

# Kompozitní materiály na bázi magnetoreologických elastomerů

Bc. Tomáš Petr

---

Diplomová práce  
2015



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická  
Ústav inženýrství polymerů  
akademický rok: 2014/2015

## **ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE**

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Tomáš Petr**  
Osobní číslo: **T13605**  
Studijní program: **N2808 Chemie a technologie materiálů**  
Studijní obor: **Inženýrství polymerů**  
Forma studia: **kombinovaná**

Téma práce: **Kompozitní materiály na bázi magnetoreologických elastomerů**

Zásady pro vypracování:

**Student v rámci diplomové práce provede:**

- literární rešerži na zadané téma
- modifikaci magnetického plniva vhodným polymerem
- přípravu magnetoreologických kompozitů o různých parametrech
- vyhodnocení mechanických případně dielektrických vlastností
- reologická měření připravených kompozitů v přítomnosti magnetického pole

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

[1] De Vicente, J., Klingenberg, D.J., Hidalgo-Alvarez, R. Magnetorheological fluids: a review. *Soft Matter*. 2011, vol. 7, no. 8, p. 3701–3710.

[2] Handbook of thermoplastic elastomers; Jiri George Drobny (2007) ISBN 978-0-8155-1776-4.

[3] Časopisecké publikace dostupné v databázích prostřednictvím Knihovny UTB.

Vedoucí diplomové práce:

**Ing. Michal Sedlačík, Ph.D.**  
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce:

**16. ledna 2015**

Termín odevzdání diplomové práce:

**15. května 2015**

Ve Zlíně dne 2. března 2015

  
doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.  
*děkan*



  
Ing. Lubomír Beníček, Ph.D.  
*ředitel ústavu*

Petr Tomáš

IP

Příjmení a jméno: .....

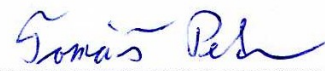
Obor: .....

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové 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 <sup>1)</sup>;
- beru na vědomí, že diplomová práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl jsem seznámen s tím, že na moji diplomovou 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 <sup>2)</sup>;
- beru na vědomí, že podle § 60 <sup>3)</sup> 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 <sup>3)</sup> odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – diplomovou 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 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 práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové 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 3.5.2015

  
.....

---

<sup>1)</sup> 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.

<sup>2)</sup> 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 vzdělávacímu zařízení (školní dílo).

<sup>3)</sup> 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 užit 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 přihlédne 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) a provedení jejich reologických měření v přítomnosti magnetického pole. Jako materiál matrice byl zvolen silikonový elastomer Polydimetylsiloxan. Plnivem byly dva druhy prášků karbonylového železa CI-SL a CI-HQ. Použitá plniva byla zhodnocena z hlediska morfologie, velikosti a distribuce částic pomocí skenovací elektronové mikroskopie. Změřeny byly také magnetické charakteristiky plniv za použití vibračního magnetometru. Dále byly připraveny vzorky MR kompozitů, s izotropní a anizotropní strukturou, s různým stupněm plnění. Distribuce částic a vnitřní struktury v MR kompozitech byly posouzeny podle snímků ze skenovací elektronové mikroskopie. U všech připravených MRE byla změřena na oscilačním reometru závislost elastické a viskózní složky smykového modulu na intenzitě magnetického pole. Při vyhodnocení výsledků byl sledován vliv intenzity magnetického pole, vnitřní struktury kompozitu, stupně plnění a velikost částic na elastic- kou složku smykového modulu.

Klíčová slova: kompozit, polymerní kompozit, plnivo, magnetické plnivo, karbonylové železo, elastomer, magnetoreologický elastomer, smykový modul

## **ABSTRACT**

This thesis is focused on the preparation of the magnetorheological elastomers (MRE) and performing their rheological measurements in the presence of an external magnetic field. Silicone elastomer Polydimethylsiloxane was selected as a matrix. There were used two kinds of carbonyl iron powders, namely CI-SL and CI-HQ. Used fillers were evaluated via scanning electron microscopy in terms of morphology, particle size and distribution. Magnetic characteristics of fillers were also measured using a vibrating sample magnetometry. Samples of MR composites were prepared with both isotropic and anisotropic structure and both with different amount of filler. Particle distribution and internal structures in MR composites were examined via scanning electron microscopy images. All prepared MRE were measured by an oscillatory rheometer for the dependence of an elastic and viscous components of shear modulus on the intensity of the external magnetic field applied. Evaluating the results were focused on the influence of magnetic field, inner composite structure, the degree of filling and the particle size of the elastic component of the shear modulus.

Keywords: composite, polymer composite, filler, magnetic filler, carbonyl iron, elastomer, magnetorheological elastomer, shear modulus

Chtěl bych poděkovat svému vedoucímu diplomové práce Ing. Michalu Sedlačíkovi, Ph.D. za jeho odborné vedení a pomoc při problémech souvisejících s touto prací.

Dále bych chtěl poděkovat Ing. Martinu Cvekovi a Ing. Tomáši Plachému za odbornou pomoc při experimentálních měřeních.

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

Ve Zlíně, 5. 5. 2015

.....

Podpis



# OBSAH

|  |           |
|--|-----------|
| <b>ÚVOD</b> .....  | <b>11</b> |
| <b>I TEORETICKÁ ČÁST</b> .....                                     | <b>12</b> |
| <b>1 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY</b> .....                                | <b>13</b> |
| 1.1    ROZDĚLENÍ KOMPOZITŮ .....                                   | 14        |
| 1.2    MATRICE .....   | 15        |
| 1.2.1    Termoplastové matrice.....                                | 15        |
| 1.2.2    Reaktoplastové matrice .....                              | 15        |
| 1.2.3    Elastomerní matrice .....                                 | 16        |
| 1.3    PLNIVO .....  | 17        |
| 1.3.1    Částicová plniva .....                                    | 17        |
| <b>2 MAGNETOREOLOGICKÉ KOMPOZITY</b> .....                         | <b>19</b> |
| 2.1    MAGNETOREOLOGICKÉ KAPALINY .....                            | 20        |
| 2.2    MAGNETOREOLOGICKÉ ELASTOMERY .....                          | 21        |
| 2.3    MAGNETICKÁ PLNIVA .....                                     | 22        |
| 2.4    MAGNETICKÉ CHARAKTERISTIKY ČÁSTIC.....                      | 23        |
| <b>3 APLIKACE MRE</b> .....  | <b>28</b> |
| 3.1    ADAPTIVNÍ LADĚNÝ TLUMIČ VIBRACÍ .....                       | 28        |
| <b>4 MAGNETOREOLOGICKÝ EFEKT</b> .....                             | <b>31</b> |
| 4.1    FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ MR EFEKT .....                          | 31        |
| 4.1.1    Vlastnosti feromagnetických částic.....                   | 31        |
| 4.1.2    Vliv teploty.....   | 31        |
| 4.1.3    Vliv koncentrace částic a působení magnetického pole..... | 32        |
| 4.2    MODIFIKACE POVRCHU CIP .....                                | 34        |
| <b>5 CÍLE PRÁCE</b> .....  | <b>36</b> |
| <b>II PRAKTICKÁ ČÁST</b> .....                                     | <b>37</b> |
| <b>6 MATERIÁLY</b> .....   | <b>38</b> |
| 6.1    PDMS .....  | 38        |
| 6.2    CARBONYL IRON .....   | 40        |
| 6.2.1    CI-SL.....  | 40        |
| 6.2.2    CI-HQ.....  | 40        |
| <b>7 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST</b> .....                                 | <b>41</b> |
| 7.1    PŘÍPRAVA VZORKŮ KOMPOZITU .....                             | 41        |
| 7.2    CHARAKTERIZACE ČÁSTIC.....                                  | 42        |
| 7.2.1    SEM částic .....  | 42        |
| 7.2.2    VSM.....  | 43        |
| 7.3    CHARAKTERIZACE KOMPOZITU .....                              | 43        |
| 7.3.1    SEM kompozitu .....                                       | 43        |
| 7.3.2    Magnetoreometrie .....                                    | 43        |
| <b>8 VÝSLEDKY A ZHODNOCENÍ</b> .....                               | <b>45</b> |

|  |                        |           |
|--|------------------------|-----------|
| 8.1  | SEM ČÁSTIC.....        | 45        |
| 8.2  | SEM KOMPOZITU .....    | 46        |
| 8.3  | VSM .....              | 49        |
| 8.4  | MAGNETOREOMETRIE ..... | 50        |
| <b>ZÁVĚR .....</b>                             |                        | <b>57</b> |
| <b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....</b>          |                        | <b>58</b> |
| <b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....</b> |                        | <b>64</b> |
| <b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>                    |                        | <b>66</b> |
| <b>SEZNAM TABULEK.....</b>                     |                        | <b>68</b> |

## ÚVOD

Diplomová práce se zabývá problematikou zvláštního druhu kompozitního materiálu, magnetoreologických elastomerů (MRE). Tyto materiály jsou v posledních desetiletích předmětem zvýšeného zájmu, především díky jejich velkému potenciálu v oblasti inženýrských aplikací. Jsou také často nazývány inteligentní či chytré materiály, jelikož jsou jejich vlastnosti ovlivnitelné vnějším magnetickým polem. Magnetoreologické elastomery jsou stejně jako klasické polymerní kompozity tvořeny matricí a plnivem. Plnivo běžně slouží ke zlepšení mechanických vlastností, zvýšení pevnosti, či snížení ceny kompozitu. V případě MRE však musí mít plnivo vhodné magnetické vlastnosti a je přidáváno za účelem získání vlastností zcela nových. Materiál matrice by pak měl být vysoce elastický, používá se termoplastický či síťovaný elastomer. Magnetoreologické elastomery nacházejí uplatnění v mnoha oblastech, nejčastější jsou však aplikace ve formě izolace a tlumení vibrací.

Cílem diplomové práce je vyhodnotit vliv magnetického pole na výsledné vlastnosti MRE. Teoretická část se nejprve zabývá polymerními kompozity a jejich rozdělením obecně, dále pak bližším popisem dvou základních složek, plnivy a matricemi. Nejvíce prostoru je pak věnováno samotným MRE. Podrobněji jsou popsána magnetická plniva, jejich magnetické charakteristiky a vlastnosti. V další části práce je rozebrán magnetoreologický efekt a ovlivňující faktory, jako jsou vlastnosti částic, koncentrace, teplota, intenzita vnějšího magnetického pole. V části praktické byly připraveny vzorky MRE se silikonovou matricí o různém stupni plnění a druhu plniva. Polovina vzorků byla připravena s anizotropní vnitřní strukturou, kdy síťovací reakce probíhala v přítomnosti magnetického pole. Připravené vzorky pak byly podrobeny reologickým měřením na oscilačním reometru bez a v přítomnosti vnějšího magnetického pole. Naměřené hodnoty byly pro přehlednost převedeny do grafické podoby a v závěru práce provedeno jejich vyhodnocení. Vyhodnocení bylo převážně zaměřeno na vliv působení magnetického pole při vytvrzování kompozitu a dále na změnu smykového modulu v závislosti na intenzitě vnějšího magnetického pole během oscilačního namáhání kompozitu.

## **I. TEORETICKÁ ČÁST**

## 1 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY

Kompozitní materiály jsou heterogenní systémy. Sestávají ze dvou nebo více fází, lišících se navzájem svým chemickým složením i fyzikálními a mechanickými vlastnostmi. Tyto fáze jsou navzájem separovány zřetelným rozhraním. Jejich charakteristické vlastnosti jsou podstatně odlišné. Jedna z fází se nazývá primární, ta má funkci pojivové matrice a většinou má kontinuální charakter. Je obvykle více tažná a méně tvrdá. Druhá fáze se nazývá sekundární. V případě polymerních kompozitů ji nazýváme plnivo. Sekundární fáze jsou obvykle nespojitě, tvořené částicemi rozmanitých tvarů, např. vláknité, destičkové, kulovité. Sekundární fáze jsou výrazně pevnější než matrice a přenáší užitečná zatížení.

Vzájemnou soudržnost matrice a plniv zajišťují fyzikální i chemické vazby, nejčastěji však Van Der Waalsovy síly. Povrch plniv se často kvůli zlepšení celkových mechanických vlastností kompozitu upravuje nanesením vhodné chemické látky. Tato chemická látka obsahuje v případě anorganického plniva anorganické funkční skupiny reagující s jejím povrchem. Obsahuje také funkční skupiny organické, reagující s polymerní matricí. Nejčastěji se používají silany a organické sloučeniny titanu. U kompozitů s částicovými plnivy však tato úprava často zhoršuje houževnatost. [1, 2]

Kompozity se dnes již staly nedílnou součástí konstrukčních materiálů. Je to díky jejich nesporným výhodám, které přináší. Především díky nízké hmotnosti, odolnosti proti korozi a vysoké únavové pevnosti. Kompozity nachází uplatnění např. při výrobě konstrukcí letadel, krytů elektronického zařízení, lékařského vybavení nebo vesmírných plavidel. Různé materiály jsou uvážlivě kombinovány pro získání systému s takovými užitnými, strukturálními nebo funkčními vlastnostmi, kterých nelze dosáhnout při použití kteréhokoliv z komponentů samostatně. [2]

Kompozity tedy v konstrukčních aplikacích mají následující vlastnosti:

- obvykle sestávají ze dvou, nebo více fyzikálně odlišných a mechanicky oddělitelných materiálů
- jsou vyrobeny smícháním jednotlivých materiálů takovým způsobem, aby bylo dosaženo kontrolované a rovnoměrné disperze složek
- mají vynikající mechanické vlastnosti a to v některých případech zcela odlišné od jednotlivých složek

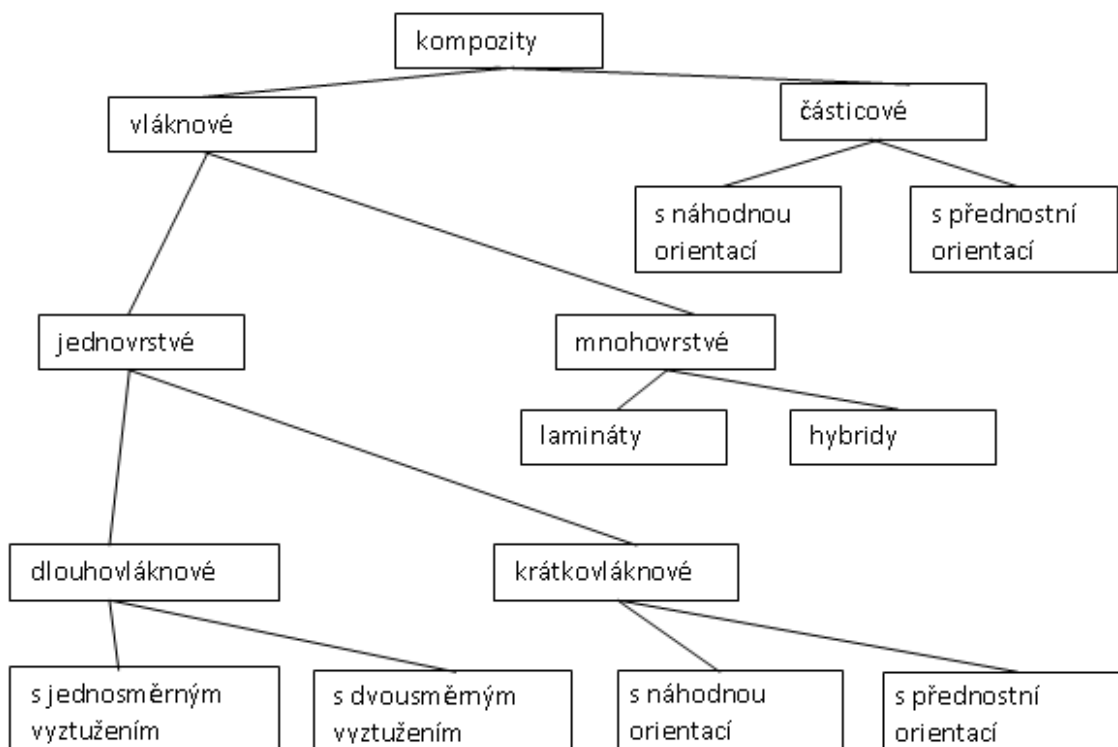
Nejpokročilejší aplikací kompozitních materiálů je použití na kosmických lodích v náročném prostředí. Pokročilé kompozity mají vyztužení z vysoce pevných vláken v epoxidové

polymerní matici. Příklad vysoce výkonného kompozitu je kombinace materiálů grafit/epoxid, kevlar/epoxid nebo boron/epoxid. Pokročilé kompozitní materiály jsou tradičně používány v leteckém průmyslu, ale stále více nacházejí uplatnění i v komerční sféře. [2]

## 1.1 Rozdělení kompozitů

Na základě materiálu matrice mohou být kompozity s kovovou maticí, keramickou maticí a polymerní maticí.

