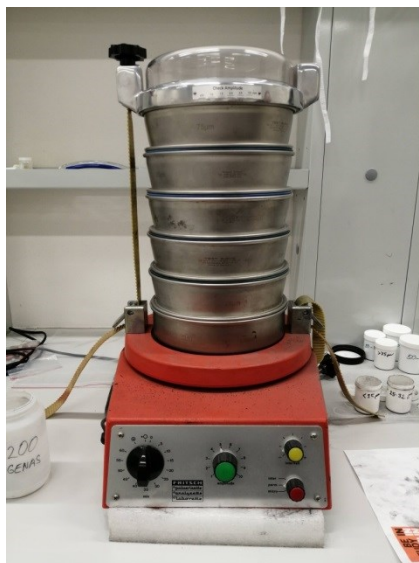
8.5.2 Magnetické vlastnosti

Magnetické vlastnosti částic byly zkoumány pomocí vibračního magnetometru (Lakeshore 7407, USA). Měření probíhalo při pokojové teplotě v magnetickém poli o rozsahu $-800 - 800$ kA·m⁻¹.

8.6 Příprava vzorků kompozitu

Celkem bylo připraveno 5 vzorků kompozitu s izotropní strukturou. Pro každý vzorek byl určen stupeň plnění, a to 5, 10, 15, 20 a 25 obj. %. Bylo použito plnivo Hogānas ASC 200, frakce 32 – 45 μm, silikonový elastomer HAVEL Tekutý silikon ZA 22 – BLUE a tvrdidlo HAVEL Katalyzátor k ZA 22.

Pro získání uvedené frakce velikosti částic z původního vzorku Hogānas ASC 200 (Tab. 4) byly částice vloženy do síťového třídiče firmy FRITSCH.



Obr. 12 Sítovací stroj Fritsch

Navážení a míchání jednotlivých složek směsi probíhalo při běžné pokojové teplotě na analytických vahách. Do třecí misky se navážil pomocí injekční stříkačky silikonový elastomer HAVEL Tekutý silikon ZA 22 – BLUE, následně se k němu přidalo tvrdidlo HAVEL Katalyzátor k ZA 22 v poměru matrice 1:1 dle údajů výrobce. Poté se ke směsi přidal kovový prášek dané frakce dle předem dané koncentrace.

Tab. 6 Navážky jednotlivých komponent pro přípravu vzorků MRE

	Koncentrace [obj. %]	Hogānas	HAVEL Tekutý silikon ZA 22 – BLUE [g]	HAVEL Katalyzátor k ZA 22 [g]
Vzorek č. 1	5	11,644	14,254	14,254
Vzorek č. 2	10	23,039	13,523	13,523
Vzorek č. 3	15	35,197	12,744	12,744
Vzorek č. 4	20	46,630	12,011	12,011
Vzorek č. 5	25	58,017	11,281	11,281

Pro dokonalou homogenizaci směsi byla použita vakuová míchačka od výrobce Renfert. Navážená směs se po dobu 10 minut rozmíchávala ve vakuové míchačce při otáčkách 300 rpm.

Po rozmíchání byla směs odlita do teflonové formy tvaru čtverce o rozměrech 7,2 x 7,2 cm a výšce 2 mm a forma se zajistila svorkami. Forma byla následně umístěna do předem vytemperované sušárny na 180 minut při teplotě 80 °C.



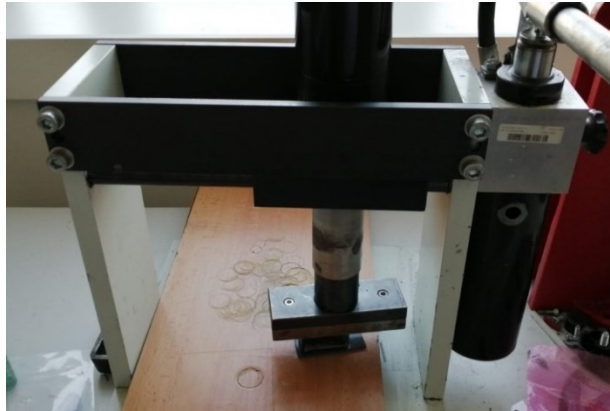
Obr. 13 Vakuová míchačka Renfert

Pro vytvrzení vzorků byla použita vakuová sušárna Memmert s možností nastavitelného tlaku v rozmezí 10 – 1000 mBar pro definovanou kondicionaci vzorku s maximální operační teplotou 200 °C.



Obr. 14 Vakuová sušárna Memmert

Po vytvrzení směsi byly vyseknuty vzorky pomocí hydraulického lisu a vysekávacího nože.



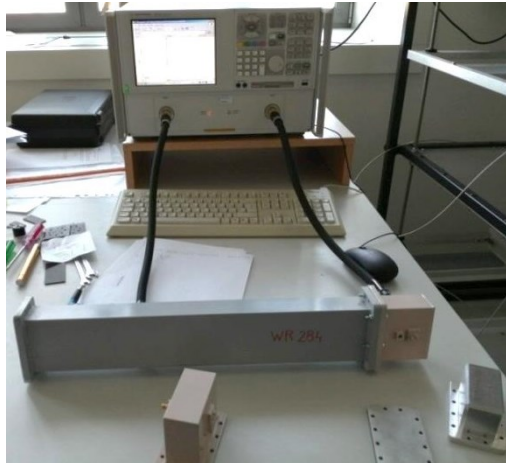
Obr. 15 Hydraulický lis



Obr. 16 Vysekávací nože

8.6.1 Analyzátor PNA

Pro měření průchodu/stínění elektromagnetického vlnění byl použit vektorový síťový analyzátor PNA- L Keysight (Agilent) E8364A s rozsahem 45 MHz – 50 GHz. Před samotným měřením musí být zařízení zkalibrováno.