Podle typu výztuže rozlišujeme kompozity s částicovými plnivými, vláknové kompozity a laminátové kompozity. Vláknové kompozity mohou být dále rozděleny dle typu vlákna na přírodní a syntetické. Kompozity s přírodními vlákny mohou být s biodegradabilní či s biodegradabilní maticí. Kompozity s biodegradabilní maticí a s přírodními vlákny označujeme jako zelené kompozity. Přírodní kompozity mohou být dále hybridní a textilní. Hybridní kompozity obsahují více typů vláken. Na Obr. 1 je znázorněna klasifikace kompozitů na základě geometrie výztuže - plniva. [1, 2, 3]



Obr. 1 Klasifikace kompozitů na základě geometrie výztuže [3]

## 1.2 Matrice

Polymerní matrice má v kompozitu funkci pojiva a tvoří v něm spojitou fázi. Má výrazně vyšší poddajnost a houževnatost oproti většině plniv, např. křehkým vláknům, která zároveň chrání. Obecně ji lze charakterizovat buď jako termoplast, nebo jako reaktoplast. [4,5,6]

### 1.2.1 Termoplastové matrice

Termoplastické materiály jsou již zcela zpolymerované. Jejich viskozita, i když je převedeme do taveniny, je značně vysoká. Obecně je mnohem vyšší, než u většiny pryskyřic [7]. Složení termoplastů se liší od termosetů. U termosetů závisí tuhost materiálu na zesíťování mnoha malých molekul, u termoplastů je výsledná pevnost dána délkou řetězců. V důsledku toho mají termoplasty určité výhody:

- dlouhá doba skladovatelnosti bez výrazné změny vlastností
- krátká doba zpracování, řádově otázka minut (oproti až hodinám u termosetů)
- vyšší tažnost a lomová houževnatost
- možnost recyklace

Existuje velké množství termoplastů používaných pro kompozity, lze je rozdělit do dvou základních kategorií. První skupinu tvoří termoplasty běžně používané v průmyslu. Jsou to např. polyetylen (PE), polypropylen (PP), polyvinylchlorid (PVC), polystyren (PS), polymethylmetakrylát (PMMA), polyakrylonitrilbutadienstyren (ABS). Druhá skupina je pak tvořena vysoce odolnými termoplasty, které byly vyvinuty pro pokročilé aplikace. Jako příklad lze uvést polyéteréterketon (PEEK) nebo termoplastický polyimid. [7, 8]

### 1.2.2 Reaktoplastové matrice

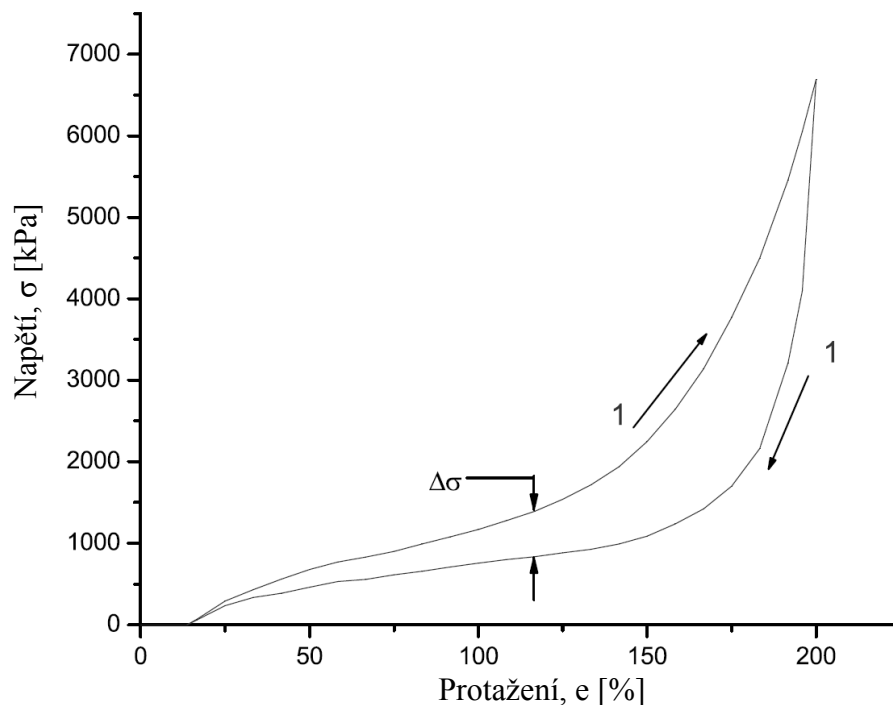
Jedním z hlavních důvodů pro použití reaktoplastů jako matrice namísto termoplastů je jejich mnohem nižší viskozita. To přináší výhody v kombinaci s dlouhými a spojitými vlákny a u strukturních kompozitů s vysokou pevností a modulem. Termosetové polymery jsou připravovány pomocí chemické reakce jednoho či více kapalných pre-polymerů, za přítomnosti katalyzátoru nebo tvrdidla. Kapalné pre-polymerové jsou pomocí tzv. zesíťování nebo vytvrzení převedeny na pevný polymer. Termosetové polymery vykazují ve vytvrzeném stavu oproti většině běžných termoplastů vyšší chemickou i tepelnou odolnost a menší kríp. Při využití reaktoplastů jako matrice existuje však i několik omezení. Jednak je doba vytvrzení závislá na použitém vytvrzovacím systému a pracovní teplotě, může tak být ně-

kolik minut až několik hodin. To je čas podstatně delší, než pro zpracování termoplastů. Dalším omezením je, že reaktoplasty nemohou být znovu převedeny do tekutého stavu, což znemožňuje jejich znovupoužití či recyklaci. [6, 9]

### 1.2.3 Elastomerní matrice

Polymery vzniklé zesíťováním kaučuků nazýváme elastomery. Jejich teplota skelného přechodu ( $T_g$ ) je hluboko pod teplotou, při které je běžně používáme. Nad  $T_g$  vykazují při namáhání velké deformace, aniž by došlo k jejich porušení. V oblasti malých deformací vykazují modul pružnosti v tahu v rozmezí 10 až 100 MPa. Deformace jsou vratné. [4]

Na *Obr. 2* je typická tahová křivka elastomeru, kdy bylo měřeno napětí i při návratu zkušebního zařízení do výchozí polohy. Rozdíl v napětí, označený  $\Delta\sigma$ , je hystereze. Ta je způsobena vnitřním třením, její velikost je závislá na druhu elastomeru. Minimální je u nevyztuženého přírodního kaučuku a vyšší pak ve většině ostatních elastomerů. Zvyšuje se s množstvím plniva a s rychlostí deformace. Na tahové křivce je také patrný kríp, kdy křivka začíná nad nulovou hodnotou protažení a křivka smrštění opět končí nad nulovou hodnotou protažení. [10]



*Obr. 2 Tahové prodloužení a smrštění elastomeru vykazující hysterezi [10]*



Oproti kompozitům s reaktoplastovou maticí vykazují kompozity s elastomerní maticí vyšší rázovou houževnatost a dokáží lépe pohltit dopadovou energii. Toho se využívá při konstrukci a optimalizaci kompozitních dílů odolných proti nárazu. [11]

### 1.3 Plnivo

Dříve byla většina plniv považována za aditiva, která vzhledem ke svým nepříznivým geometrickým vlastnostem, velikosti plochy povrchu nebo povrchovému chemickému složení mohla jen mírně zvýšit modul polymeru, zatímco pevnost (v tahu, v ohybu) zůstala nezměněna, nebo se dokonce snížila. Jejich hlavní přínos byl ve snižování nákladů náhradou dražšího polymeru. V závislosti na typu plniva mohly být ovlivněny i jiné vlastnosti polymeru. Jako příklad lze uvést experiment, kdy viskozita taveniny mohla být významně zvýšena začleněním vláknitých materiálů. Nicméně smrštění během tváření a teplotní roztažnost by se snížily, což je společný účinek většiny anorganických plniv. Pojem ztužující plnivo byl vytvořen pro popis diskontinuálního aditiva určitého tvaru a chemického složení povrchu, kterým byly vhodně modifikovány vlastnosti polymeru, zejména pevnost. Anorganická vyztužující plniva jsou tužší než matrice a méně se deformují. Způsobují celkové snížení napětí v matici, hlavně v blízkosti částic. Pojem plnivo je tedy velmi široký a zahrnuje celou řadu materiálů. Jako pevné částice mohou být organické, anorganické. Mohou nabývat pravidelných i nepravidelných tvarů, sférických, jehlicovitých, vláknitých či deskových. Také jsou významné rozdíly v chemické struktuře. Plniva jsou tedy obvykle tuhé pevné látky, nemísitelné s maticí, v roztaveném i pevném stavu. Tvoří zřetelně oddělenou fázi. Obvykle jsou použita ve vyšších koncentracích (>5 % obj.). [12]

Nejčastěji používaná částicová plniva jsou průmyslové minerály, jako je mastek, uhličitán vápenatý, slída, kaolín, wollastonit, živec nebo hydroxid hlinitý. Nejčastěji používaná vláknitá plniva jsou skleněná vlákna, kdy se v poslední době využívají ve zvýšeném množství také přírodní vlákna. Docela nedávno došlo k rozšíření také montmorillonitu a hydrotalcitu, různých oxidů a nanovláken, jako jedno nebo vícečetné uhlíkové nanotrubičky. [12]

#### 1.3.1 Částicová plniva

Polymerní materiály jsou obecně široce využívány pro jejich snadnou modifikaci při výrobě složitých dílů. Jejich předností jsou také mechanické či fyzikální vlastnosti, jako např. rázová houževnatost, nízká měrná hmotnost a jiné. Nicméně jejich izolační vlastnosti jsou

nevýhodou, pokud požadujeme zvýšenou tepelnou nebo elektrickou vodivost. Pro překonání tohoto nedostatku, lze do polymeru začlenit elektricky vodivé částice. Ve skutečnosti je elektrická vodivost kovových částic o 8 až 10 řádů vyšší, než u ostatních plniv, kromě uhlíkových vláken. Rozdíl v tepelné vodivosti je menší, pouze 2 až 3 řády. Konečné vlastnosti polymerních kompozitů s kovovými částicovými plnivými budou záviset na koncentraci, velikosti a tvaru plniva, mikrostruktuře kompozitu, procesních podmínkách a na podmínkách fázového rozhraní. Velmi častá výzva je vyrobit co nejvíce elektricky a tepelně vodivý kompozit při současné minimalizaci negativních dopadů na mechanické vlastnosti, hustotu, nebo cenu. V obecnějším porovnání jsou kovem plněné kompozity ve srovnání s kovy levnější a lehčí, mají lepší odolnost vůči korozi a obvykle snadnější proces výroby. Kromě toho může být lépe navržena hustota, koeficient objemové roztažnosti a další vlastnosti tak, aby lépe vyhovovaly požadavkům zákazníka a dané aplikaci. Je však velice obtížné změnit jedinou vlastnost bez toho, aniž by měla vliv na vlastnosti jiné. Proto je velmi často nutné nalézt mezi požadavky vzájemný kompromis.

Kovové částice se prakticky nepoužívají pro zpevnění kompozitu, ale výhradně pro zvýšení elektrické a tepelné vodivosti. Z tohoto důvodu existuje mnoho aplikací kovem plněných polymerů: vedení tepla, elektromagnetické stínění, mikrovlnné absorbéry, magnety, antistatické vybavení, magnetický záznam, elektrické topení, termistor nebo chemický senzor. Aplikace vedení tepla jsou především v elektronickém, elektrotechnickém nebo automobilovém průmyslu (kryty elektrozařízení, termoplastické hadice pro cirkulaci horkého vzduchu, výměníky tepla, autobaterie atd.). [3, 13]

## 2 MAGNETOREOLOGICKÉ KOMPOZITY

Materiály, jejichž fyzikální vlastnosti mohou být ovlivněny např. změnami pH, nebo intenzitou aplikovaného elektrického nebo magnetického pole mají obecný název "inteligentní materiály". Do této skupiny patří magnetoreologické (MR) materiály. Jejich mechanické vlastnosti mohou být měněny kontrolovaným způsobem pomocí vnějšího magnetického pole. Jejich základní rozdělení je na magnetoreologické kapaliny (MRF), magnetoreologické pěny a magnetoreologické elastomery (MRE). [14, 15, 16]

Magnetické kompozitní materiály (PMC) obecně jsou vyrobené začleněním železných nebo obecněji ferimagnetických částic do nemagnetické matrice. Takto připravený magnetický částicový kompozit má velkou výhodu proti velké většině magnetických materiálů (kovy, slitiny nebo ferity). A to díky jejich vyššímu elektrickému odporu, nižší hustotě, vyšší chemické stabilitě a zpracovatelnosti. Komplexní magnetická permeabilita a permitivita dielektrika jsou citlivé na strukturu, což umožňuje měnit elektromagnetické vlastnosti materiálu v širokém rozsahu frekvencí. Toho lze dosáhnout změnou koncentrace, tvaru a velikosti částic plniva a mikrostruktury kompozitu. Díky možnostem těchto změn mají magnetické kompozity mnoho užitečných aplikací. Mohou být použity jako magnetické substráty pro mikrovlnné antény, mikrovlnné induktory, radioabsorbční materiály apod. [2]

Pole uplatnění PMC je určeno požadavky na počáteční permeabilitu  $\mu$ , úroveň magnetických ztrát a rozsah pracovních frekvencí. To znamená, že požadované vlastnosti pro PMC v zařízeních s vysokými frekvencemi jsou vysoká počáteční permeabilita a nízké ztráty v širokém frekvenčním rozsahu. Oproti tomu, PMC používané jako radioabsorbční materiály by měly mít vysokou permeabilitu a vysoké magnetické ztráty. Počáteční permeabilita PMC je závislá na permeabilitě originálního magnetického materiálu (intrinsic permeability), na faktoru zatížení a na mikrostruktuře kompozitu. Na druhou stranu je však mikrostruktura kompozitu určena morfologií (tvarem a velikostí) magnetických částic, jejich mikrostrukturou a vzájemným uspořádáním v kompozitu.

Přípravě PMC, zvláště vysoce plněných, je potřeba věnovat zvláštní pozornost. Je potřeba dosáhnout rovnováhy mezi schopností zpracování a požadovanými vlastnostmi pro danou aplikaci. Fyzikální, mechanické a elektromagnetické vlastnosti totiž podstatně závisí na tom, jak rovnoměrně jsou částice plniva distribuovány v polymerní matrici. Distribuce je ovlivněna dvěma hlavními faktory. Je to interakce plnivo - plnivo a plnivo - matrice. Výběr vhodných materiálů a jejich vzájemná kompatibilita jsou tedy pro návrh PMC klíčové. [2]

Materiály typu PMC našly široké uplatnění v elektronice, při eliminaci vibrací či v biomedicíně. Jednou z nejvíce reprezentativních tříd "chytrých" materiálů jsou magnetoreologické suspenze (MRS), elektromagnetické tekutiny (ERF) a magnetoreologické elastomery. V nedávné době bylo prokázáno, že v přítomnosti magnetického pole vykazují MRS elektrickou vodivost. U mikročástic, které mají průměr 1 až 10  $\mu\text{m}$ , dochází v kapalném prostředí k sedimentaci, a řešení tohoto problému (částečné nebo úplné) je dosaženo zavedením přísad, jako jsou uhlíkové nanotrubičky nebo nanočástice z grafenu. V obou případech získáme vylepšenou stabilitu a lepší fyzikální vlastnosti MRE. [15]

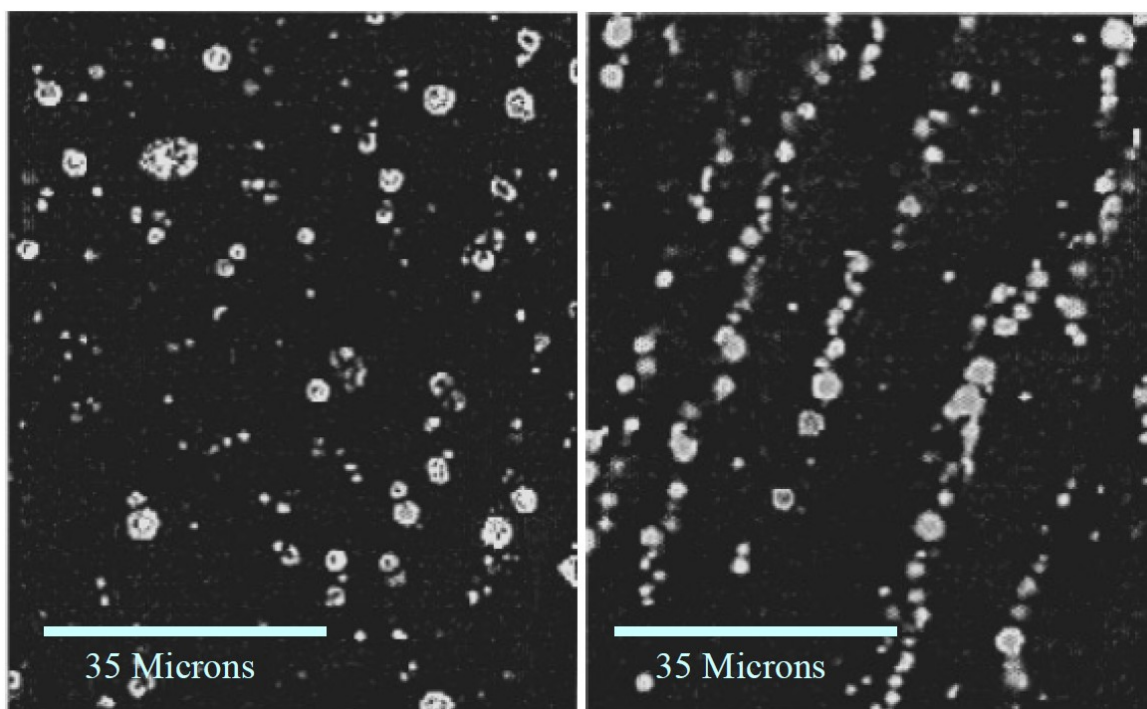
## 2.1 Magnetoreologické kapaliny

Magnetoreologické tekutiny jsou inteligentní materiály, které vykazují reverzibilní a velmi rychlý přechod z kapalného do téměř pevného stavu za přítomnosti vnějších magnetických polí. [14] Konvenční MRF jsou dvoufázové kapaliny připravené disperzí značného množství pevných, vysoce magnetizovatelných mikročástic (až do 50 % hm.). Používá se jemný prášek (Fe, Ni, Co jako mikročástice nebo jejich slitiny) magnetizovatelné fáze v neferomagnetické kapalině. Typické nosné kapaliny jsou minerální a silikonové oleje, polyestery, polyétery, syntetické uhlovodíky a voda. [14, 16] Při aplikaci vnějšího magnetického pole se mikročástice zmagnetizují a vytvoří řetězce uspořádané podél siločar magnetického pole. Síla řetězců závisí na typu částic, a na intenzitě magnetického pole. Tvorba řetězců mikročástic v kapalném prostředí určuje celkovou změnu fyzikálních vlastností MRF, zejména však reologických vlastností. Právě změna reologických vlastností MRF se používá pro aplikace tlumičů vibrací a mechanických rázů nebo pro výrobu spojek řízených intenzitou aplikovaného magnetického pole. [15] Tyto kapaliny vykazují pro magnetické pole o indukcii 1 T změny zdánlivé viskozity v několika řádech. Tato vynikající vlastnost z nich dělá velmi dobrého kandidáta na použití v mechanických systémech, které vyžadují aktivní kontrolu vibrací nebo přenos točivého momentu. Typickými příklady jsou tlumiče, brzdy, spojky, seismické tlumiče vibrací a regulační ventily. Další příklady zahrnují použití magnetických polí pro kontrolu přenosu tepelné energie, biomedicínské aplikace, přesné leštění nebo šíření zvuku. [14, 16]

## 2.2 Magnetoreologické elastomery

Magnetoreologické elastomery jsou pevnými analogy MRF, kde je olej nahrazen do určité míry elastickým materiálem. MRE také patří do skupiny inteligentních materiálů, jejichž reologické vlastnosti mohou být řízeny aplikací vnějšího magnetického pole. Ve srovnání s MR kapalinami, mají MRE modul pružnosti reagující na magnetické pole a získaly tak široké uplatnění. [17]

MRE sestávají z magneticky polarizovatelných částic dispergovaných v polymerní matici. Aplikované magnetické pole během síťování vyvolá interakci mezi částicemi, která podporuje vznik anizotropní struktury ve formě řetězců, či sloupců orientovaných ve směru pole (Obr. 3). Vzniklá struktura, která je po vytvrzení zafixována, pomáhá zvýšit závislost mechanických vlastností MRE na aplikovaném magnetickém poli. [16, 18]



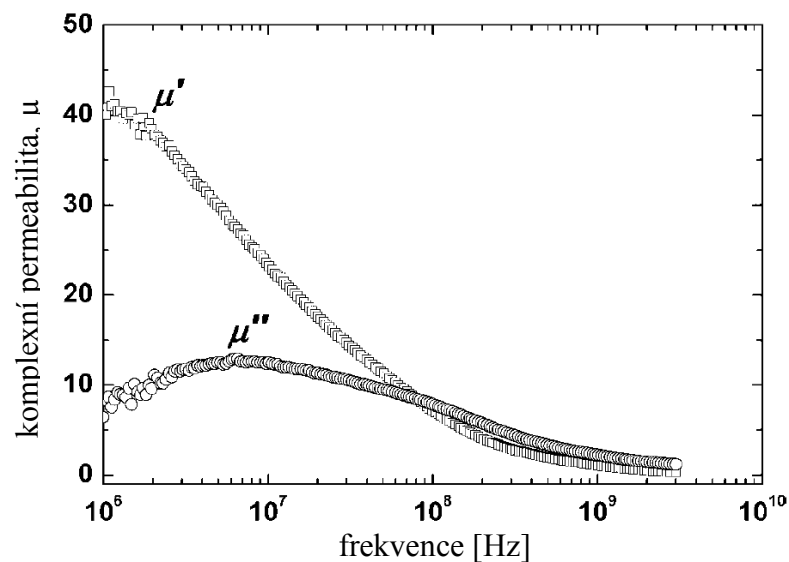
Obr. 3 SEM snímky částic v elastomeru, vlevo je snímek náhodně dispergovaných částic, vpravo jsou pak částice zřetězené působením magnetického pole [19]

Tvorba sloupcových struktur částic v elastomeru odpovídá nízkému dipolárnímu energetickému stavu. Působením smykových sil v kompozitu za přítomnosti vnějšího magnetického pole dochází k vychýlení částic z nízkoenergetického stavu, k čemuž je zapotřebí

další práce. V zásadě toto množství práce roste úměrně s aplikovaným polem, což se projevuje závislostí smykového modulu na intenzitě magnetického pole. [20]

### 2.3 Magnetická plniva

Mezi nejpoužívanější druhy magnetických plniv používaných ve velké míře pro PMC jsou částice karbonylového železa (CIP), alsifer (trojitá eutektická slitina železa, která dále obsahuje 7 až 8 % Al, a 9 až 11 % Si), permaloy (slitina Fe a Ni, dopovaná Mo, Cu a Cr), magneticky měkké spinelové ferity a hexagonální ferity [2]. Nejpoužívanější je však práškové karbonylové železo, které se vyrábí s velikostí částic v řádu mikrometrů. Železné částice se získávají tepelným rozkladem pentakarbonyl železa. Charakteristickými vlastnostmi CIP je jejich vysoká magnetizační saturace ( $\mu_0 M_S = 2,1 \text{ T}$ ), magneticky měkké vlastnosti, snadná dostupnost a vysoká počáteční magnetická permeabilita [2, 14, 37]. Počáteční magnetická permeabilita CIP při tlaku 1,5 GPa je přibližně 40 [21]. Na Obr. 4 je magnetické spektrum vzorku (SL-ty) karbonylového železa (CI) (99,5 at.%  $\alpha$ -Fe) získaného stlačením prášku pod vysokým tlakem (1,5 GPa). Z průběhu komplexní permeability je patrné, že CIP se vyznačuje širokou rezonancí, což svědčí o nehomogenní struktuře vzorku. [2]



Obr. 4 Spektrum komplexní permeability stlačeného vzorku CI (SL-ty) [2]

Hlavní výhodou CIP je možnost změny jeho chemického složení, tvaru a velikosti částic. Tím lze získat širokou oblast disperze magnetické permeability v oblasti rádiových frekvencí a v pásmu mikrovln. CIP je vyráběn po celém světě, např. firmami BASF Corporation, Vogt (Germany), READE, GAF, and Amidon, Inc. (USA), INCOMOND (UK), ONJA

(France), Labdhi Chemical Industries (India) a jiné. Použití CIP má však také své nevýhody, jako například nízkou chemickou stabilitu díky vysokému obsahu železa (97 - 99 at.%). [2]

## 2.4 Magnetické charakteristiky částic

Při popisu magnetického pole používáme veličinu zvanou magnetická indukce,  $B$ , s jednotkou  $T$  (Tesla). Ta však závisí na prostředí, ve kterém se magnetické pole budí. Pro řešení magnetických polí v nehomogenním prostředí, kde se uplatňuje vliv různých permeabilit, je proto výhodnější využít veličinu podobnou, na prostředí nezávislou. Touto veličinou je intenzita magnetického pole,  $H$ , kterou pro izotropní prostředí (např. polykrystalické látky) vypočteme dle rovnice (1). Jednotkou je poté  $A.m^{-1}$ . [22, 23]

$$H = \frac{B}{\mu} \quad (1)$$

kde  $\mu$  je permeabilita

Permeabilita: Je lineární koeficient úměrnosti mezi magnetickou indukcí a intenzitou. V izotropním a homogenním materiálu jde o jediné číslo, v komplikovanějších materiálech o tenzor (matici) koeficientů. [24]

Magnetizace: Vlivem termického pohybu jsou magnetické momenty jednotlivých molekul náhodně orientovány všemi směry a látka se navenek jeví, jako nemagnetická. Účinkem vnějšího magnetického pole dojde k natočení molekul tak, že jejich magnetické momenty směřují ve směru pole. Tím přispívají ke zvýšení indukce magnetického pole. Hodnotu indukce magnetického pole, kterou by proudovodič, budící toto pole, vytvořil v daném místě ve vakuu, označíme  $B_0$ . Je-li však tento proudovodič obklopen molekulami daného prostředí, budou jejich magnetické momenty přispívat k hodnotě indukce určitou hodnotou, kterou značíme magnetizací,  $J$ . V tomto prostředí pak bude indukce  $B$  rovna dle rovnice (2).

$$B = B_0 + J \quad (2)$$

Příspěvek magnetizace  $J$  k indukci  $B$  ale závisí na velikosti magnetického pole v daném místě. Magnetizaci  $J$  lze tedy vyjádřit jako součin intenzity pole v daném místě a materiálové konstanty dle rovnice (3).

$$J = \mu_0 \cdot \chi \cdot H \quad (3)$$

kde  $\mu_0$  je permeabilita vakua,  $\chi$  je konstanta prostředí - susceptibilita

pokud vezmeme, že  $B_0$  je indukce jakou by toto pole mělo ve vakuu, platí:

$$B_0 = \mu_0 \cdot H \quad (4)$$

potom lze rovnici (2) napsat jako:

$$B = \mu_0(1 + \chi)H \quad (5)$$

mezi permeabilitou a susceptibilitou dále platí vztah:

$$\mu = \mu_0 \cdot \mu_r = \mu_0(1 + \chi) \quad (6)$$

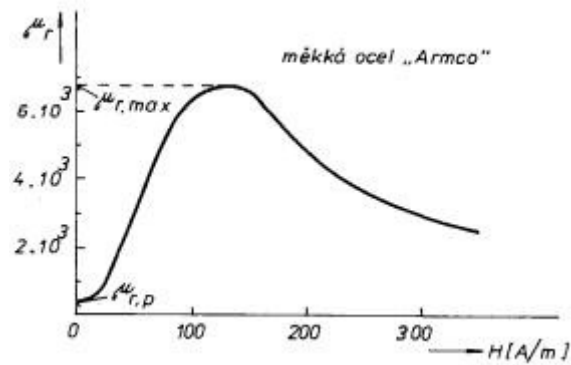
Podle rovnice (6) je relativní permeabilita  $\mu_r$  rovna susceptibilitě zvětšené o jedna. Z toho plyne, že permitivita i susceptibilita jsou podmíněny stejnými mikroskopickými vlastnostmi látky. [22, 23]

Všechny materiály mají magnetické vlastnosti. Tyto charakteristické vlastnosti mohou být rozděleny do pěti skupin: paramagnetické, diamagnetické, feromagnetické, antiiferomagnetické a ferimagnetické. Pouze však feromagnetické a ferimagnetické látky mají vlastnosti vhodné pro praktické využití. Feromagnetické vlastnosti jsou omezeny téměř výhradně na železo, nikl, kobalt, gadolinium a jejich slitiny.

Ferimagnetismus je magnetismus oxidů feromagnetických prvků. Tyto látky se nazývají ferity a garnety. Základní ferit je magnetit ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), který může být zapsán jako  $\text{FeO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ . Náhradou  $\text{FeO}$  jinými dvojmocnými oxidy můžeme získat širokou škálu materiálů s výhodnými vlastnostmi. Hlavní výhodou těchto materiálů je jejich vysoký elektrický odpor, který minimalizuje vířivé proudy při vysokých frekvencích.

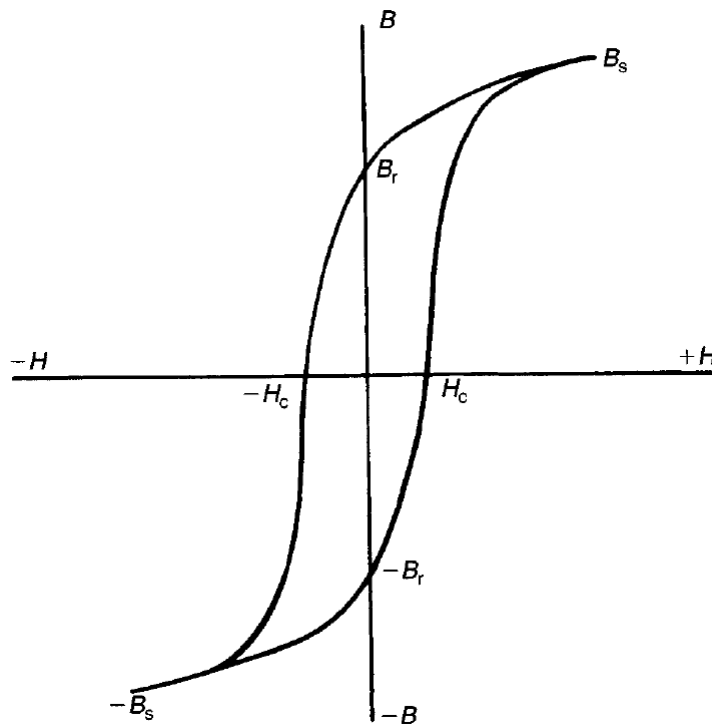
Feromagnetické a ferimagnetické materiály se vyznačují střední až vysokou permeabilitou. Permeabilita není konstantní, ale je závislá na intenzitě magnetického pole (*Obr. 5*).





Obr. 5 Relativní permeabilita v závislosti na intenzitě magnetického pole [23]

Stoupá k maximu v kolenu magnetizační křivky  $B-H$  a klesá na nízkou hodnotu při vysoké intenzitě magnetického pole, kdy se projevuje nasycení. Feromagnetické a ferimagnetické látky také vykazují magnetickou hysterezi, kde se intenzita magnetizace materiálu mění v závislosti na tom, zda se aplikované magnetické pole zvyšuje v kladném, či záporném smyslu. Typická hysterezní křivka je na Obr. 6 společně s vyznačenými důležitými magnetickými vlastnostmi.



Obr. 6 Hysterezní křivka

Pokud provádíme magnetizaci cyklicky v kruhu (např. vystavením magnetickému poli pocházejícímu ze střídavého proudu), budou zde vznikat hysterezní ztráty přímo úměrné obsahu plochy uvnitř magnetizační křivky. Hodnota hysterezních ztrát se udává v  $\text{J}\cdot\text{m}^{-3}$ .

Remanence: Pokud umístíme feromagnetickou látku do magnetického pole se vzrůstající intenzitou, bude narůstat i magnetizace. V určitém okamžiku dosáhneme nasycené magnetizace  $B_s$  (Obr. 6). Křivka znázorňující závislost magnetizace na poli se nazývá křivka počáteční magnetizace. Jestliže poté necháme intenzitu magnetického pole klesat, nebude magnetizace klesat zpět podle křivky počáteční magnetizace, ale její hodnoty zůstanou vyšší. Pokud pole klesne na nulu a magnetizace nezmizí (Obr. 6), tj. podrží si určitou hodnotu, nazýváme tuto remanenci  $B_r$ .

Koercivita: Pro zpětné dosažení nemagnetického stavu, musíme obrátit směr magnetického pole. Nemagnetického stavu dosáhneme při hodnotě pole  $-H_c$  (Obr. 6) nazvané koercivní silou.

Hystereze: Při dalším zvyšování intenzity magnetického pole začne magnetizace narůstat také v opačném směru až po dosažení nasycené magnetizace. Opětným snižováním intenzity pole dojde ke snižování magnetizace. Při nulovém poli zůstane magnetizace na hodnotě  $-B_r$ . Magnetizace zmizí teprve až při intenzitě pole  $H_c$ . Tento jev, kdy magnetizace při změně intenzity pole zůstává opožděna, se nazývá hysterezí. Uzavřená křivka, znázorňující tento děj, je pak hysterezní smyčka. [22, 25]

Podle tvaru hysterezní smyčky rozlišujeme materiály na magneticky tvrdé, s širokou hysterezní smyčkou, používané pro výroby permanentních magnetů. Materiály s úzkou hysterezní smyčkou jsou magneticky měkké, hodí se pro použití např. v elektrických obvodech se střídavým proudem. U těchto materiálů požadujeme hysterezní smyčku co nejúžší.

Magneticky tvrdé materiály vykazují vysoké hysterezní energetické ztráty. Materiály magneticky měkké mají nízké hysterezní ztráty a je velice obtížné je zmagnetizovat trvale. [22, 25]

U feromagnetických látek je za jejich vlastnosti zodpovědný nevykompenzovaný spinový moment elektronů na nezaplňených hladinách, což způsobuje značný magnetický moment atomu. Feromagnetismus je vlastnost pouze pevných látek s krystalickou strukturou. [22, 23, 25]

Pro většinu aplikací se jako magnetické materiály používají železo, ocel nebo litina. Jsou levné a pevné. Jejich omezení je však pouze na stejnosměrné aplikace z důvodu nízkého elektrického odporu, který by vedl k indukci vířivých proudů při aplikaci ve střídavých magnetických polích. [25, 26]

Curieova teplota: Pod touto teplotou je feromagnetická látka tvořena jednotlivými doménami, tzv. Weissovy domény. Stav spontánní magnetizace (bez vnějšího magnetického pole) je velmi ovlivněno teplotou. Největší magnetizace je při absolutní nule. Při zvyšující se teplotě jednotlivé domény mění svoji orientaci v důsledku tepelného pohybu. Nad Curieovou teplotou dochází u feromagnetické látky ke ztrátě magnetických vlastností a stává se paramagnetikem. Pro její susceptibilitu platí Curieův-Weissův zákon:

$$x = \frac{C}{T - T_c} \quad (7)$$

kde  $T_c$  je Curieova teplota,  $C$  je látkově specifická konstanta [25]

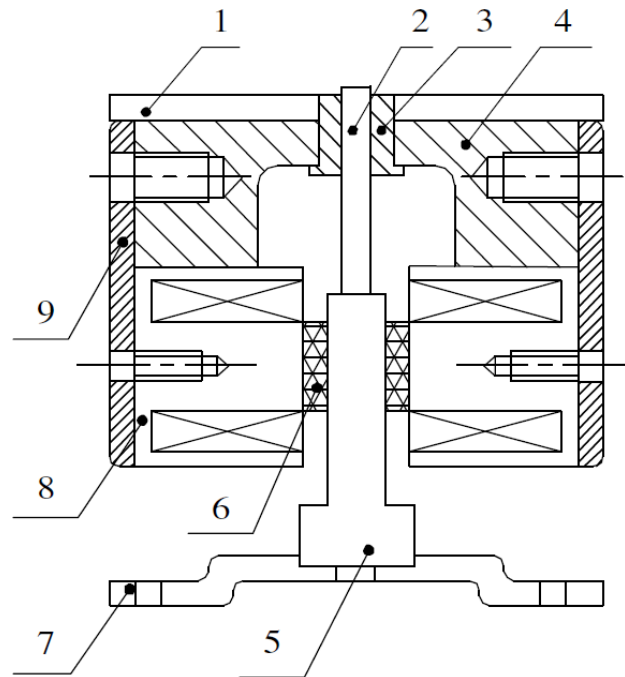
### 3 APLIKACE MRE

Magnetoreologické elastomery jsou slibnými materiály pro aplikaci v mnohých zařízeních umožňujících jednoduchou změnu tuhosti systému. Mezi tyto aplikace patří např. adaptivní laděný tlumič vibrací (ATVA), držáky a závěsy s nastavitelnou tuhostí a povrchy s proměnnou impedancí. Společnost Ford Motor Company patentovala ložisková pouzdra využívající MRE. Tuhost pouzdra je nastavována podle aktuálního pracovního režimu pohonné jednotky automobilu, což přispívá ke komfortu cestujících. [20]

#### 3.1 Adaptivní laděný tlumič vibrací

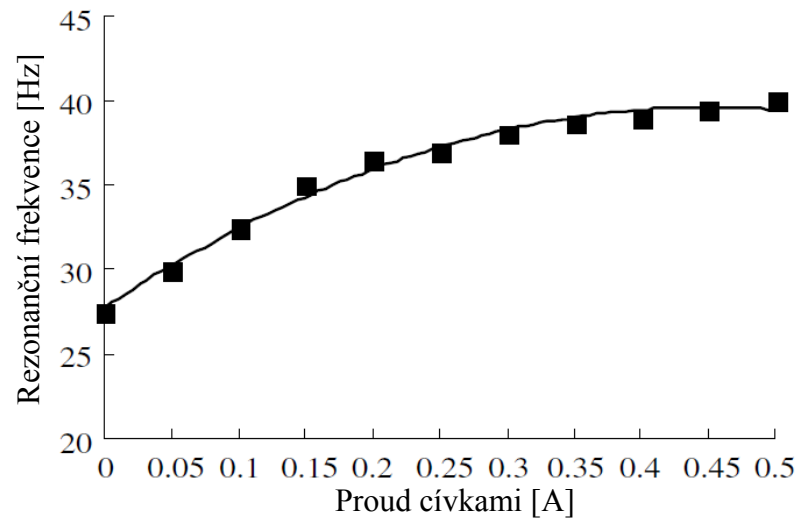
V průmyslových odvětvích je pro pohlcování vibrací běžně používán tradiční tlumič vibrací (dynamic vibration absorber - DVA). Nicméně tento je účinný pouze v úzkém rozsahu pracovních frekvencí, což omezuje jeho aplikaci. Pokročilejším systémem je adaptivní laděný tlumič vibrací (adaptive tuned vibration absorber - ATVA). Ten je založen na unikátních vlastnostech MRE, jejichž modul může být řízen aplikovaným magnetickým polem. Jeho použití je vhodné v aplikacích s časově proměnným zdrojem vibrací nebo s širokým pásmem frekvencí vibrací, kde pasivní absorbér již ztrácí svůj účinek. Systém ATVA může být namáhán např. smykem. Dle experimentálních výsledků může být vlastní frekvence ATVA naladěna v rozsahu např. 27,5 Hz až 40 Hz, či 500Hz až 610 Hz a jiném. Absorbční kapacita systému ATVA je lepší, než u běžného DVA a může dosahovat hodnot až 25 dB.