Obr. 17 Analyzátor PNA-L Keysight

Postup kalibrace byl následující:

- 1) Spustit PNA
- 2) Nastavit kalibrační kit/sadu
- 3) Zvolit měřicí pásmo (WR) ze seznamu obsažených ve .wks souboru a potvrdit *OK*
- 4) Nastavit frekvenční rozsah PNA
- 5) Kalibrace daného pásma
- 6) Vybrat DUT connectors pro dané pásmo
- 7) Zkalibrovat Port 1 – tj. postupně připojovat jednotlivé standardy (Offset short, Short, Load) k vlnovodu – ten je správnou redukcí připojen ke koaxiálnímu kabelu, spojení se musí sešroubovat
- 8) Zkalibrovat Port 2 – ke konci vlnovodu připojit postupně standardy jako v předchozím bodě.
- 9) Přes vlnovod propojit oba Porty
- 10) Dokončit kalibraci tlačítkem *Finish*
- 11) Nyní lze měřit u jednotlivých s -parametrů, s_{ij} (vybrat v rozhraní analyzátoru) velikost (magnitude) a fázový posun (phase [°])

Postup při provádění měření

- 1) Vložit měřený vzorek do vlnovodu tak, aby jeho vnější strana lícovala s rovinou příruby (kalibrační rovinou) a oba porty propojit.
- 2) Provést měření *Sweep* → *Trigger* → *Single*
- 3) Uložit měření ve formátu *CITIfile* (formátovaná data), soubor bude uložen včetně velikosti a fáze pro všechny rozptylové parametry s_{ij} .

Rozptylové parametry s

S – parametr je nezbytný pro popis vysokofrekvenčních obvodů [32].

s_{11} – vstupní koeficient odrazu při výstupu zakončeném přizpůsobenou zátěží

s_{12} – zpětný přenosový koeficient při vstupu zakončeném přizpůsobenou zátěží

s_{21} – přenosový koeficient při výstupu zakončeném přizpůsobenou zátěží

s_{22} – výstupní koeficient odrazu při vstupu zakončeném přizpůsobenou zátěží [32]

$$s_{ij} = 20 \cdot \log \frac{I_1}{I_0} [dB] \quad (8)$$

kde:

I_1 vrácené záření

I_0 vyslané záření

Příklad výpočtu fázového posunu u kalibru posunutý zkrat (Offset short)

$$s_{11}(\text{°}) = 180 - \left(2\beta_{WG} l_{offset} \frac{180}{\pi} \right) \quad (9)$$

kde:

$$\beta_{WG} = \frac{2}{\pi} \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_{middle}}{\lambda_m} \right)^2} \quad (10)$$

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (11)$$

$$\lambda_m = 2W \quad (12)$$

$$l_{offset} = 10,2 \text{ mm} \quad (13)$$

po dosazení:

$$s_{11}(\text{°}) = 180 - 2 \cdot 115,52 \cdot 0,0102 \cdot \frac{180}{\pi} = 44^\circ \quad (14)$$

Offset delay (časové zpoždění) u posunutého zkratu

$$t_{offset} = \frac{l_{offset}}{c} = \frac{0,0102}{3 \cdot 10^8} = 34 \text{ ps} \quad (15)$$

Časové zpoždění vlny se zadává jako pro volný prostor.

Vztah pro skupinové zpoždění ve vlnovodu:

$$t_{offset_WG} = t_{offset} \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_m}\right)^2}} \frac{l_{offset}}{c} = \frac{0,0102}{3 \cdot 10^8} = 34 \text{ ps} \quad (16)$$

8.6.2 Vlnovod

Byly použity vlnovody obdélníkového průřezu v pásmech: WR62, WR90, WR137, WR187 a WR284.



Obr. 18 Vlnovod WR137

8.7 Charakterizace kompozitu

8.7.1 Analýza elektromagnetického stínění připravených kompozitů

Charakteristiky elektromagnetického stínění vzorků kompozitu byly měřeny na vektorovém síťovém analyzátoru PNA - L Keysight (Agilent) E8364A s rozsahem 45 MHz – 50 GHz za využití vlnovodů o různých rozmezech frekvencí v mikrovlnné oblasti.

Tab. 7 Teoreticky vypočtené hodnoty fázového posunu pro jednotlivé vlnovody

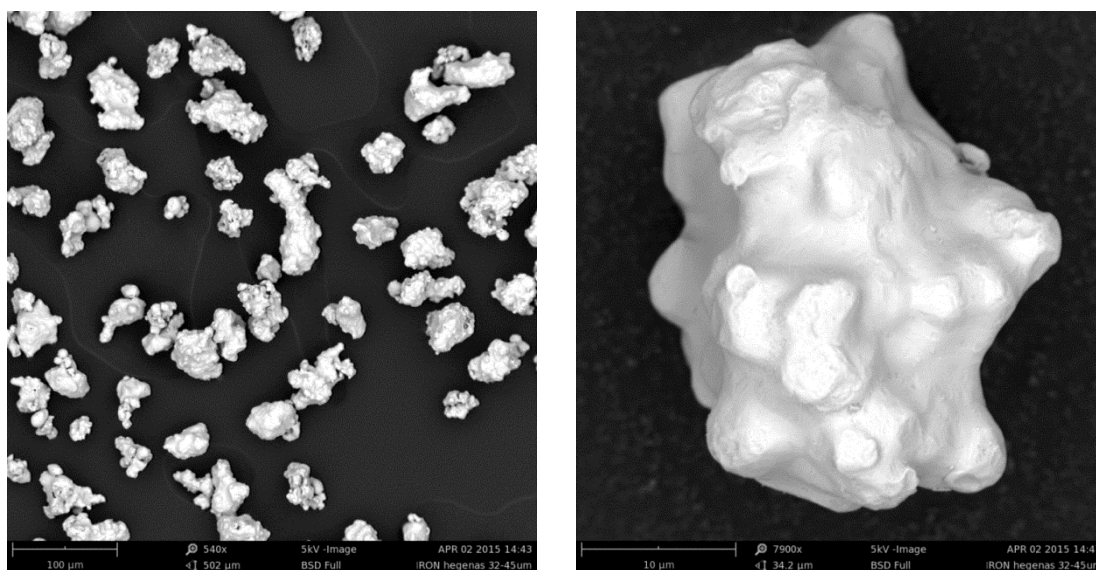
WR	f_{start} [MHz]	f_{stop} [MHz]	f_{cutoff} [MHz]	f_{mean} [MHz]	Šířka [mm]	Výška [mm]
62	12400	18000	9494	15200	15,80	7,90
90	8200	12400	6562	10300	22,86	10,16
137	5850	8200	4304	7025	34,85	15,80
187	3950	5850	3155	4900	47,55	22,15
284	2600	3950	2079	3275	15,80	34,04