MRE systému ATVA je složen ze 704 silikonových kaučuků jako matrice, CIP o velikosti 3 - 5  $\mu\text{m}$  a malého množství silikonového oleje. Schématické znázornění systému ATVA je na *Obr. 7*. Skládá se ze tří hlavních částí a to dynamické hmoty, statické hmoty a pružného inteligentního kroužku s MRE. [16]



Obr. 7 Schématické znázornění ATVA: 1 kryt, 2 vodící tyč, 3 lineární ložisko, 4 magnetický vodič, 5 smyková deska, 6 MRE, 7 konsole, 8 elektromagnet, 9 montážní kryt [16]

Elektromagnety a magnetické vodiče tvoří uzavřený magnetický okruh. Jsou připevněny k montážnímu krytu a tvoří dynamickou hmotu. Statická hmota sestává ze smykové desky a konsole. MRE tvoří spojení mezi statickou a dynamickou částí. Pro zajištění pouze smykového namáhání slouží vodící tyč a lineární ložisko. Magnetické pole je vytvářeno dvěma elektromagnetickými cívkami a jeho intenzita je řízena proudem v cívkách. Je zde tedy nutný externí stejnosměrný napájecí zdroj. Smykový modul MRE je řízen změnou intenzity magnetického pole a tedy změnou velikosti proudu protékajícího cívkami. Vlastní rezonanční frekvenci ATVA lze tedy naladit velikostí tohoto proudu. Pokud naladěná frekvence odpovídá budící frekvenci vibrací, mohou být tyto vibrace výrazně utlumeny. Na Obr. 8 je znázorněna závislost rezonanční frekvence ATVA na proudu cívkami. [16]



Obr. 8 Závislost rezonanční frekvence na proudu cívkami [16]

## 4 MAGNETOREOLOGICKÝ EFEKT

MR účinek je nejčastěji připisován polem indukované magnetizaci suspendovaných částic. Obecně lze říci, že magnetické částice používané pro MR systémy musí mít velkou magnetizační saturaci a malou koercivitu (zbytkovou magnetizaci). Musí být aktivní v širokém rozsahu teplot, vykazovat nízkou sedimentaci, nevratnou flokulaci a chemickou degradaci (oxidaci). Míra závislosti mechanické pevnosti MR systémů je určena složením, velikostí částic a jejich objemovým podílem. [14]

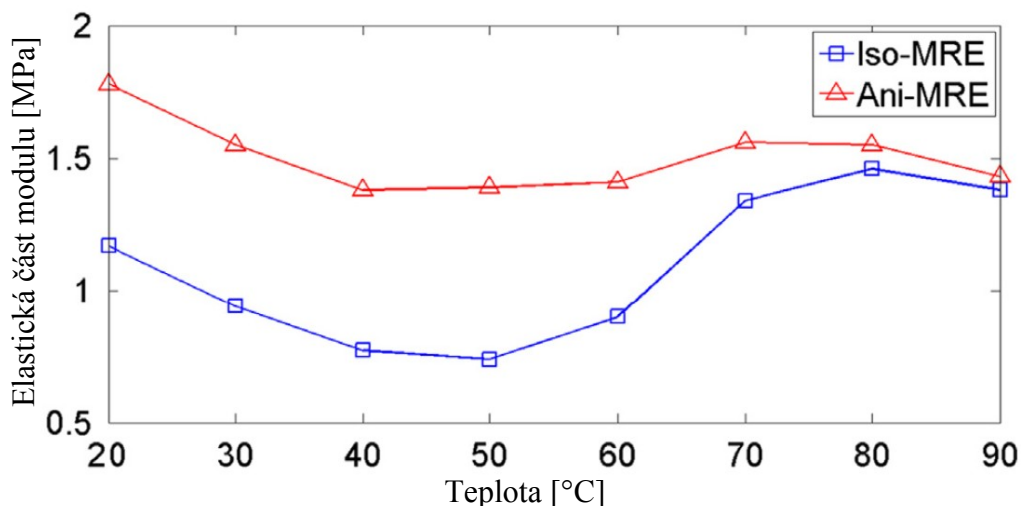
### 4.1 Faktory ovlivňující MR efekt

#### 4.1.1 Vlastnosti feromagnetických částic

Magnetoreologické elastomery jsou známé jako inteligentní materiály. Nicméně, magnetoreologický efekt MRE není v současné době dostatečně vysoký, což omezuje jejich technické aplikace. Předchozí studie ukázaly, že magneticky indukovaný modul pružnosti ve smyku a MR účinek byl určen hlavně vlastnostmi feromagnetických částic. Např. YU Mi-ao a kol. ve své studii "*Influence of composition of carbonyl iron particles on dynamic mechanical properties of magnetorheological elastomers*" ukázali, že obsah uhlíku v částicích karbonylového železa má velký dopad na dynamické mechanické vlastnosti MRE. Magneticky indukovaný modul pružnosti ve smyku a MR efekt může být zvýšen volbou CIP s nízkým obsahem uhlíku. Tlumicí vlastnosti MRE jsou také ovlivněny obsahem uhlíku v CIP. [27]

#### 4.1.2 Vliv teploty

Ve studii Benxiang Ju a kol. "*Temperature-dependent dynamic mechanical properties of magnetorheological elastomers under magnetic field*" byly zkoumány izotropní a anizotropní vzorky MR kompozitu, tvořeného PUR matricí a CIP. Díky unikátní struktuře PUR matrice měla teplota vliv na vlastnosti připravených MRE, zejména izotropních MRE. Vliv teploty na elastickou složku smykového modulu je znázorněn na *Obr. 9*. Se zvyšující se teplotou a intenzitou magnetického pole, dosahoval MR efekt izotropního MRE při teplotě 80 °C hodnoty až 4177 %. Studie ukázala, že MRE je druh materiálu, který v závislosti na teplotě vykazuje i vlastnosti magnetoreologických plastomerů (MRP). MRE jsou často užity v aplikacích, kde jsou vystaveny působení širokému rozsahu teplot. [28]



Obr. 9 Elastická složka smykového modulu v závislosti na teplotě pro izotropní a anizotropní vzorek v magnetickém poli [28]

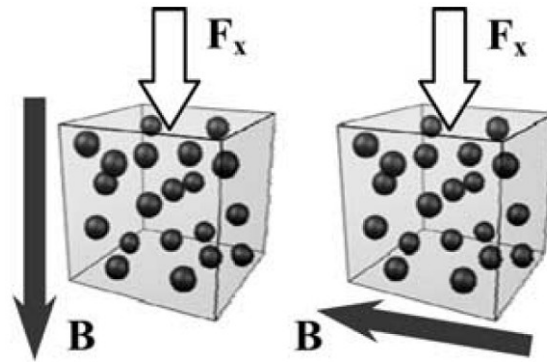
Zhang a kol. v článku "*Temperature-dependent mechanical properties and model of magnetorheological elastomers*" vyrobili MRE s matricí na bázi směsi cis-polybutadienu a přírodního kaučuku. Jejich výsledky ukazují, že modul MRE pouze s cis-polybutadienovým kaučukem s nárůstem teploty vždy klesá, ale modul MRE, který obsahoval pouze přírodní kaučuk, nejprve poklesl, avšak s dalším nárůstem teploty se zvyšoval. Studie mechanických vlastností MRE v závislosti na teplotě mají velký význam pro praktické aplikace. [17]

#### 4.1.3 Vliv koncentrace částic a působení magnetického pole

Koncentrace magnetických částic má také významný vliv na vlastnosti MRE. Obecně lze říci, že pro dosažení významnějšího MR efektu by obsah magnetizovatelných částic měl být větší, než 50 % hm. (přibližně 12,3 % obj.). Při vysokém stupni plnění však dochází ke zhoršení mechanických vlastností kompozitu, což znesnadňuje praktické uplatnění MRE. Maximálního magnetoreologického účinku na tuhost kompozitu je dosaženo při poměrně vysokém stupni plnění, (okolo 30 % obj.). Vysoký obsah železa ovšem, jak již bylo zmíněno, vede ke zhoršení mechanických vlastností a má špatný vliv na dlouhodobou stabilitu MRE. [29]

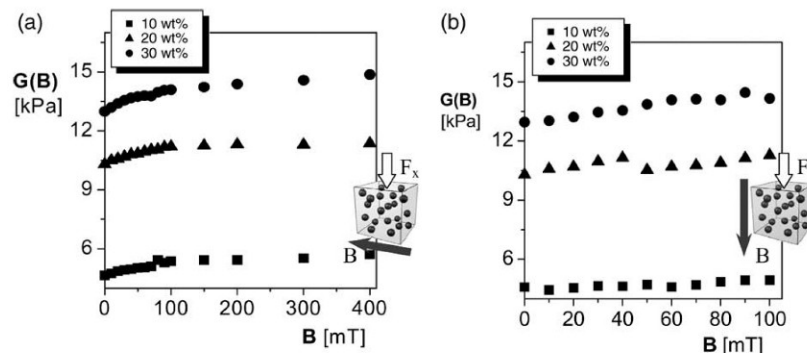
Pokud MRE obsahuje magnetické částice dispergované náhodně, mohou nastat dva základní případy. Působící síla ( $F_x$ ) a směr magnetického pole (magnetická indukce,  $B$ ) mohou být paralelní (Obr. 10 vlevo), nebo navzájem kolmé (Obr. 10 vpravo). [30]





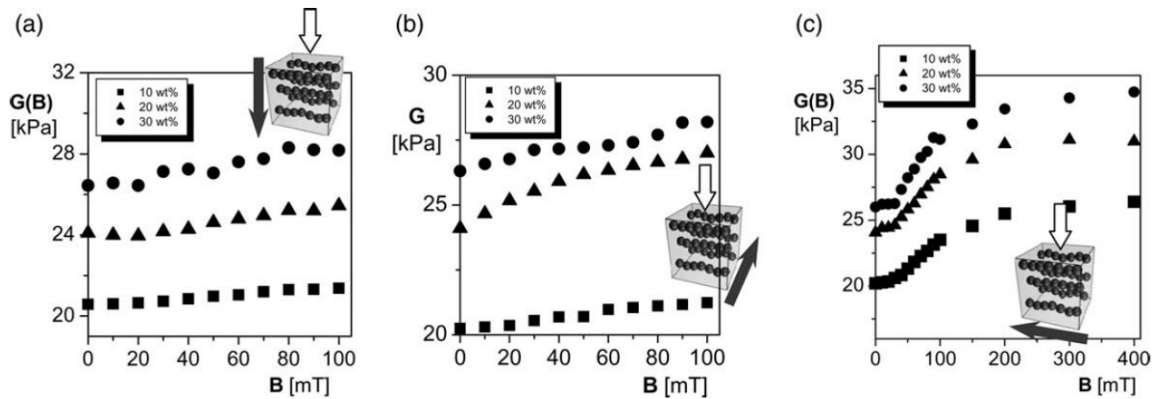
Obr. 10 Izotropní magnetický elastomer [30]

Účinek homogenního magnetického pole na modul pružnosti MRE připravených z polydimetylsiloxanu (PDMS) jako matrice plněné železnými částicemi s náhodnou distribucí je pak na Obr. 11. Velikost modulu je znázorněna pro tři stupně plnění elastomeru Fe částicemi (10, 20, a 30 hm. %). V případě a) je směr mag. pole kolmý na směr působící síly, v případě b) je mag. pole rovnoběžné s působící silou. V obou případech dochází jen k nepatrnému zvýšení modulu při aplikaci vnějšího mag. pole. Elastomer s vyšším obsahem Fe vykazuje vyšší modul. [30]



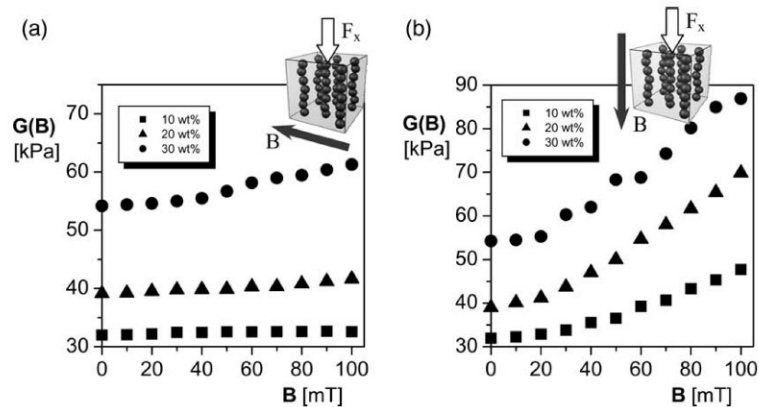
Obr. 11 Vliv mag. pole na elastický modul MRE obsahující různá množství CIP [30]

K výraznějšímu MR efektu dojde v případě anizotropního uspořádání CIP v matrici. Toho lze docílit, pokud vytvrzování kompozitu probíhá v homogenním mag. poli. Anizotropie se projevuje i jako směrově závislý elastický modul pružnosti. Vzájemná prostorová orientace síly, mag. pole a uspořádání částic mají potom rozhodující vliv na MR efekt. Slabý účinek má pole kolmé na orientaci řetězcovitých struktur (Obr. 12 a) a b)). Pokud je mag. pole rovnoběžné s řetězcovitým uspořádáním Fe částic, modul pružnosti se výrazně zvyšuje (Obr. 12 c)). [30]



Obr. 12 Vliv mag. pole na elastický modul [30]

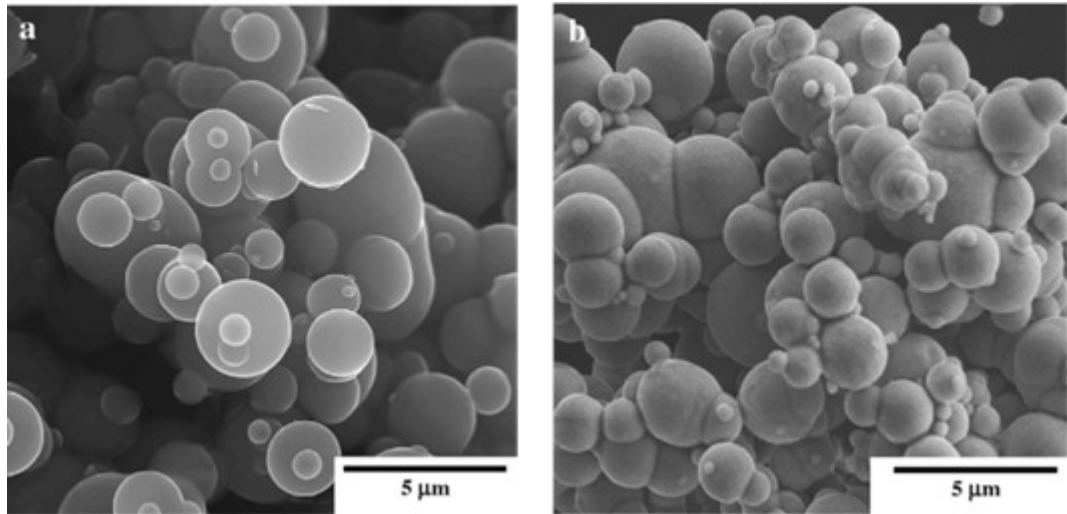
Pokud je směr mechanického namáhání MRE rovnoběžný se zarovnanými částicemi, mo-  
ho nastat dvě situace (Obr. 13). Směr mag. pole je buď kolmý, nebo rovnoběžný se zřetě-  
zenými strukturami. V prvním případě (Obr. 13 a)) nemá mag. pole významnější vliv na  
modul. Dočasný ztuzující efekt působením vnějšího mag. pole je nejvýraznější, pokud jsou  
aplikované pole, seřazené částice a mech. namáhání rovnoběžné (Obr. 13 c)). Ve všech  
případech, pokud se zvýší obsah železa, zvýší se také interakce částic, což má za následek  
nárůst modulu. [30]



Obr. 13 Vliv mag. pole na elastický modul [30]

## 4.2 Modifikace povrchu CIP

Za účelem zvýšení stability komerčně vyráběného karbonylového železa a zamezení koro-  
ze lze CI prášek potáhnout izolační vrstvou např. polyanilinu (PANI) za použití povrchově  
stabilizovaného kolidního PANI v chloroformu. PANI pokryje jednotlivé částice prášku  
vrstvou tenkou ve stovkách nanometrů. Na Obr. 14 je pro srovnání snímek ze SEM pro a)  
nepotažené částice CI a b) CI částice potažené vrstvou PANI. [21]



*Obr. 14 SEM fotografie a) nepotažený CI b) CI potažený vrstvou PANI [21]*

Krycí vrstva PANI má při pokojové teplotě zanedbatelný vliv na magnetické a dielektrické spektrum polymerních kompozitů plněných CI. Podle studie komplexní permitivity v závislosti na teplotě a frekvenci se ukázalo, že kompozity obsahující CI potažené PANI mají na teplotě nezávislé dielektrické spektrum. Oproti tomu komplexní permitivita polymerních kompozitů s čistým CI prudce poklesla při zvýšené teplotě. Zvýšenou stabilitu CI potaženým PANI prokázala také termogravimetrická analýza (TGA). Vrstva PANI tedy zabraňuje oxidaci a působí preventivně proti korozi magnetických částic CI. [21]

## 5 CÍLE PRÁCE

Podle zadání diplomové práce byly stanoveny tyto cíle:

- vybrat vhodné materiály pro přípravu magnetoreologických kompozitů
- připravit vzorky magnetoreologických kompozitů o různých parametrech
- reologická měření připravených kompozitů v přítomnosti magnetického pole
- vyhodnocení získaných výsledků

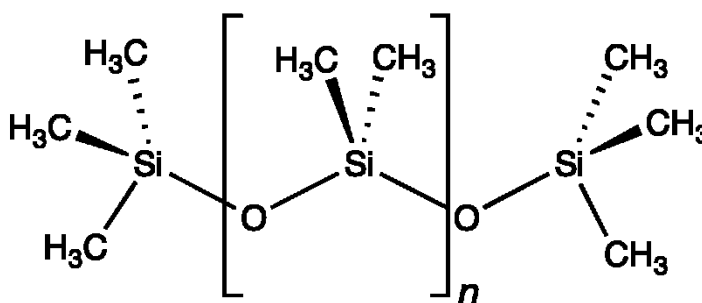
## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

## 6 MATERIÁLY

Praktická část diplomové práce se zabývá magnetoreologickými kompozity tvořenými silikonovým elastomerem SYLGARD 184 PDMS plněným částicemi karbonylového železa. Celkem bylo připraveno 8 vzorků kompozitu, u nichž byl zkoumán vliv anizotropie vnitřní struktury kompozitu, koncentrace, velikosti částic plniva a intenzity magnetického pole na magnetoreologické vlastnosti.

### 6.1 PDMS

Jako matrice pro přípravu MRE byl použit silikonový elastomer pod obchodním názvem SYLGARD 184 od výrobce Dow Corning. Z hlediska chemického složení se jedná o polydimetylsiloxan, jehož struktura je na *Obr. 15*.



*Obr. 15 Chemická struktura polydimetylsiloxanu*

Jedná se o dvoukomponentní systém, s tvrdidlem na Pt bázi se mísí v poměru 10:1. Vybrané materiálové charakteristiky jsou uvedeny v *Tab. 1*.

*Tab. 1 Charakteristické vlastnosti PDMS [31]*

|                                   |                         |
|-----------------------------------|-------------------------|
| Viskozita (základní)              | 5,1 Pa.s                |
| Viskozita (směs s tvrdidlem)      | 3,5 Pa.s                |
| Měrná hmotnost (po vytvrzení)     | 1,03 g.cm <sup>-3</sup> |
| Pracovní čas při 25°C (Pot Life)  | 1,5 hod.                |
| Doba vytvrzování při 25°C         | 48 hod.                 |
| Doba vytvrzování při 100°C        | 35 min                  |
| Dielektrická pevnost              | 19 kV.mm <sup>-1</sup>  |
| Dielektrická konstanta při 100 Hz | 2,72                    |

Mezi základní přednosti PDMS patří:

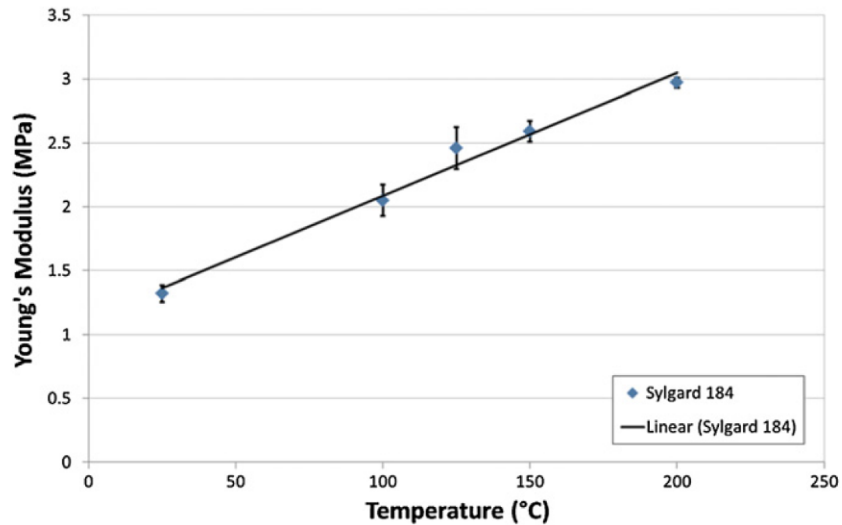
- nízká viskozita
- možnost vytvrzování při pokojové i zvýšené teplotě
- dobré dielektrické vlastnosti
- rychlý, univerzální způsob zpracování kontrolovatelný teplotou
- vysoká transparentnost

Praktické aplikace PDMS:

- zapouzdření LED osvětlení
- zdroje
- konektory
- snímače
- relé
- obal rezistorů pro vysoké napětí
- adhesivum/enkapsulant pro solární články [31]

Elastomer PDMS je často využíván také pro měkké litografické replikace mikrostruktur v mikroskopických a mikro-inženýrských aplikacích. Vyznačuje se vysokou pružností, čehož se využívá pro výrobu mikrofluidních systémů a pro použití v mikro elektromechanických systémech (MEMS). Hlavními výhodami systémů na bázi PDMS je nízká cena, rychlá, jednoduchá výroba a optická transparentnost přes viditelné spektrum až do 240 nm. Má však také určitá omezení, především je to špatná chemická kompatibilita, kdy ve styku s organickými rozpouštědly dochází k botnání. Další nevýhodou je nízká tvrdost, což brání použití k vysokotlakým aplikacím. [32]

Na *Obr. 16* je závislost výsledného Youngova modulu na teplotě vytvrzování PDMS.



Obr. 16 Závislost výsledného Youngova modulu na teplotě vytvrzování pro Sylgard 184 [32]

## 6.2 Carbonyl Iron

Pro přípravu MR kompozitů bylo použito Fe prášků CI-SL a CI-HQ. Vzájemně se liší velikostmi částic a distribucí velikosti částic.

### 6.2.1 CI-SL

Jedná se o částice karbonylového železa s označením SL-GRADE od výrobce BASF. Distribuce částic je  $d_{90}$  (90 % částic je menších) = 9  $\mu\text{m}$ . Tyto částice se již nevyrábí, nejpodobnější chem. složení a velikost mají částice s označením CI-CN od téhož výrobce s obsahem Fe 99,5 %, obsah C max. 0,03 %, obsah N max. 0,01 %, obsah O max. 0,1 - 0,25 %. Tvar je kulovitý, povrch není modifikovaný. [33]

### 6.2.2 CI-HQ

Částice karbonylového železa HQ-GRADE od firmy BASF mají kulovitý tvar, nemodifikovaný povrch. Dle údajů výrobce je obsah Fe min. 97,8 %, obsah C max. 0,6 - 0,9 %, obsah N max. 0,6 - 0,9 %, obsah O max. 0,3 - 0,5 %. Hodnota  $d_{50}$  = 2  $\mu\text{m}$ . [33]



## 7 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

### 7.1 Příprava vzorků kompozitu

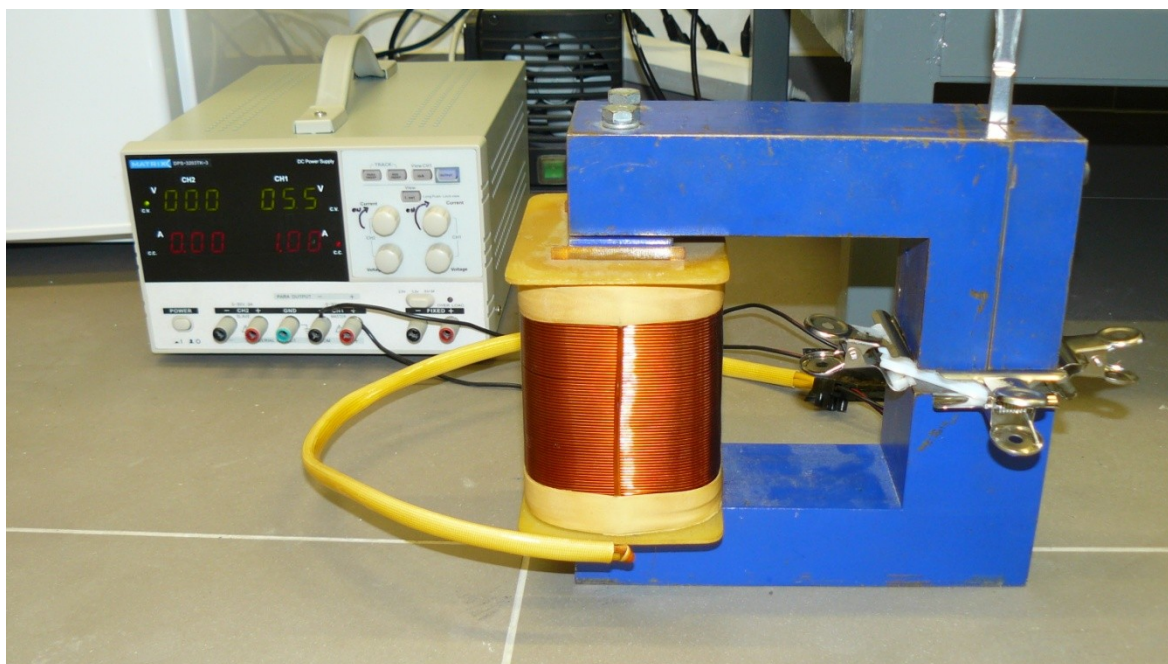
Jak již bylo zmíněno, celkem bylo postupně připraveno 8 vzorků kompozitu. Čtyři vzorky s anizotropní strukturou, čtyři s izotropní strukturou. Pro každou čtveřici pak dva vzorky se stupněm plnění 35 hm. % a dva s plněním 70 hm. %. Použita byla dvě různá plniva, a to prášek karbonylového železa CI-SL a CI-HQ, oba od firmy BASF. Označení, složení a struktura jednotlivých MR kompozitů je uvedena v *Tab. 2*.

*Tab. 2 Označení jednotlivých MR kompozitů*

|        | Anizotropní kompozit |                    | Izotropní kompozit |                    |
|--------|----------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Plnivo | Plnění<br>35 hm. %   | Plnění<br>70 hm. % | Plnění<br>35 hm. % | Plnění<br>70 hm. % |
| CI-SL  | 35SL-anizo           | 70SL-anizo         | 35SL-izo           | 70SL-izo           |
| CI-HQ  | 35HQ-anizo           | 70HQ-anizo         | 35HQ-izo           | 70HQ-izo           |

Pro přípravu vzorku byla použita teflonová forma ve tvaru válce s výškou  $h = 1$  mm a průměrem  $D = 20$  mm. Navažování a míchání jednotlivých složek směsi probíhalo při běžné pokojové teplotě na analytických vahách. Nejprve se do třecí misky navázil pomocí stříkačky silikonový elastomer SYLGARD 184, následně se do něj nakapal stříkačkou s jehlou tvrdidlo v hmotnostním poměru 10:1 dle údajů výrobce. Poté se ke směsi přidalo vypočtené množství příslušného CI prášku. Takto navážená směs se po dobu 10 minut rozmíchávala v třecí misce. Tato byla následně umístěna na 30 minut do evakuační komory s teplotou 20 °C a tlakem 40 mbar, aby ze směsi vydifundoval veškerý vzduch. Po vyjmutí z evakuační komory byla směs odléta do formy a forma se zajistila svorkami. V případě izotropního kompozitu byla forma umístěna přímo do předem vytemperované sušárny na 180 minut při teplotě 60 °C. Forma s anizotropním kompozitem byla vložena do elektromagnetu (*Obr. 17*), který během vytvrzování kompozitu generoval homogenní magnetické pole. Elektromagnet byl předem vytemperován v sušárně na teplotu 60 °C. Jako zdroj stejnosměrného proudu cívkou elektromagnetu byl použit běžný laboratorní elektrický zdroj. Proud cívkou byl nastaven na hodnotu 1 A (DC). Tento proud generoval v kompozitu mag. pole o indukci 220 mT. Přesná hodnota magnetické indukce byla změřena teslametrem, typ FH 51 od výrobce MAGNET-PHYSIK. Elektromagnet i s formou byl poté vložen do su-

šárny taktéž na dobu 180 minut při teplotě 60 °C. Po vytvrzení byly jednotlivé vzorky označeny a umístěny do eksikátoru.



*Obr. 17 Elektromagnet s vloženou formou zajištěnou svorkami. Vlevo vzadu je vidět laboratorní zdroj DC proudu cívkou.*

## 7.2 Charakterizace částic

### 7.2.1 SEM 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 elektronový mikroskop, který je schopen dosáhnout zvětšení  $25\times - 1\,000\,000\times$ . Oproti tomu maximální efektivní zvětšení optického mikroskopu je  $1000\times$ . V současnosti jsou nejlepší skenovací elektronové mikroskopy schopny dosáhnout rozlišení až 0,4 nm. [34 - 36]

Primární svazek elektronů urychlený vysokým napětím v řádu jednotek až desítek kV dopadá na povrch zkoumaného vzorku. Přitom dochází k uvolnění sekundárních elektronů, které jsou snímány detektory. Obraz je následně zvětšen a za pomoci stínítka převeden na viditelné záření, zaznamenané CCD kamerou. [34 - 36]

Detekovány jsou sekundární elektrony (SE), což jsou primárním svazkem excitované elektrony z vnějších slupek atomů a odražené elektrony (BSE), které jsou ovlivněny atomovým jádrem. Detekce SE přináší informaci o reliéfu vzorku s velkým rozlišením a se značně velkou hloubkou ostrosti. Detekce odražených elektronů přináší více informací o chemickém složení vzorku. Nejprůnosnějším režimem BSE je kompozitní režim, kde jsou od sebe rozlišeny oblasti s odlišným prvkovým složením – oblast s prvky s nízkým protonovým číslem jsou tmavé, oblasti s prvky s vyšším protonovým číslem jsou světlé. [34 - 36]

### 7.2.2 VSM

Magnetické vlastnosti částic byly zkoumány pomocí vibračního magnetometru Lakeshore, USA. Měření proběhlo při pokojové teplotě v magnetickém poli o rozsahu -800 až 800 kA.m<sup>-1</sup>.

## 7.3 Charakterizace kompozitu

### 7.3.1 SEM kompozitu

Snímky ze SEM připravených MR kompozitů byly dále využity ke zhodnocení distribuce částic a vnitřních struktur.

### 7.3.2 Magnetoreometrie

Magnetoreologické charakteristiky vzorků kompozitu byly změřeny na reometru pracujícím v oscilačním režimu. Jedná se o typ Anton Paar MCR 502 vybavený magnetickým zdrojem PS-MRD170. Pro měření byla použita geometrie PP20/MRD typu deska-deska o průměru 20 mm. Vzdálenost mezi deskami byla zvolena tak, aby normálová síla působící na vzorek, dosahovala hodnoty 3 N. Měření probíhalo při pokojové teplotě. Každý vzorek kompozitu byl změřen nejprve bez přítomnosti magnetického pole a následně s polem o intenzitách 290, 577, 865, 1152, 1439 kA.m<sup>-1</sup>. Hodnoty pole byly změřeny pomocí teslametru (Magnet-Physik, FH 51, Dr. Steingroever GmbH, Germany). Měření v oscilačním režimu bylo provedené pomocí tzv. sweepu, kdy byly měřeny hodnoty elastického a ztrátového modulu v závislosti na postupně narůstající nezávislé proměnné. Pro určení oblasti lineární viskoelastivity byl nejprve změřen deformační sweep v rozsahu 0,01 - 1 % při konstantní frekvenci 1 Hz. Po vyhodnocení následoval frekvenční sweep v rozsahu frekvencí 0,1 - 10 Hz. Při tomto měření se zjišťovala závislost viskoelastických modulů na

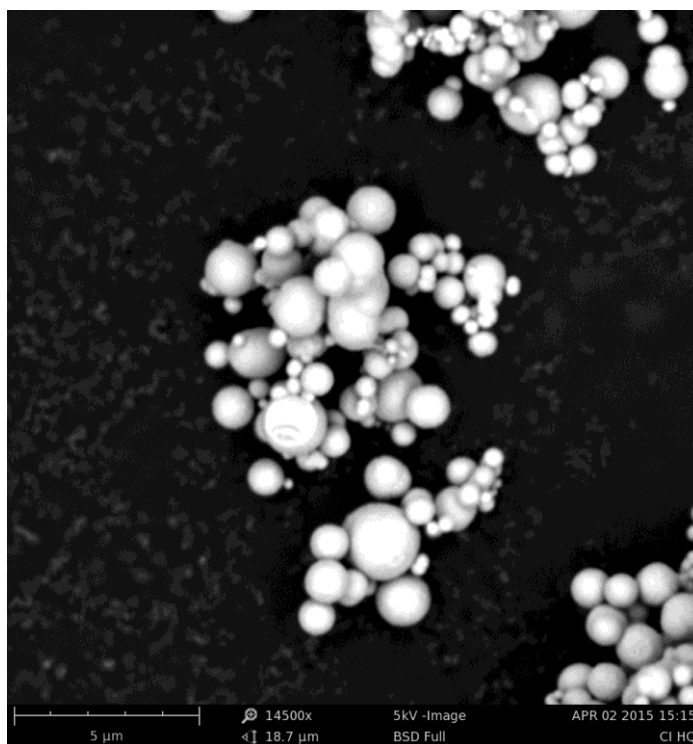
frekvenci při konstantní deformaci 0,1 %, tj. hodnotě deformace ze zjištěné oblasti lineární viskoelasticity.