9 VÝSLEDKY

9.1 Charakterizace magnetických částic

9.1.1 Morfologie částic

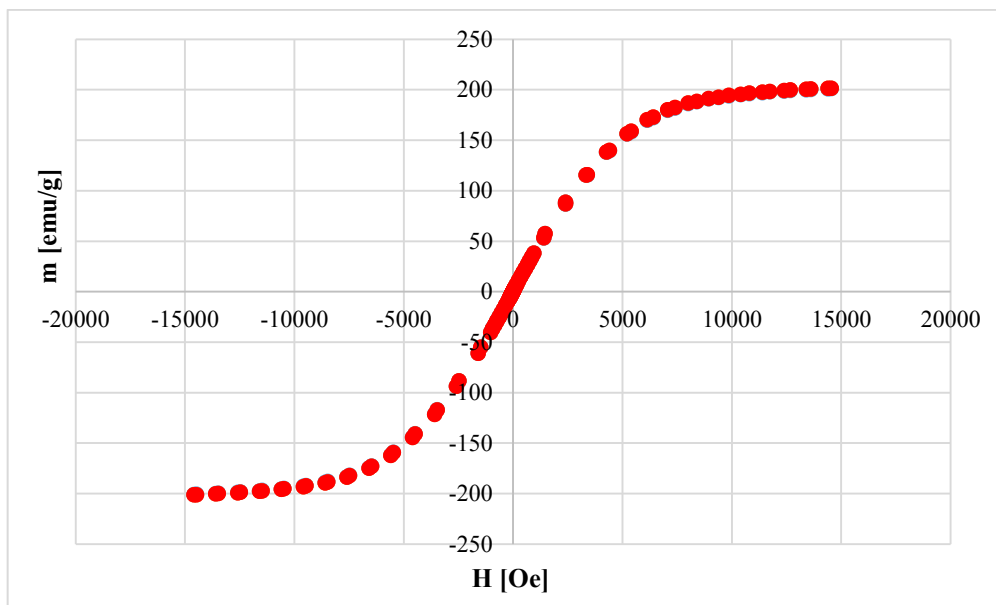
Snímky ze SEM (Obr. 19) potvrzují nepravidelnou morfologii částic Hogānas ASC 200, kdy velikost těchto částic odpovídá rozsahu velikostí zvoleném pro přípravu MRE vzorků, tj. 32 – 45 μm .



Obr. 19 SEM snímky částic Hogānas ASC 200 při různém zvětšení.

9.1.2 Magnetoreometrie

Na Obr. 20 je zobrazena magnetizační křivka částic Hogānas ASC 200 o frakci částic 32 – 45 μm , která byla použita pro přípravu MRE. Jak je patrné, magnetizační saturace částic je dosažena v hodnotě 200 emu/g při intenzitě magnetického pole 15 kOe. Z tvaru magnetizační křivky částic je dále patrné, že tyto vykazují feromagnetický charakter a jsou tedy magneticky měkké.



Obr. 20 Magnetizační křivka částic Hoganas ASC 200 o frakci 32 – 45 μm

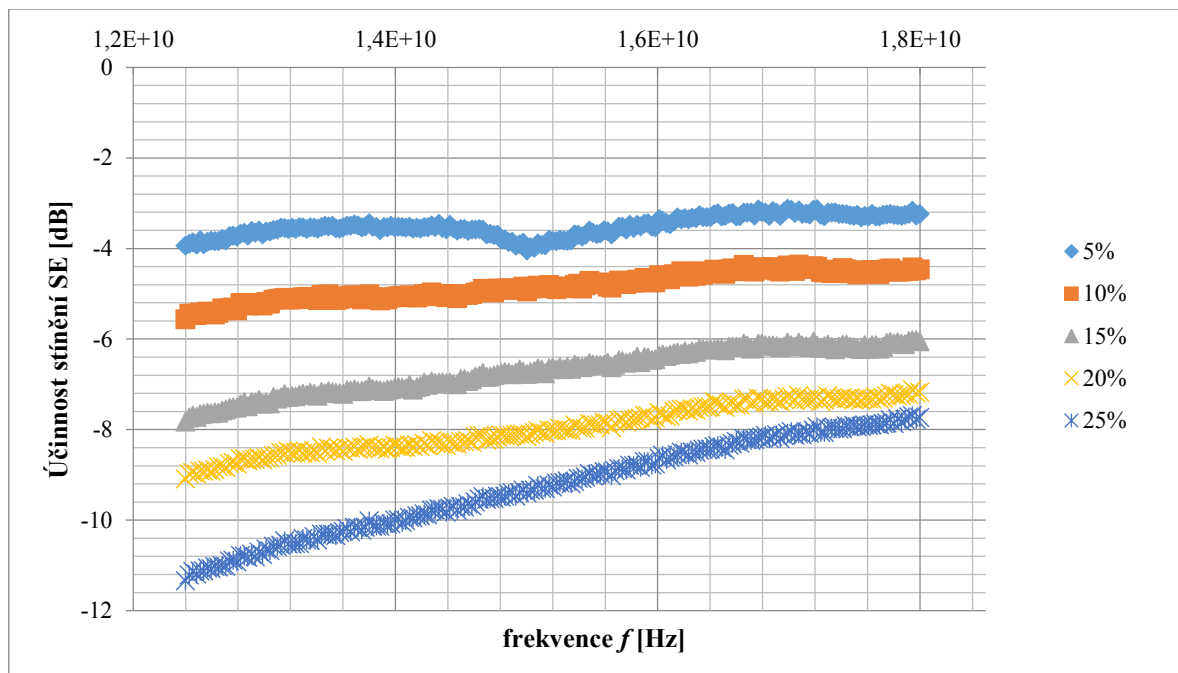
9.2 Měření účinnosti stínění

Z teorie ke stínění elektromagnetického záření uvedené výše je patrné, že určitý vzorek toto záření stíní tím více, čím dosahuje hodnota účinnosti stínění nižších hodnot. V následujících grafech je stínící účinnost vyjádřena pomocí rozptylového parametru S_{21} , kdy tento ve své podstatě charakterizuje množství procházejícího vlnění (T). Principiálně mohou dále nastat situace, kdy je záření uvnitř materiálu absorbováno (A ; přeměněno např. na teplo) nebo odráženo (R). Z pohledu aplikací materiálů, jakožto stínících systémů vůči elektromagnetickému záření, je nezbytné co možná nejvíce potlačit složku odrazovou, kdy všechny uvedené možné situace interference vlnění se vzorkem jsou vzájemně propojeny ve vztahu:

$$R^2 + A^2 + T^2 = 1 \quad (17)$$

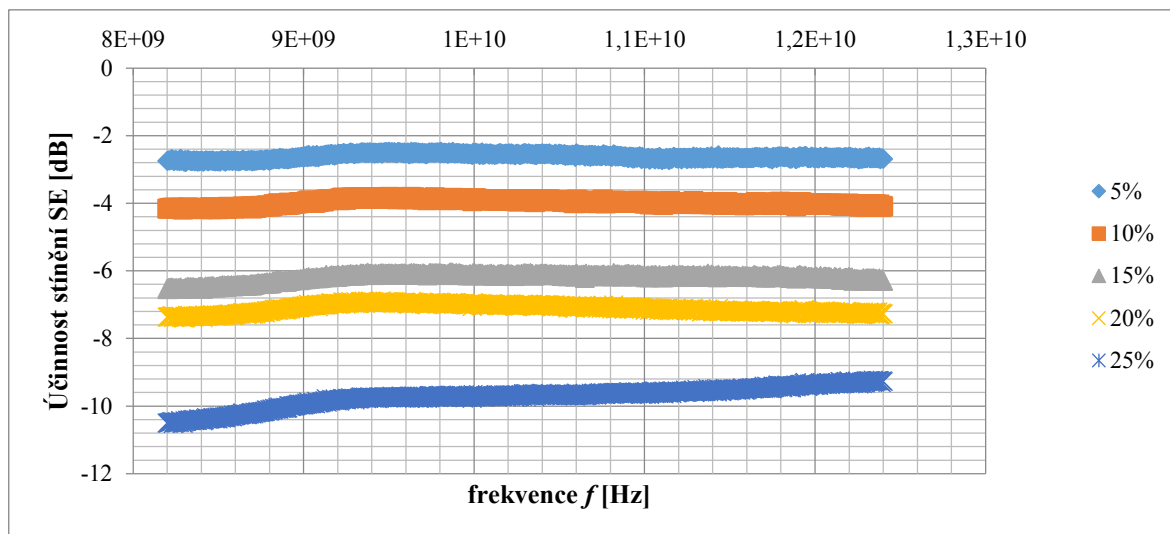
V této práci je tedy vyhodnocováno, jaké množství elektromagnetického vlnění vzorkem prochází při potlačení odrazové složky. Uvedené možnosti interference vlnění se vzorkem a jejich vzájemný poměr jsou závislé na frekvenci interferujícího vlnění a také tloušťce vzorku, kdy tato byla pro všechny měření konstantní a vyhodnocuje se tedy dále pouze vliv frekvence vlnění.

Na Obr. 21 je zobrazen výsledek účinnosti stínění v pásmu 12,4 – 18 GHz (WR62) s koncentracemi MRE vzorků 5 – 25 obj. %. Je patrný nárůst stínící účinnosti s narůstající koncentrací magnetického plniva ve vzorcích MRE, kdy toto plnivo ve vzorcích zvyšuje jak dielektrickou složku, tak také jejich magnetickou permeabilitu, což se právě makroskopicky projevuje potlačením odrazu elektromagnetického vlnění od vzorku vyjádřeného vyšším prostupem vlnění skrze vzorek.



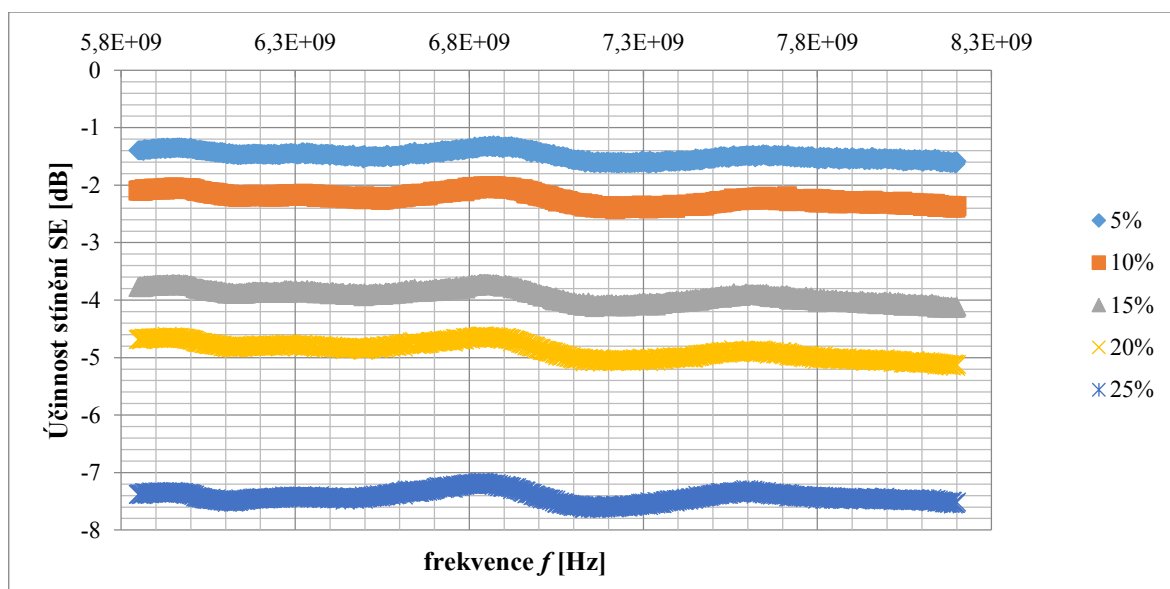
Obr. 21 Závislost účinnosti stínění na frekvenci elektromagnetického záření a koncentraci částic ve vzorku MRE ve frekvenčním pásmu WR62