## 8 VÝSLEDKY A ZHODNOCENÍ

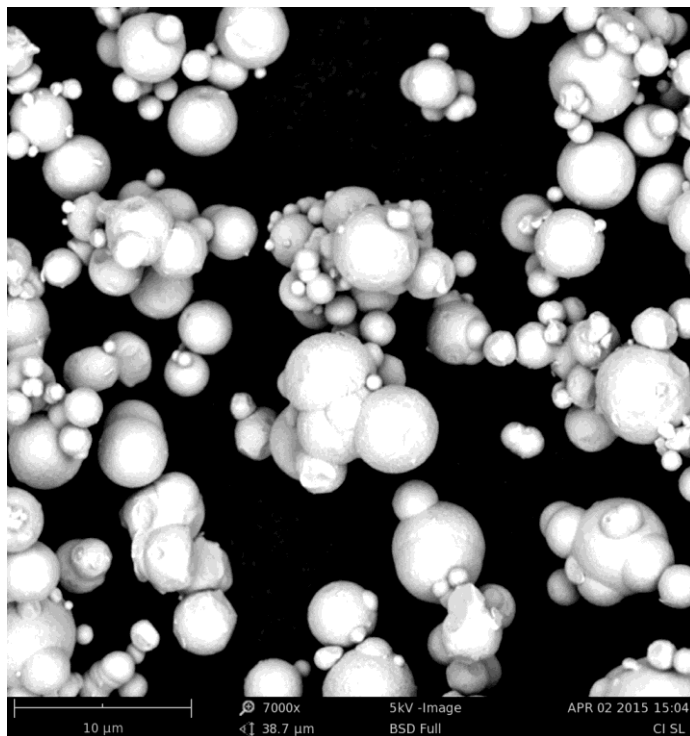
### 8.1 SEM částic

Velikost, tvar a morfologie povrchu použitých částic karbonylového železa s označením CI-SL a částic karbonylového železa CI-HQ od firmy BASF byla zachycena pomocí SEM. K tomuto účelu byl použit mikroskop PHENOM DESKTOP SEM a urychlovací napětí 5 kV. Všechny snímky v této práci byly pořízeny za pomoci SE z důvodu větší hloubky pole. Snímek částic CI-HQ je na *Obr. 18*. Jak je patrné, částice mají pravidelný sférický tvar. Distribuci částic nelze pomocí této metody vyhodnotit přesně, lze ji pouze odhadnout. Pro CI-HQ se pohybuje od desetin mikrometru až po největší částice velikosti 2  $\mu\text{m}$ .

Na *Obr. 19* je snímek částic CI-SL. Mají taktěž sférický tvar, distribuce velikostí je přibližně od 1 do 10  $\mu\text{m}$ . Oproti CI-HQ je ve vzorku více částic nepravidelného protáhlého tvaru, což bylo zřejmě způsobeno slinutím několika částic při jejich výrobě.



*Obr. 18 SEM snímek částic CI-HQ*



*Obr. 19 SEM snímek částic CI-SL*

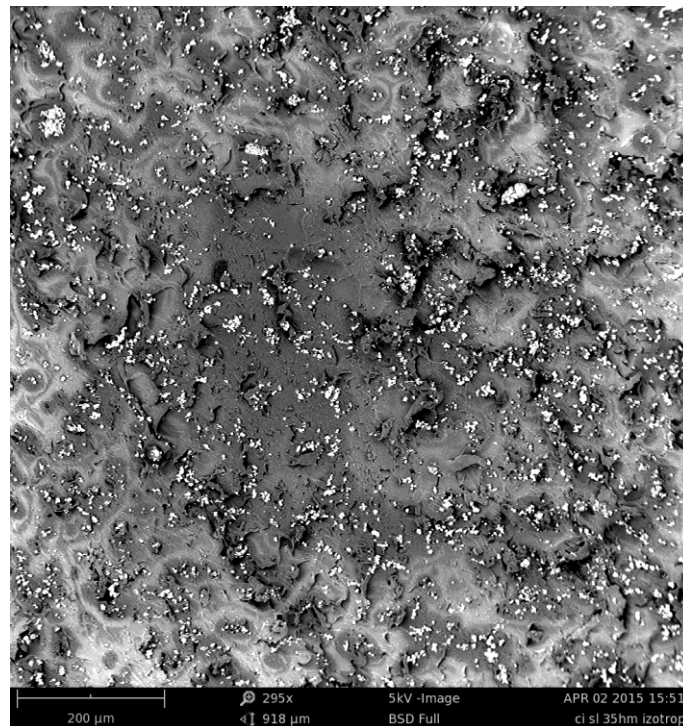
## 8.2 SEM kompozitu

K vyhodnocení vnitřní struktury připravených vzorků kompozitu byl taktéž použit skenovací elektronový mikroskop PHENOM DESKTOP SEM, urychlovací napětí 5 kV a zobrazení pomocí SE.

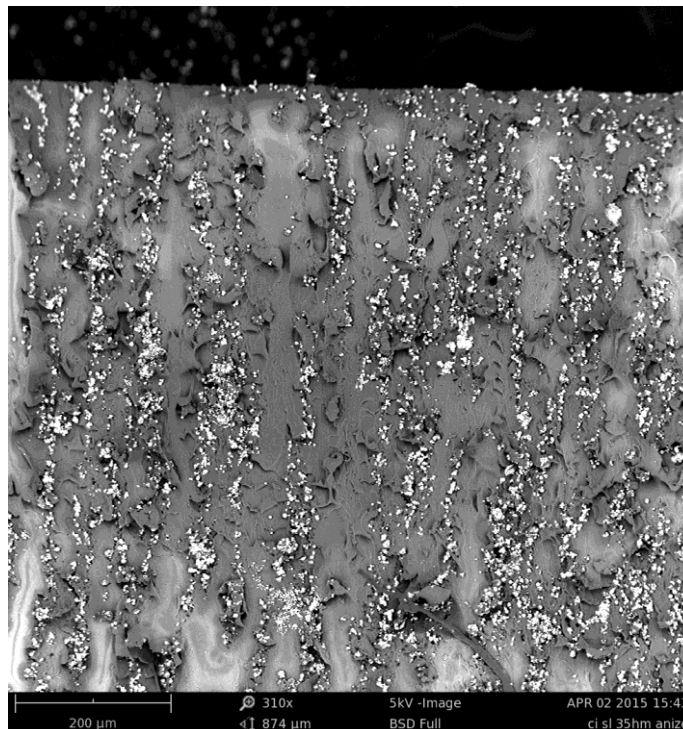
Zhodnocení vnitřní struktury kompozitu bylo provedeno na vzorcích 35SL-izo a 35SL-anizo. Na *Obr. 20* je snímek řezu kompozitem 35SL-izo. Kompozit byl vytvrzován bez přítomnosti magnetického pole, distribuce částic je tedy podle předpokladu zcela náhodná. Nejsou zde patrné žádné orientované struktury. Řez kompozitem 35SL-anizo je na *Obr. 21*. Jsou zde jasně viditelné anizotropní struktury, kdy došlo během vytvrzování v magnetickém poli ke zřetězení částic CI ve směru magnetických siločar. Vytvrzením kompozitu se tato struktura zafixovala a zůstává zachována i po odstranění magnetického pole. Na *Obr. 22* je pak detailněji zachycena řetězcovitá struktura.

Ze všech tří snímků (*Obr. 20 - Obr. 22*) je však patrné, že se během přípravy kompozitu nepodařilo dosáhnout dokonalé dispergaci plniva a částice místy tvoří agregáty. Na *Obr. 23* je bližší pohled na jeden klastr v 35SL-izo kompozitu. Zde je také patrné, že částice CI plniva nemají dobrou adhezi k silikonové matici, každá jednotlivá částice by měla být

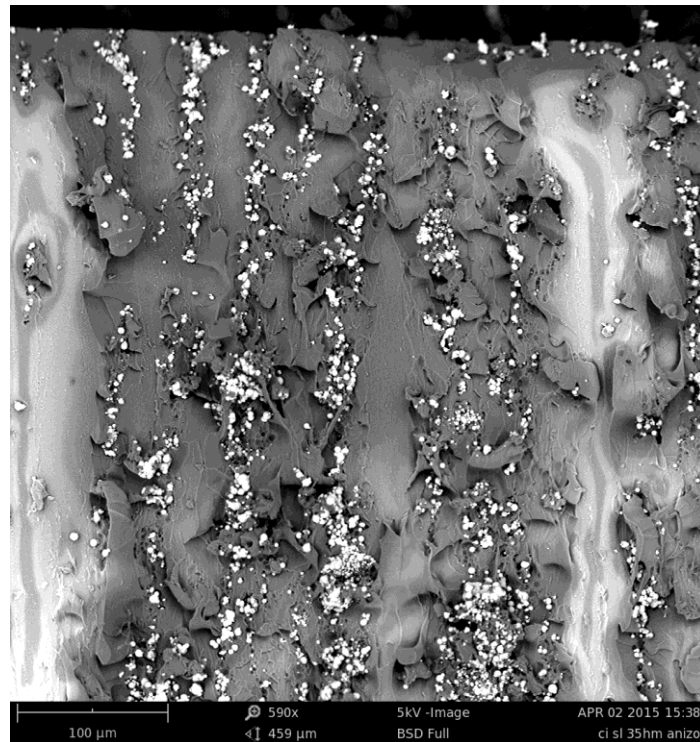
obalena pojivem. Tento problém by bylo možné vyřešit potažením CIP vrstvičkou kompatibilizátoru, ať již ve formě polymeru nebo povrchově aktivní látky.



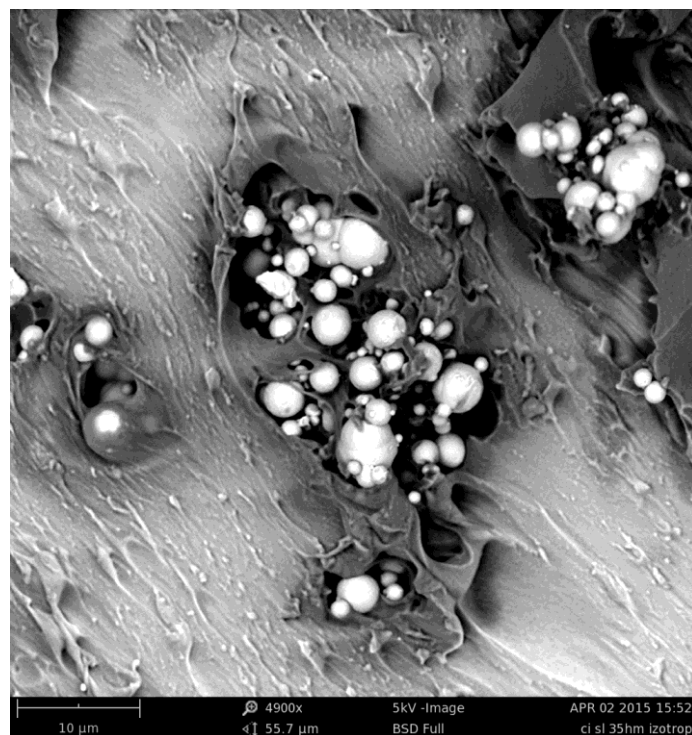
*Obr. 20 SEM snímek řezu kompozitem 35SL-izo*



*Obr. 21 SEM snímek řezu kompozitem 35SL-anizo*



*Obr. 22 SEM snímek řezu kompozitem 35SL-anizo s detailem na uspořádané řetězcovité struktury CI*

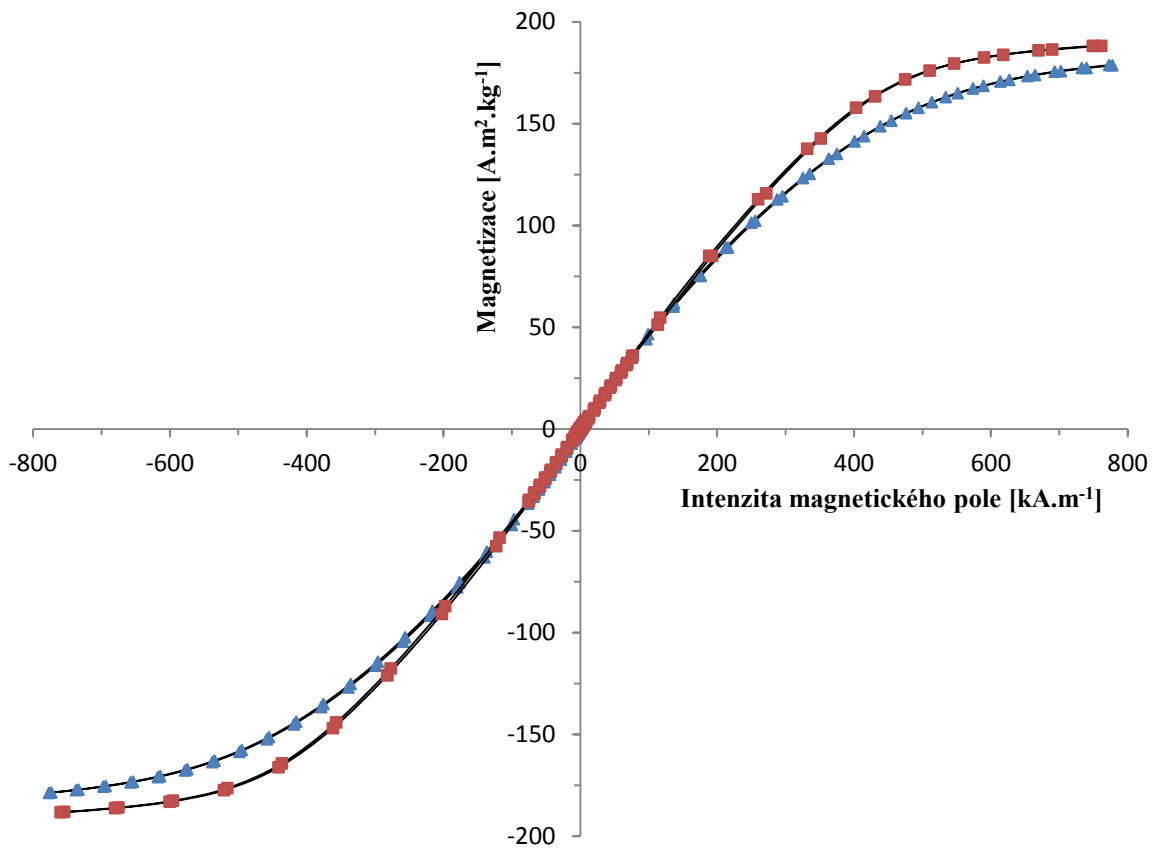


*Obr. 23 SEM snímek řezu kompozitem 35SL-izo s detailem na klastr částic CI*



### 8.3 VSM

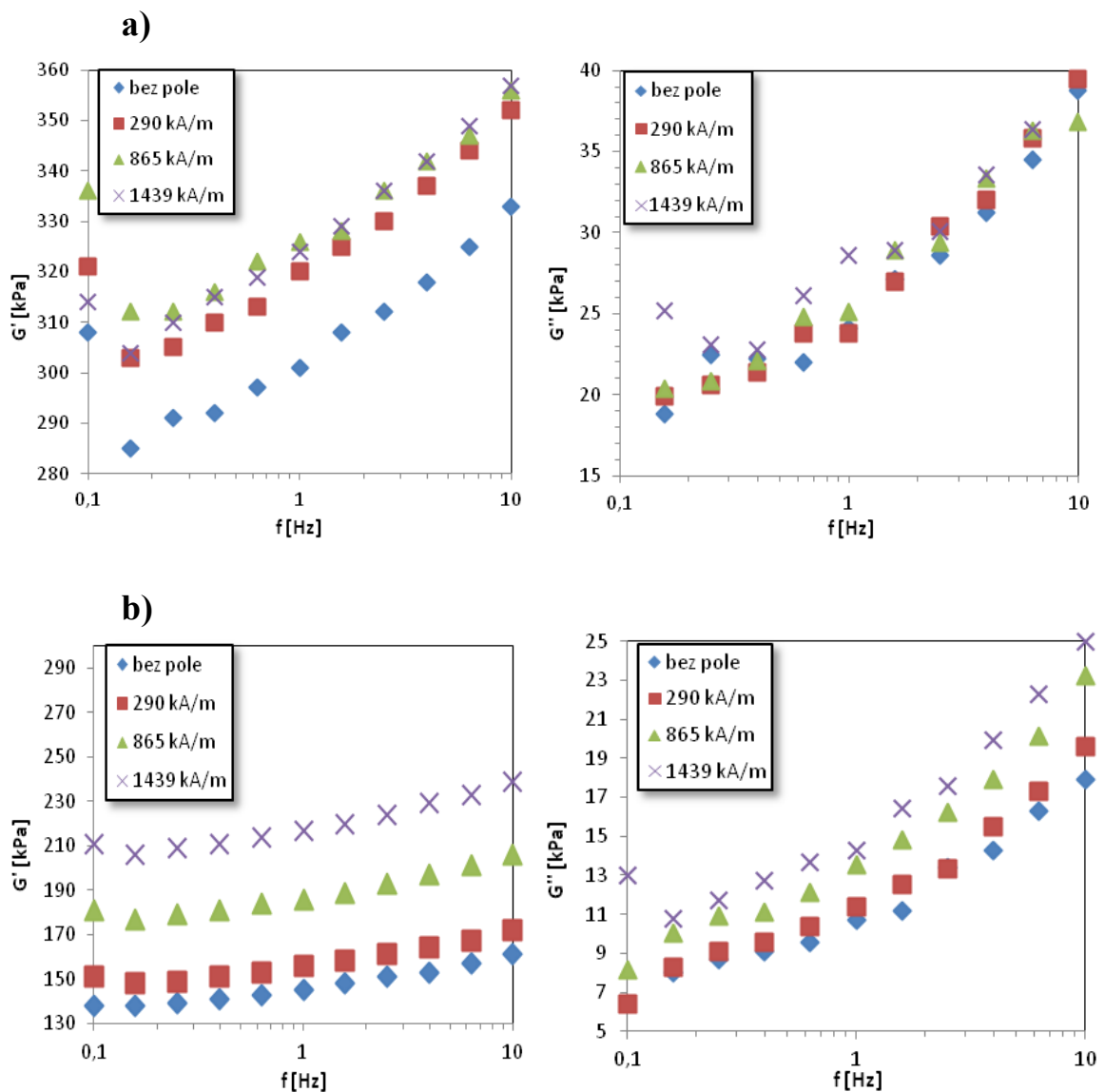
Na *Obr. 24* je vidět srovnání magnetizačních křivek částic CI-SL a CI-HQ. Z naměřené závislosti je patrné, že vyšší hodnoty magnetické saturace dosahují částice CI-HQ ( $188 \text{ A}\cdot\text{m}^2\cdot\text{kg}^{-1}$ ) oproti CI-SL částicím ( $179 \text{ A}\cdot\text{m}^2\cdot\text{kg}^{-1}$ ). Magnetizace je důležitá vlastnost z hlediska MRE, jelikož přímo ovlivňuje jeho schopnost měnit modul v závislosti na intenzitě mag. pole. Připravené vzorky kompozitu s částicemi CI-HQ by tedy měly při stejném plnění vykazovat větší závislost modulu na intenzitě mag. pole oproti kompozitům s CI-SL částicemi, avšak až při hodnotách intenzity mag. pole blízkých magnetickému nasycení. Nicméně další roli zde může sehrát rozdílná interakce částic s polymerní maticí.