Na Obr. 22 je zobrazen výsledek účinnosti stínění v pásmu 8,2 – 12,4 GHz (WR90) s koncentracemi MRE vzorků 5 – 25 obj. %. Opět lze pozorovat poměrně značný nárůst stínící účinnosti s narůstající koncentrací částic Hogānas ASC 200 o frakci částic 32 – 45 μm , kdy celková stínící účinnost ovšem klesá v porovnání s daty pro vyšší frekvenční pásmo. Získané hodnoty jsou nicméně stále srovnatelné s běžnými systémy, kdy studované vzorky mají navíc výhodu ve svém elastickém charakteru.



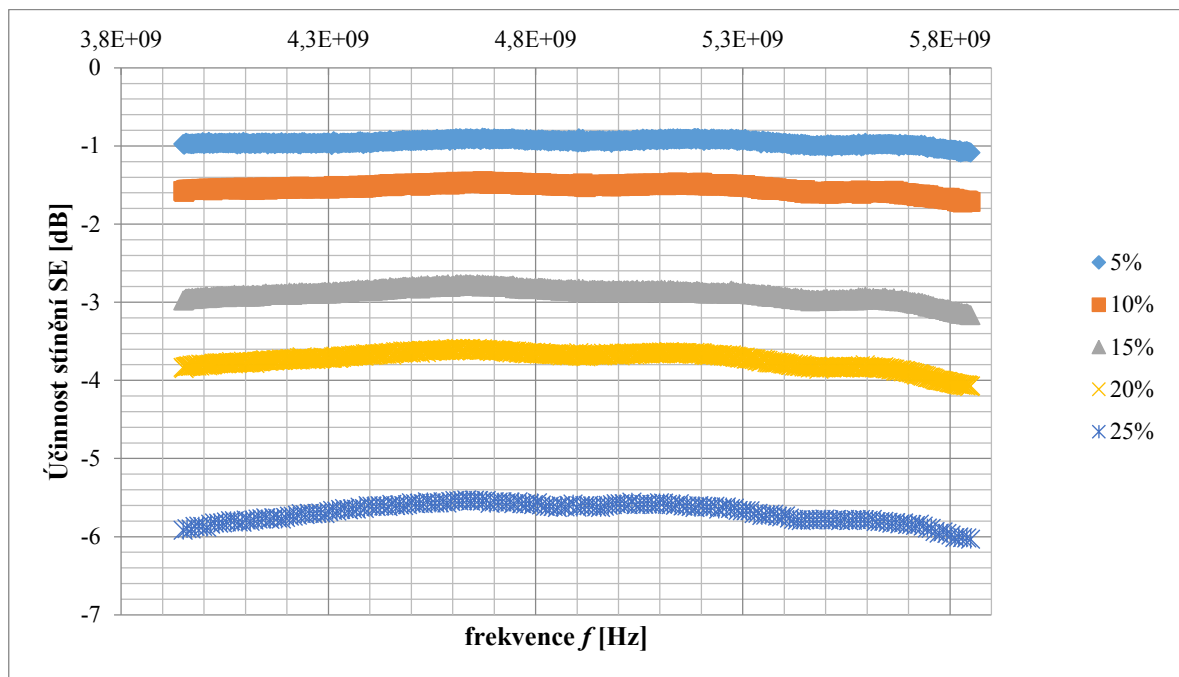
Obr. 22 Závislost účinnosti stínění na frekvenci elektromagnetického záření a koncentraci částic ve vzorku MRE ve frekvenčním pásmu WR90

Na Obr. 23 je zobrazen výsledek účinnosti stínění v pásmu 5,85 – 8,2 GHz (WR137) s koncentracemi MRE vzorků 5 – 25 obj. %. Opět je zde patrný pokles stínící účinnosti v porovnání s vyššími frekvenčními pásmy (Obr. 21 a 22), kdy však i pro nejnižší koncentraci částic Hogānas ASC 200 je stínící účinnost stále vyšší než 90 % pro složku T , kdy zbylou část lze s ohledem na dielektrické a magnetické vlastnosti uvedených částic přisuzovat stále složce A na úkor složky R .



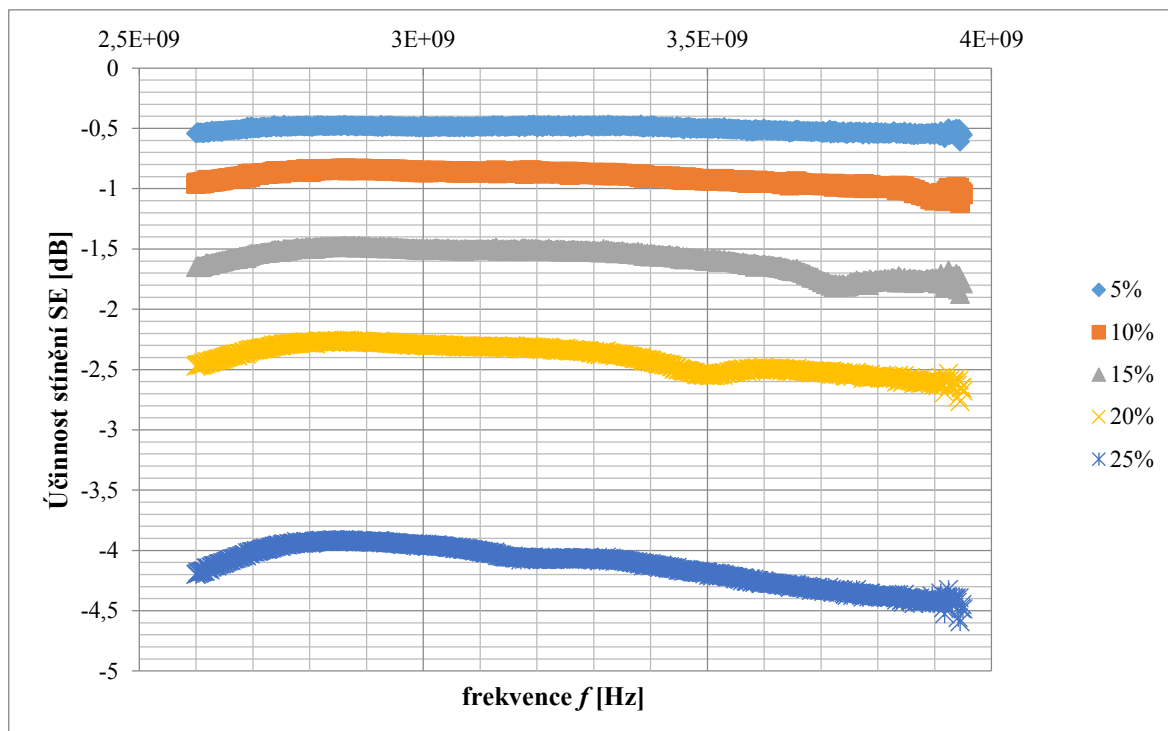
Obr. 23 Závislost účinnosti stínění na frekvenci elektromagnetického záření a koncentraci částic ve vzorku MRE ve frekvenčním pásmu WR137

Na Obr. 24 je zobrazen výsledek účinnosti stínění v pásmu 3,95 – 5,85 GHz (WR187) s koncentracemi MRE vzorků 5 – 25 obj. %. I v tomto frekvenčním pásmu je pozorovatelný výrazný vliv koncentrace částic Hogānas ASC 200 uvnitř připravených vzorků MRE na výslednou stínící účinnost. V případě potřeby vyšší účinnosti, jak pro toto či ostatní frekvenční pásma, by bylo možné dále zvýšit účinnost stínění přidavkem vyššího množství částic do kompozitních vzorků MRE, vše by se ovšem také odráželo ve změně mechanických vlastností (jejich vyhodnocení není cílem této práce), což by bylo nutné korelovat vždy s finální aplikací.



Obr. 24 Závislost účinnosti stínění na frekvenci elektromagnetického záření a koncentraci částic ve vzorku MRE ve frekvenčním pásmu WR187

Na Obr. 25 je zobrazen výsledek účinnosti stínění v pásmu 2,6 – 3,95 GHz (WR284) s koncentracemi MRE vzorků 5 – 25 obj. %. Z pohledu stínící účinnosti je i zde patrný výrazný vliv koncentrace. Obecně lze tedy výsledky shrnout do skutečnosti, že napříč všemi frekvenčními rozsahy narůstá poměrně výrazně stínící účinnost s koncentrací částic Hogānas ASC 200 ve vzorcích MRE. Porovnáním jednotlivých frekvenčních pásem lze dále shrnout, že připravené vzorky vykazují výraznou stínící účinnost převážně ve vyšších frekvenčních pásmech a k takovým aplikacím lze tedy studované kompozitní vzorky MRE směřovat.



Obr. 25 Závislost účinnosti stínění na frekvenci elektromagnetického záření a koncentraci částic ve vzorku MRE ve frekvenčním pásmu WR284

ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo vyhodnotit průchod množství elektromagnetického vlnění vzorkem při potlačení odrazové složky.

V praktické části bylo úkolem připravit magnetoreologické elastomery s určeným stupněm plnění, a to 5, 10, 15, 20 a 25 obj. %. Jako plnivo byly použity kovové částice Hogānas ASC 200 o frakci 32 – 45 μm , jako matrice silikonový elastomer HAVEL Tekutý silikon ZA 22 – BLUE a tvrdidlo HAVEL Katalyzátor k ZA 22. Pomocí SEM byly hodnoceny částice z pohledu tvaru a velikosti. Tato analýza potvrdila nepravidelnou morfologii částic Hogānas ASC 200, kdy velikost těchto částic odpovídá rozsahu velikostí zvoleném pro přípravu MRE vzorků, tedy 32 – 45 μm . Dále byla připravena magnetizační křivka částic Hogānas ASC 200 o frakci 32 – 45 μm , která jasně prokázala, že magnetizační saturace částic je dosažena v hodnotě 200 emu/g při intenzitě magnetického pole 15 kOe. Z tvaru magnetizační křivky je dále patrné, že částice vykazují feromagnetický charakter a jsou tedy magneticky měkké.

Z naměřených hodnot a graficky znázorněné účinnosti stínění v pásmu 12,4 – 18 GHz (WR62) s koncentracemi 5 – 25 obj. % je patrný nárůst stínící účinnosti s narůstající koncentrací magnetického plniva ve vzorcích MRE, kdy plnivo zvyšuje dielektrickou složku a magnetickou permeabilitu, což se makroskopicky projevuje potlačením odrazu elektromagnetického vlnění od vzorku vyjádřeného vyšším prostupem vlnění skrze vzorek.

Pro pásmo 8,2 – 12,4 GHz (WR90) je patrný značný nárůst stínící účinnosti s narůstající koncentrací částic Hogānas ASC 200, kdy ale celková stínící účinnost klesá v porovnání s daty pro vyšší frekvenční pásmo.

Pro pásmo 5,85 – 8,2 GHz (WR137) je patrný pokles stínící účinnosti v porovnání s vyššími frekvenčními pásmy. Celková stínící účinnost ale stále dosahuje hodnot vyšších než 90 % pro složku T .

Pro pásmo 3,95 – 5,85 GHz (WR187) je výrazný vliv koncentrace částic Hogānas ASC 200 na výslednou stínící účinnost. V případě, kdy by bylo potřeba dosáhnout vyšší účinnosti, bylo by možné dále zvýšit účinnost stínění zvýšením koncentrace částic do MRE vzorků. Toto řešení může mít vliv na změnu mechanických vlastností, toto by bylo nutné korelovat s finální aplikací.

Pro pásmo 2,6 – 3,95 GHz (WR284) je patrný výrazný vliv koncentrace.