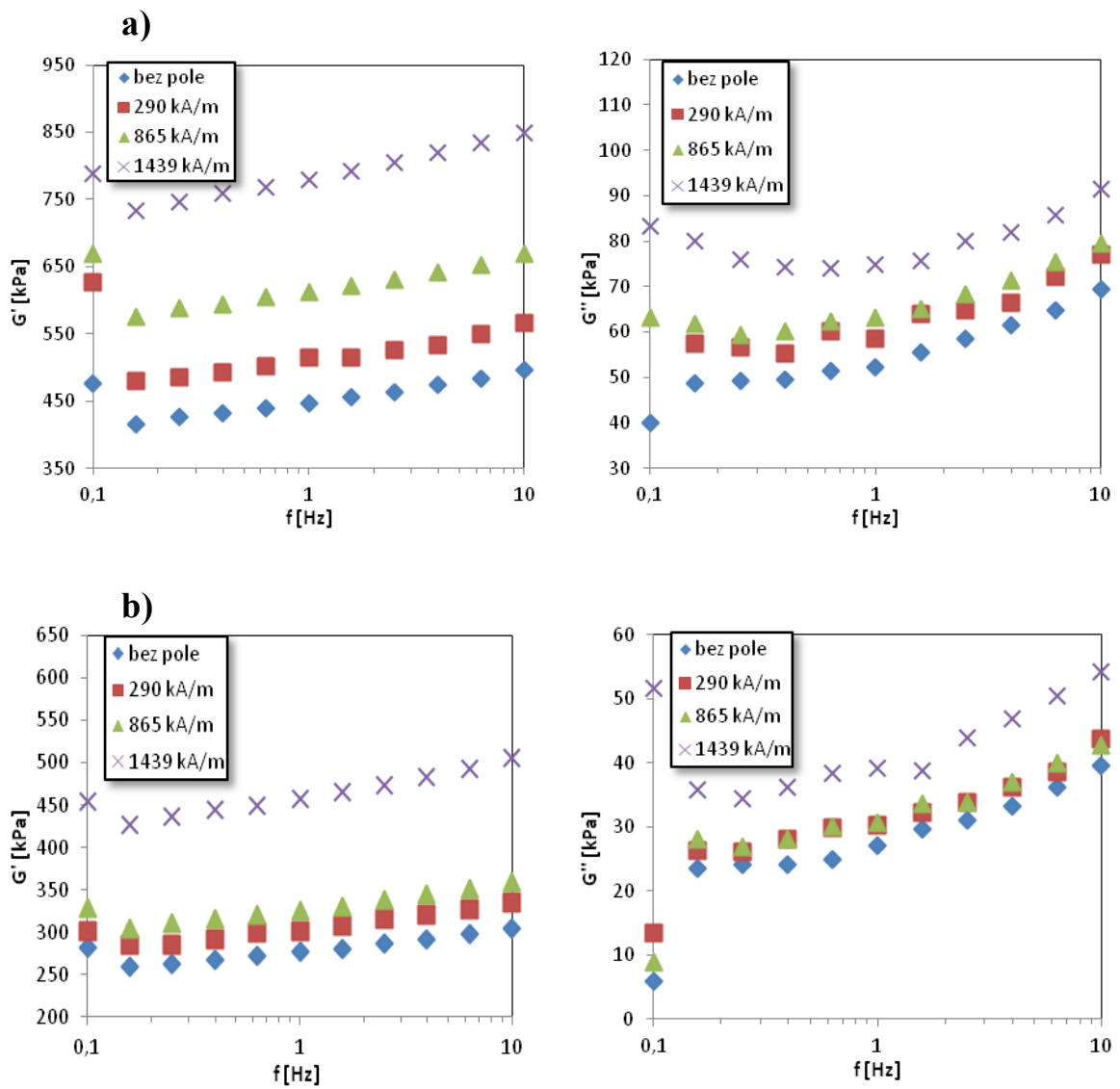
*Obr. 24* Naměřená hysterezní smyčka pro částice CI SL (▲) a CI HQ (■)

## 8.4 Magnetoreometrie

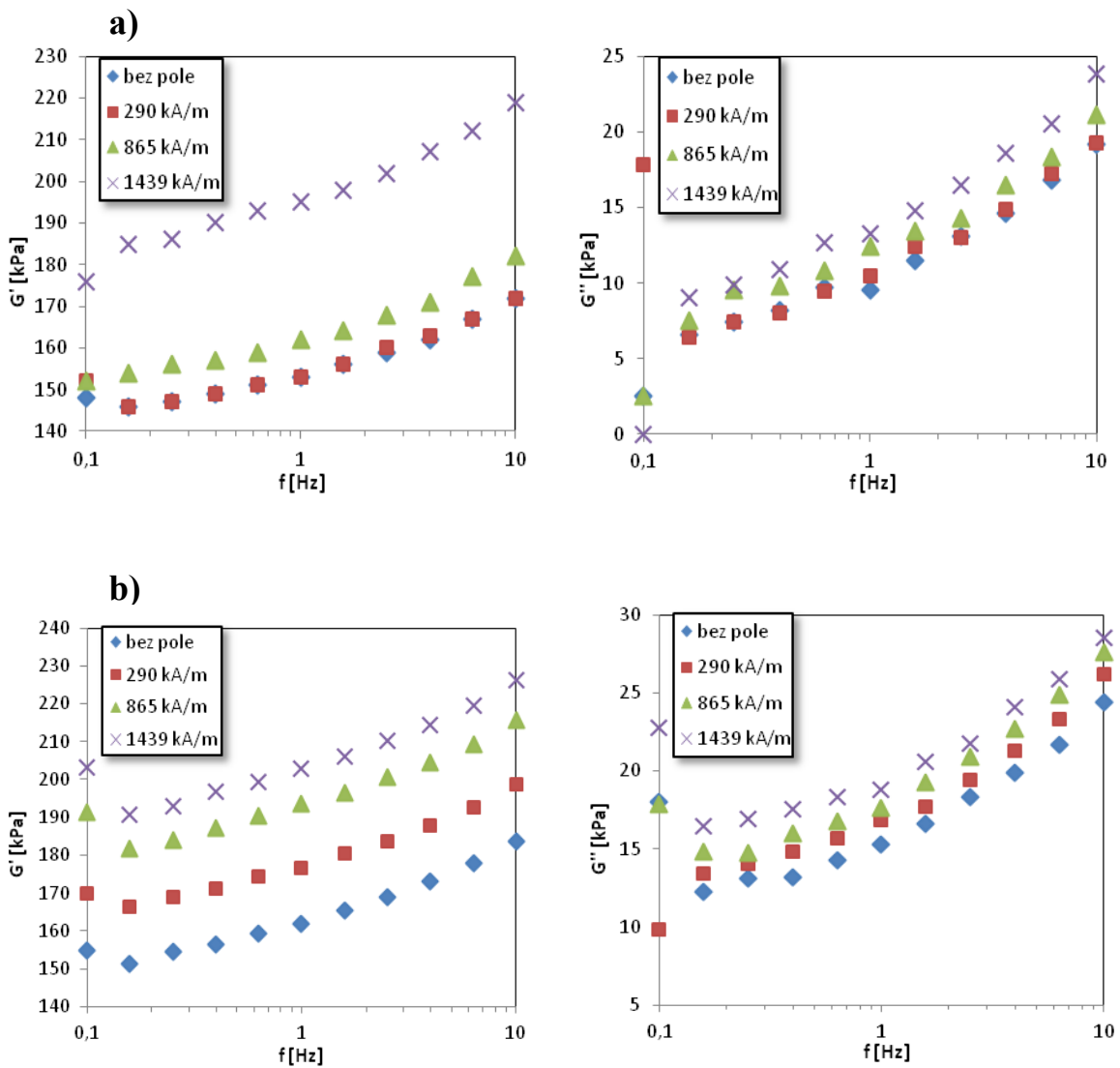
V následujících grafech (Obr. 25 - Obr. 28) jsou znázorněny výsledky měření frekvenčního sweepu vždy pro čtyři různé hodnoty intenzity mag. pole. Pokud srovnáme frekvenční závislosti elastického modulu všech vzorků, je patrné, že ve všech případech se modul v závislosti na frekvenci deformace rovnoměrně zvyšuje, s celkovým nárůstem přibližně o 15 - 20 %.



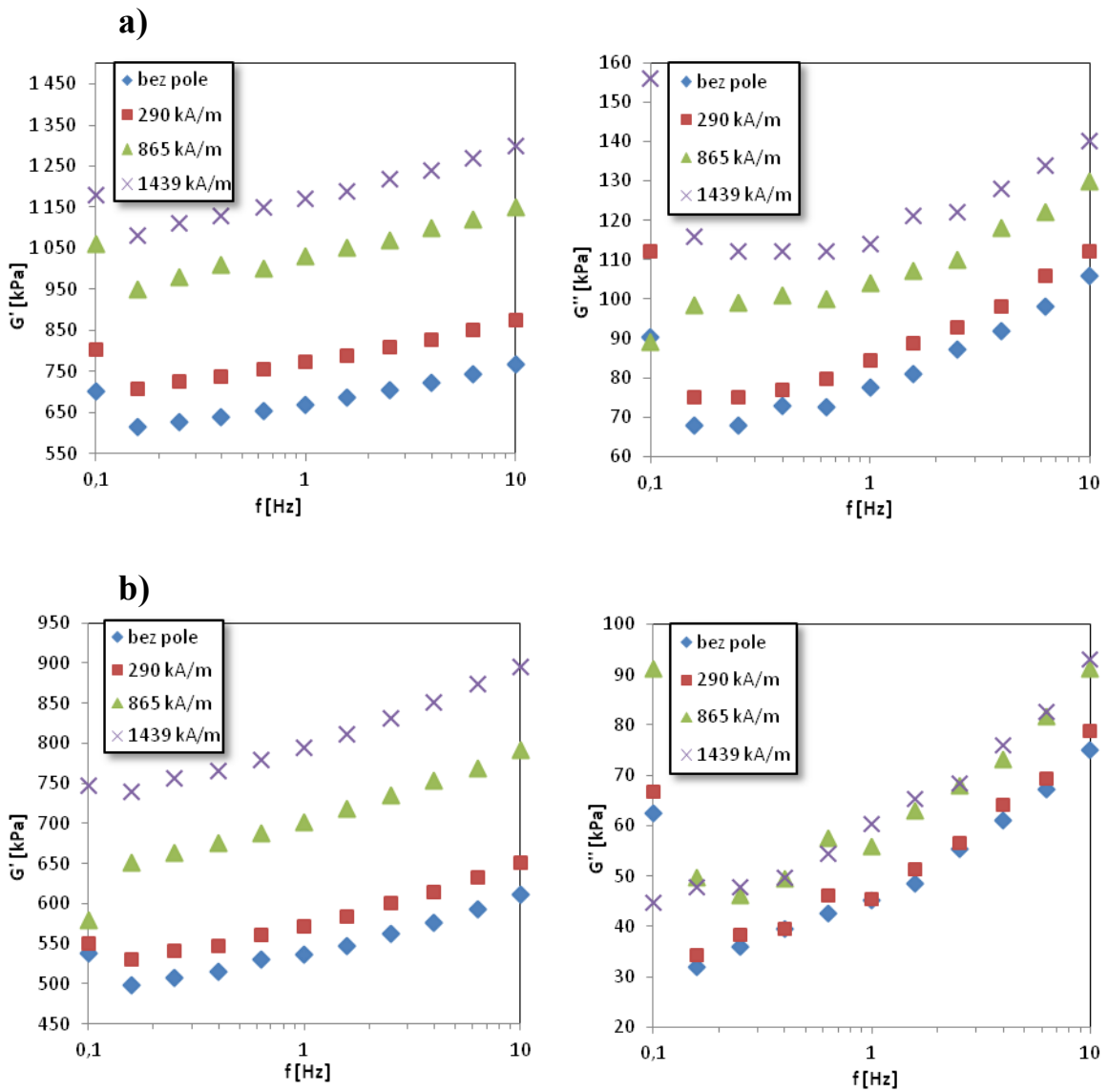
Obr. 25 Frekvenční závislost elastického modulu  $G'$  a viskózního modulu  $G''$  kompozitu 35SL-anizo (a), 35SL-izo (b) bez přítomnosti mag. pole a následně s intenzitami ( $\text{kA}\cdot\text{m}^{-1}$ ): 290, 865, 1439.



Obr. 26 Frekvenční závislost elastického modulu  $G'$  a viskózního modulu  $G''$  kompozitu 70SL-anizo (a), 70SL-izo (b) bez přítomnosti mag. pole a následně s intenzitami ( $kA.m^{-1}$ ): 290, 865, 1439.



Obr. 27 Frekvenční závislost elastického modulu  $G'$  a viskózního modulu  $G''$  kompozitu 35HQ-izo (a), 35HQ-anizo (b) bez přítomnosti mag. pole a následně s intenzitami ( $kA.m^{-1}$ ): 290, 865, 1439.



Obr. 28 Frekvenční závislost elastického modulu  $G'$  a viskózního modulu  $G''$  kompozitu 70HQ-anizo (a), 70HQ-izo (b) bez přítomnosti mag. pole a následně s intenzitami ( $kA \cdot m^{-1}$ ): 290, 865, 1439.

Co se týká vlivu **množství plniva** na MR vlastnosti kompozitu, tak s vyšším stupněm plnění roste tuhost kompozitu. Hodnoty modulů pro jednotlivé vzorky jsou uvedeny v tabulce (Tab. 3), kde je také uveden procentuální nárůst modulu při maximální intenzitě mag. pole.

Tab. 3 Hodnoty modulů kompozitů bez pole, s polem o max. intenzitě a jejich nárůst

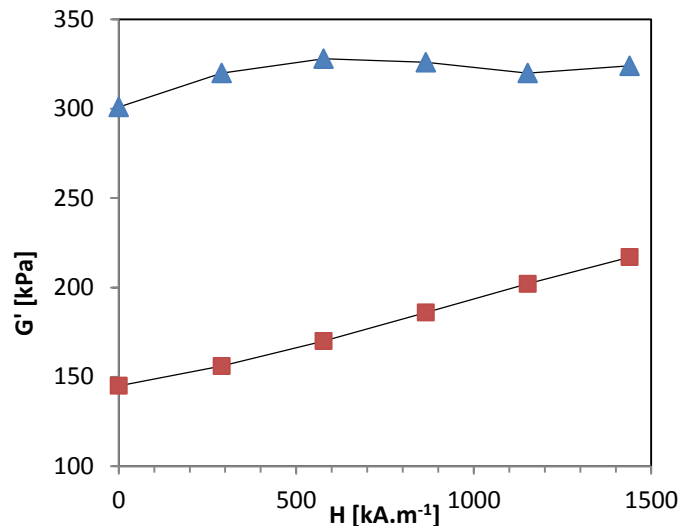
| Vzorek     | modul $G'$ (kPa) při $H = 0 \text{ kA.m}^{-1}$ | modul $G'$ (kPa) při $H = 1439 \text{ kA.m}^{-1}$ | nárůst modulu (%) |
|------------|--|---|-------------------|
| 35SL-anizo | 301  | 324   | 7,6               |
| 35SL-izo   | 145  | 217   | 49,7              |
| 70SL-anizo | 447  | 780   | 74,5              |
| 70SL-izo   | 277  | 457   | 65                |
| 35HQ-anizo | 162  | 203   | 25,4              |
| 35HQ-izo   | 153  | 195   | 27,5              |
| 70HQ-anizo | 669  | 1170  | 74,9              |
| 70HQ-izo   | 536  | 795   | 48,3              |

Při nízkém stupni plnění 35 hm. % má kompozit vždy nižší tuhost. Ukázalo se však, že při tomto plnění je modul izotropního kompozitu více závislý na intenzitě mag. pole oproti anizotropnímu (35SL-anizo nárůst pouze o 7,6 %, zatímco 35SL-izo zvýšení o 49,7 %, 35HQ-anizo nárůst 25,4 %, avšak 35HQ-izo zvýšení o 27,5 %). Pro vysoký stupeň plnění 70 hm. % má kompozit vyšší počáteční tuhost a zároveň také výraznější závislost modulu na intenzitě mag. pole (70SL-anizo nárůst 74,5 % oproti 70SL-izo jen 65%, 70HQ-anizo zvýšení modulu o 74,9 % ve srovnání s 70HQ-izo, kde modul narostl o 48,3 %). Stupněm plnění lze tedy ovlivnit modul kompozitu a zároveň také míru jeho odezvy na aplikované magnetické pole. S vyšším stupněm plnění se tedy míra odezvy na mag. pole zvyšuje a lze tedy očekávat výraznější MR efekt.