Z výše uvedeného vyplývá, že napříč všemi frekvenčními rozsahy narůstá stínící účinnost s koncentrací částic Hogānas ASC 200 ve vzorcích MRE. Převážně ve vyšších frekvenčních pásmech MRE vzorky vykazují výraznou stínící účinnost a k těmto aplikacím je možné studované MRE vzorky směřovat.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] PETR, T. *Kompozitní materiály na bázi magnetoreologických elastomerů*. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, fakulta technologická, Zlín, 2015, 68 s.
- [2] KROČOVÁ, B. *Částicové kompozity vyztužené krátkými vlákny*. Vysoké učení technické v Brně, fakulta chemická, ústav chemie materiálů, Brno, 2012, 65 s.
- [3] VRBKA, J. *Mechanika kompozitů*. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky, Brno, 2008, 94 s.
- [4] ZEMANOVÁ, J. *Tepelně vodivé termoplastické materiály*. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta technologická, Zlín, 2016, 45 s.
- [5] BĚHÁLEK, L. *Polymery*. [Online]. [cit. 2018-09-15]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/04.html>
- [6] THOMAS, Sabu, Kuruvilla JOSEPH, Sant MALHOTRA, Koichi GODA A Meyyarappallil SREEKALA. *Polymer composites*. First edition. Wiley-VCH Verlag GmbH & CO., 2012, volume 1. ISBN 978-3-527-32624-2.
- [7] BĚHÁLEK, L. *Polymery*. [Online]. [cit. 2018-09-15]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/05.html>
- [8] CARLSON, J., David a Mark R. JOLLY. *MR fluid, foam and elastomer devices. Mechatronics*. [Online]. 2000, roč. 10, č. 4-5, 569 s. ISSN 09574158. Dostupné z: doi:10.1016/S0957-4158(99)00064-1
- [9] ZEDNÍK, R. *Vlastnosti a charakteristika magnetoreologických elastomerů a pěn*. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování, Brno, 2017, 56 s.
- [10] KALLIO, M. *The elastic and damping properties of magnetorheological elastomers*. 2005. ISBN 9513863115.

- [11] YANG, G., B. F. SPENCER, J. D. CARLSON a M. K. SAIN. *Large-scale MR fluid dampers: Modeling and dynamic performance considerations*. *Engineering Structures* [online]. 2002, roč. 24, č. 3, 323 s. ISSN 01410296. Dostupné z: doi:10.1016/S0141-0296(01)00097-9
- [12] XU, Zhenbang, Xinglong GONG, Guojiang LIAO a Xianmin CHEN. *An Active-damping-compensated Magnetorheological Elastomer Adaptive Tuned Vibration Absorber*. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* [online]. 2010, roč. 21, č. 10, 1047 s. [cit. 2018-11-15]. ISSN 1045-389X. Dostupné z: doi:10.1177/1045389X10375485
- [13] LI, Yancheng, Jianchun LI, Tongfei TIAN a Weihua LI. *A highly adjustable magnetorheological elastomer base isolator for applications of real-time adaptive control*. *Smart Materials and Structures* [online]. 2013, roč. 22, č. 9, s. 95020 [vid. 2017-05-04]. ISSN 0964-1726. Dostupné z: doi:10.1088/0964-1726/22/9/095020
- [14] [online]. [cit. 2018-11-15]. Dostupné z: <https://edu.techmania.cz/cs/encyklopedie/fyzika/magnetismus/magneticke-latky>
- [15] PINGAN, Y., MIAO, Y., HONGPING, L., JIE, F., HANG, Q., YUANPENG, X. *Improved rheological properties of dimorphic magnetorheological gels based on flower-like carbonyl iron particles*. 2017, China. Dostupné z: <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0169433217311777?token=631BE0ACA73CF263868714A349660E20CAD6D7B31727A91C2E9B9243D1E8623B9F7EFE369CFF83F8EAE7983C0A6376B0>
- [16] LI, W. H., Zhang, X. Z. & Du, H. (2013). *Magnetorheological elastomers and their applications*. In P. M. Visakh, S. Thomas, A. K. Chandra & A. P. Mathew (Eds.), *Advances in Elastomers I: Blends and Interpenetrating Networks* (pp. 357-374). Berlin, Germany: Springer.
- [17] [online]. [cit. 2018-11-15]. Dostupné z: <http://www.toyo-chem.com/en/products/electronics/conductive.html>

[18] MALÝ, M. *Magnetické vlastnosti látky*. Univerzita J. E. Purkyně [online]. [cit. 2018-11-15].

[19] [online]. [cit. 2018-11-15]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekcce/1028>

[20] [online]. [cit. 2018-11-15]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekcce/1029>

[21] BASF. *Carbonyl iron powder – mady by its inventor*. Basf.com [online]. ©2012 [cit. 15. 11. 2018]

[22] JIANG, Wanquan, Yanli ZHANG, Shouhu XUAN, Chaoyang GUO a Xinglong GONG. *Dimorphic magnetorheological fluid with improved rheological properties*. Journal of Magnetism and Magnetic Materials [online]. 2011, 323(24), 3246-3250 [cit. 2018-11-15]. DOI: 10.1016/j.jmmm.2011.07.024. ISSN 03048853. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0304885311004884>

[23] MENTLÍK, Václav. *Dielektrické prvky a systémy*. Praha: BEN - technická literatura, 2006. ISBN 80-7300-189-6.

[24] KIM, Min Su, Ying Dan LIU, Bong Jun PARK, Chun-Yeol YOU a Hyoung Jin CHOI. *Carbonyl iron particles dispersed in a polymer solution and their rheological characteristics under applied magnetic field*. Journal of Industrial and Engineering Chemistry [online]. 2012, 18(2), 664-667 [cit. 2018-11-15]. DOI: 10.1016/j.jiec.2011.11.062. ISSN 1226086x. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1226086X11002474>

[25] MACOSKO, Ch. W. *Rheology, principles, measurements and applications*. 1994. ISBN 1-56081-579-5.

[26] KRÁLOVÁ, M. *Elektromagnetické vlnění*. [Online]. [cit. 2018-12-04]. Dostupné z: <https://edu.techmania.cz/cs/encyklopedie/fyzika/elektromagneticke-vlny/elektromagneticke-vlneni>

[27] KUBÍK, Z. *Numerické řešení účinnosti stínění*. [Online]. [cit. 2019-20-04]. Dostupné z: https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/11025/3428/1/numericke_reseni_ucinnosti_stineni.pdf

[28] [online]. [cit. 2019-20-04] Dostupné z: <https://www.havel-composites.com/cs/produkty/tekuty-silikon-za-22-blue-2923-5507>

[29] [online]. [cit. 2019-20-04] Dostupné z: <https://www.havelcomposites.com/cs/produkty/katalyzator-za-22-blue>

[30] [online]. [cit. 2019-20-04] Dostupné z: https://www.hoganas.com/globalassets/download-media/sharepoint/brochures-and-datasheets---all-documents/asc100.29_june_2016_1531hog.pdf

[31] [online]. [cit. 2019-20-04]. Dostupné z: <http://access.feld.cvut.cz/view.php?cisloclanku=2010030006>

[32] [online]. [cit. 2019-20-04]. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/02029/index.html>

[33] [online] [cit. 2019-20-04]. Dostupné z: <http://www.paru.cas.cz/lem/bak/>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

ABS	Akrylonitril-butadien-styren
Ag	Stříbro
Al	Hliník
Ar	Argon
As	Arsen
ATVA	Adaptivní laděný tlumič vibrací (Adaptive Tuned Vibration Absorber)
Au	Zlato
AVA	Adaptivní tlumič vibrací (Adaptive Vibration Absorber)
<i>B</i>	magnetická indukce
B	Bor
Bi	Bismut
CIP	částice karbonylového železa (Carbonyl Iron Particles)
Co	Kobalt
Cr	Chrom
Cu	Měď
<i>D</i>	gradient rychlosti
dB	decibel
EP	epoxidová pryskyřice
Fe	železo
Gd	Gadolinium
<i>H</i>	intenzita magnetického pole
H ₂ O	Voda
He	Helium
Hg	Rtuť
Kr	Krypton
<i>KS</i>	koeficient stínění

log	logaritmus
Mn	Mangan
Mo	Molybden
MR	magnetoreologie
MRE	magnetoreologický elastomer
Ne	Neon
Ni	Nikl
PE	Polyetylén
PEEK	Polyéteréterketon
PF	fenol-formaldehydová pryskyřice
PMMA	Polymethylmetalakrylát
PP	Polypropylén
PS	Polystyren
PVC	Polyvinylchlorid
Rn	Radon
Sb	Antimon
Si	Křemík
Sn	Cín
UP	polyesterová pryskyřice
Xe	Xenon
η	dynamická viskozita
μ	Permeabilita
μ_0	permeabilita vakua
μ_r	relativní permeabilita
τ	tečné smykové napětí

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1 Klasifikace kompozitu podle geometrie výztuže [1]</i>	14
<i>Obr. 2 Příklady použití termoplastů (a) a reaktoplastů (b) [5]</i>	16
<i>Obr. 3 Základní módy MR suspenzí: a) ventilový, b) smykový, c) stlačovací, d) svírací [9]</i>	19
<i>Obr. 4 Komplexní permeabilita stlačeného vzorku CIP (SL-ty) [1]</i>	23
<i>Obr. 5 Natáčení vektoru vnitřní magnetizace, když jsou vloženy do vnějšího magnetického pole [14]</i>	25
<i>Obr. 6 MRE závěsné pouzdro [16]</i>	26
<i>Obr. 7 Zařízení MRE pro izolaci rázů [16]</i>	27
<i>Obr. 8 AVA obsahující MRE prvky [16]</i>	28
<i>Obr. 9 Stínící účinky a jejich rozhraní [19]</i>	31
<i>Obr. 10 Obdélníkový vlnovod [27]</i>	33
<i>Obr. 11 Schematické znázornění elektromagnetických vln [26]</i>	34
<i>Obr. 12 Síťovací stroj Fritsch</i>	42
<i>Obr. 13 Vakuová míchačka Renfert</i>	43
<i>Obr. 14 Vakuová sušárna Memmert</i>	43
<i>Obr. 15 Hydraulický lis</i>	44
<i>Obr. 16 Vysekávací nože</i>	44
<i>Obr. 17 Analyzátor PNA-L Keysight</i>	45
<i>Obr. 18 Vlnovod WR137</i>	47
<i>Obr. 19 SEM snímky částic Hogānas ASC 200 při různém zvětšení</i>	48
<i>Obr. 20 Magnetizační křivka částic Hogānas ASC 200 o frakci 32 – 45 μm</i>	49
<i>Obr. 21 Závislost účinnosti stínění na frekvenci elektromagnetického záření a koncentraci částic ve vzorku MRE ve frekvenčním pásmu WR62</i>	50
<i>Obr. 22 Závislost účinnosti stínění na frekvenci elektromagnetického záření a koncentraci částic ve vzorku MRE ve frekvenčním pásmu WR90</i>	51
<i>Obr. 23 Závislost účinnosti stínění na frekvenci elektromagnetického záření a koncentraci částic ve vzorku MRE ve frekvenčním pásmu WR137</i>	51
<i>Obr. 24 Závislost účinnosti stínění na frekvenci elektromagnetického záření a koncentraci částic ve vzorku MRE ve frekvenčním pásmu WR187</i>	52
<i>Obr. 25 Závislost účinnosti stínění na frekvenci elektromagnetického záření a koncentraci částic ve vzorku MRE ve frekvenčním pásmu WR284</i>	53

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1 Účinnost stínění [20]</i>	33
<i>Tab. 2 Druhy elektromagnetického záření, jejich vlnové délky a frekvence [26]</i>	35
<i>Tab. 3 Vlastnosti Tekutého silikonu ZA 22 – BLUE [28]</i>	39
<i>Tab. 4 Vlastnosti tvrdidla Katalyzátor k ZA 22 [29]</i>	40
<i>Tab. 5 Síťová analýza částic Hogānas ASC 200 [30]</i>	40
<i>Tab. 6 Navážky jednotlivých komponent pro přípravu vzorků MRE</i>	42
<i>Tab. 7 Teoreticky vypočtené hodnoty fázového posunu pro jednotlivé vlnovody</i>	47