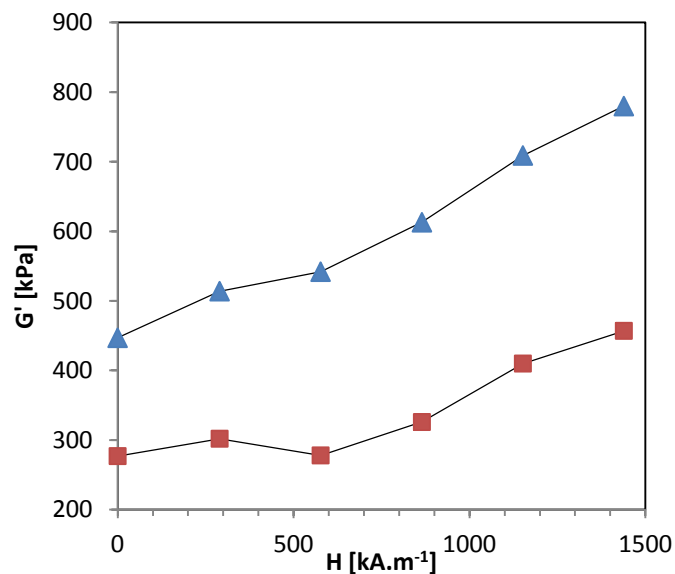
Kompozity o stejném stupni plnění obsahující menší částice CI-HQ by měly vykazovat ve srovnání s kompozitem plněným CI-SL vyšší hodnoty elastického modulu bez pole, díky většímu měrnému povrchu částic a lepší interakci s matricí. To se však v případě kompozitu 35SL-anizo nepotvrdilo, pravděpodobně vlivem agregace částic plniva.

Vliv intenzity mag. pole na tuhost kompozitu je dobře patrná ze závislosti elastického modulu  $G'$  na intenzitě mag. pole při frekvenci deformace 1 Hz (Obr. 29 - Obr. 32).

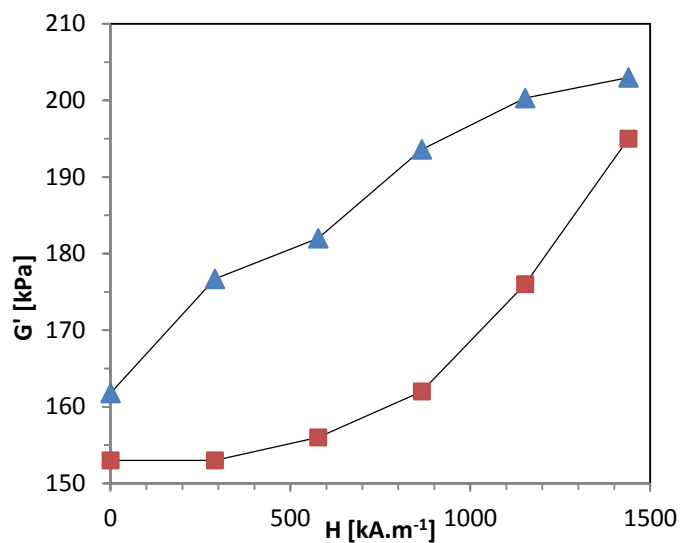
Z naměřených závislostí je patrný jednoznačný účinek mag. pole při vytvrzování kompozitu. Anizotropní kompozit má vždy vyšší počáteční modul. Závislost modulu na intenzitě mag. pole je pro anizotropní kompozit však jen nepatrně výraznější, v případě 35SL-anizo kompozitu naopak je tato závislost nižší, tj. rychleji roste modul pro 35SL-izo kompozit. Přípravou MR kompozitu v přítomnosti mag. pole lze tedy velmi dobře ovlivnit počáteční modul.



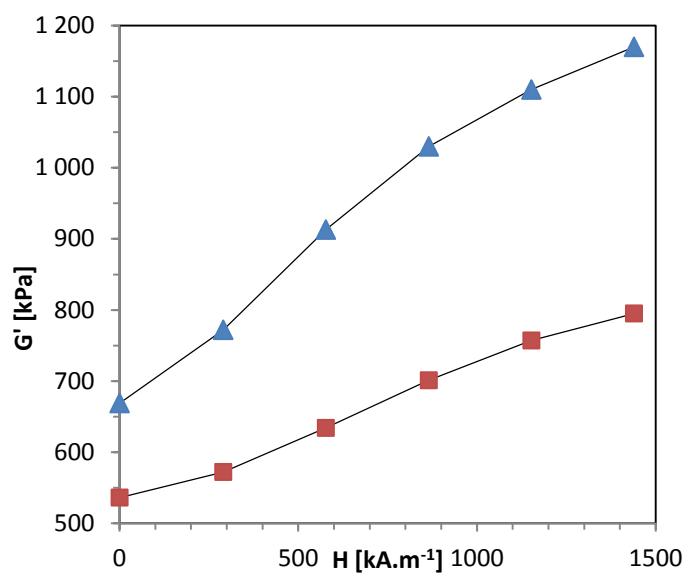
Obr. 29 Srovnání závislostí elastického modulu  $G'$  na intenzitě mag. pole při 1 Hz pro 35SL-anizo (▲) a 35SL-izo (■)



Obr. 30 Srovnání závislostí elastického modulu  $G'$  na intenzitě mag. pole při 1 Hz pro 70SL-anizo (▲) a 70SL-izo (■)



Obr. 31 Srovnání závislostí elastického modulu  $G'$  na intenzitě mag. pole při 1 Hz pro 35HQ-anizo (▲) a 35HQ-izo (■)



Obr. 32 Srovnání závislostí elastického modulu  $G'$  na intenzitě mag. pole při 1 Hz pro 70HQ-anizo (▲) a 70HQ-izo (■)



## ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo vyhodnotit vliv magnetického pole na výsledné vlastnosti MR elastomeru. V praktické části bylo úkolem připravit MR kompozity o různých parametrech s izotropní a anizotropní strukturou. Jako plnivo byly použity částice karbonylového železa CI-SL a CI-HQ, jako matrice pak silikonový elastomer Sylgard 184. Pomocí SEM byly hodnoceny částice z hlediska velikosti a tvaru. Za použití VSM byly změřeny magnetizační křivky obou druhů plniva, kde se ukázalo, že vyšší hodnoty magnetické saturace dosahují částice CI-HQ, oproti CI-SL částicím. Při hodnotách pole blízkých magnetické saturaci by tedy měly CI-HQ částice vykazovat vyšší MR efekt.

U připravených MR kompozitů byla prostřednictvím SEM sledováno uspořádání částic, kdy u anizotropního MRE byla jasně patrná řetězcovitá struktura, zatímco v případě izotropního vzorku byla distribuce částic zcela náhodná. Snímky SEM však také odhalily nepřilíživou adhezi plniva k matrici a také tendenci částic tvořit agregáty. Dále byly u všech připravených kompozitů na rotačním reometru v oscilačním režimu změřeny závislosti elastické a viskózní složky smykového modulu na úhlové frekvenci deformace. Měření probíhalo bez přítomnosti mag. pole a pak následně při jeho zvyšující se intenzitě. Z naměřených závislostí je zřejmé, že modul kompozitu roste se zvyšující se frekvencí deformace, což platí pro všechny měřené hodnoty mag. pole. Při nižším stupni plnění se dále ukázalo, že kompozit vykazuje nižší tuhost a také slabší MR efekt. Kompozity s anizotropní strukturou mají elastický modul vždy vyšší oproti izotropním kompozitům při nízkém i vyšším plnění. Výraznější MR efekt se však ve shodě s teorií projevil až při vyšším obsahu CI prášku u anizotropních MRE. Kompozity o stejném stupni plnění obsahující menší částice CI-HQ by měly vykazovat ve srovnání s kompozitem plněným CI-SL vyšší hodnoty elastického modulu bez pole, což se v jednom případě nepotvrdilo, pravděpodobně vlivem agregace částic. Elastický modul MRE lze tedy ovlivnit stupněm plnění, vytvořením anizotropního uspořádání částic plniva nebo použitím plniva s částicemi s větším měrným povrchem, musí však být zajištěna dokonalá dispergace v elastomerní matrici. Vyšší MR efekt je pak dosažen až při vyšším stupni plnění v případě anizotropního uspořádání částic plniva.

**SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY**

- [1] MEISSNER, Bohumil a Václav ZILVAR. *Fyzika polymerů: Struktura a vlastnosti polymerních materiálů*. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1987, 306 s.
- [2] THOMAS, Sabu, Kuruvilla JOSEPH, Sant MALHOTRA, Koichi GODA a Meyya-rappallil SREEKALA. *Polymer composites*. First edition. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co., 2012, volume 1. ISBN 978-3-527-32624-2.
- [3] AGARWAL, Bhagwan D a Lawrence J BROUTMAN. *Vláknové kompozity: celost. vysokošk. příručka pro vys. školy techn.* 1. vyd. Praha: SNTL, 1987, 294 s.
- [4] Kořínek, Z.: *Polymerní matrice*. [Online]. [Cit. 8. 1. 2015]. Dostupné z: <http://www.volny.cz/zkorinek/matrice.pdf>
- [5] Hayes, Brian S. Gammon, Luther M.. (2010). Optical Microscopy of Fiber-Reinforced Composites - 1.2 Polymer Matrices. ASM International. Online version available at: <http://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt008N7U91/optical-microscopy-fiber/polymer-matrices>
- [6] Campbell, F.C.. (2006). Manufacturing Technology for Aerospace Structural Materials - 7.1.1 Fibers. Elsevier. Online version available at: <http://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt009XEEC1/manufacturing-technology/fibers>
- [7] Baker, Alan Dutton, Stuart Kelly, Donald. (2004). Composite Materials for Aircraft Structures (2nd Edition) - 4.2 Thermoset and Thermoplastic Polymer Matrix Materials. American Institute of Aeronautics and Astronautics. Online version available at: <http://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt0046FCU2/composite-materials-aircraft/thermoset-thermoplastic>

- [8] Hoa, Suong V.. (2009). Principles of the Manufacturing of Composite Materials - 2.4 Thermoplastic Matrix. DEStech Publications. Online version available at: <http://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt006R6KI1/principles-manufacturing/thermoplastic-matrix>
- [9] MALLICK, P. K. Thermoset–matrix Composites for Lightweight Automotive Structures. Materials, Design and Manufacturing for Lightweight Vehicles. 2010, s. 208-231.
- [10] BAUMAN, Judson T. *Fatigue, stress and strain of rubber components a guide for design engineers*. Munich: Hanser, 2008, 9 - 18. ISBN 9783446416819.
- [11] (2000). ANTEC 2000 Plastics: The Magical Solution, Volume 2: Materials - Elastomer Matrix Composites for Impact-Resistant Parts (713). Society of Plastics Engineers. Online version available at: <http://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt0015QGG6/antec-2000-plastics-magical/elastomer-matrix-composites>
- [12] EDITOR, Marino Xanthos. *Functional fillers for plastics*. 2nd updated and enl. ed. Weinheim: Wiley-VCH, 2009. ISBN 978-352-7323-616.
- [13] ROTHON, Roger N.. (2003). Particulate-Filled Polymer Composites (2nd Edition). Smithers Rapra Technology. Online version available at: <http://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpPFPCE001/particulate-filled-polymer/particulate-filled-polymer>
- [14] DE VICENTE, Juan, Daniel J. KLINGENBERG a Roque HIDALGO-ALVAREZ. Magnetorheological fluids: a review. *Soft Matter*. 2011, vol. 7, issue 8, s. 3701- DOI: 10.1039/c0sm01221a. Dostupné z: <http://xlink.rsc.org/?DOI=c0sm01221a>

- [15] BICA, I., E.M. ANITAS, L. CHIRIGIU, M. BUNOIU, I. JUGANARU a R.F. TATU. Magnetodielectric effects in hybrid magnetorheological suspensions. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. 2014, s. -. DOI: 10.1016/j.jiec.2014.06.024. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1226086X14003220>
- [16] DENG, Hua-xia a Xing-long GONG. Application of magnetorheological elastomer to vibration absorber. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*. 2008, vol. 13, issue 9, s. 1938-1947. DOI: 10.1016/j.cnsns.2007.03.024. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1007570407000524>
- [17] JU, Benxiang, Rui TANG, Dengyou ZHANG, Bailian YANG, Miao YU a Changrong LIAO. Temperature-dependent dynamic mechanical properties of magnetorheological elastomers under magnetic field. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2015, vol. 374, s. 283-288. DOI: 10.1016/j.jmmm.2014.08.012. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0304885314007008>
- [18] CHEN, L, X L GONG a W H LI. Microstructures and viscoelastic properties of anisotropic magnetorheological elastomers. *Smart Materials and Structures*. 2007-12-01, vol. 16, issue 6, s. 2645-2650. DOI: 10.1088/0964-1726/16/6/069. Dostupné z: <http://stacks.iop.org/0964-1726/16/i=6/a=069?key=crossref.03ca69b03d44aa14af6557fd323a77b1>
- [19] RUDDY, C.; AHEARNE, E.; BYRNE, G. A review of magnetorheological elastomers: properties and applications. *Advanced Manufacturing Science (AMS) Research*. [http://www.ucd.ie/mecheng/ams/news\\_items/Cillian%20Ruddy.pdf](http://www.ucd.ie/mecheng/ams/news_items/Cillian%20Ruddy.pdf) Accessed, 2012, 20.

- [20] CARLSON, J.David a Mark R JOLLY. MR fluid, foam and elastomer devices. *Mechatronics*. 2000, vol. 10, 4-5, s. 555-569. DOI: 10.1016/S0957-4158(99)00064-1. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0957415899000641>
- [21] ABSHINOVA, Madina A., Natalia E. KAZANTSEVA, Petr SÁHA, Irina SAPURINA, Jana KOVÁŘOVÁ a Jaroslav STEJSKAL. The enhancement of the oxidation resistance of carbonyl iron by polyaniline coating and consequent changes in electromagnetic properties. *Polymer Degradation and Stability* [online]. 2008, vol. 93, issue 10, s. 1826-1831 [cit. 2015-02-25]. DOI:10.1016/j.polymdegradstab.2008.07.008. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0141391008002140>
- [22] SOMMER, Jaroslav. *Fyzika 2: Nauka o elektřině a magnetizmu*. Ostrava: Ediční středisko VŠB Ostrava, 1979.
- [23] Chování látek v magnetickém poli. *Matematicko-fyzikální fakulta UK* [online]. [cit. 2015-02-25]. Dostupné z: [http://physics.mff.cuni.cz/kfpp/skripta/kurz\\_fyziky\\_pro\\_DS/display.php/elmag/3\\_5 - obrázek](http://physics.mff.cuni.cz/kfpp/skripta/kurz_fyziky_pro_DS/display.php/elmag/3_5 - obrázek)
- [24] Glosář Aldebaran. *Aldebaran* [online]. [cit. 2015-03-11]. Dostupné z: <http://www.aldebaran.cz/glossary/print.php?id=741>
- [25] MALÝ, Marek. Magnetické vlastnosti látky. *Univerzita J. E. Purkyně* [online]. [cit. 2015-02-25]. Dostupné z: [physics.ujep.cz/~mmaly/vyuka/ruzne/ISING/Ising.pdf](http://physics.ujep.cz/~mmaly/vyuka/ruzne/ISING/Ising.pdf)
- [26] Gale, W.F. Totemeier, T.C.. (2004). *Smithells Metals Reference Book (8th Edition) - 20.5 Magnetic Powder Core Materials*. Elsevier. Online version available at: <http://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt003OADB6/smithells-metals-reference/magnetic-powder-core>

- [27] YU, Miao, Benxiang JU, Jie FU, Xueqin LIU a Qi YANG. Influence of composition of carbonyl iron particles on dynamic mechanical properties of magnetorheological elastomers. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2012, vol. 324, issue 13, s. 2147-2152. DOI: 10.1016/j.jmmm.2012.02.033. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0304885312001308>
- [28] JU, Benxiang, Rui TANG, Dengyou ZHANG, Bailian YANG, Miao YU a Changrong LIAO. Temperature-dependent dynamic mechanical properties of magnetorheological elastomers under magnetic field. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2015, vol. 374, s. 283-288. DOI: 10.1016/j.jmmm.2014.08.012. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0304885314007008>
- [29] ZHOU, Yanfen, Stephen JERRAMS, Anthony BETTS, Gerald FARRELL a Lin CHEN. The influence of particle content on the equi-biaxial fatigue behaviour of magnetorheological elastomers. *Materials*. 2015, vol. 67, s. 398-404. DOI: 10.1016/j.matdes.2014.11.056. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0261306914009777>
- [30] VARGA, Zsolt, Genovéva FILIPCSEI a Miklós ZRÍNYI. Magnetic field sensitive functional elastomers with tuneable elastic modulus. *Polymer*. 2006, vol. 47, issue 1, s. 227-233. DOI: 10.1016/j.polymer.2005.10.139. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0032386105016125>
- [31] DOW CORNING. *Product informations: Sylgard 184* [online]. [cit. 2015-05-03]. Dostupné z: <http://www.dowcorning.com/applications/search/default.aspx?R=131EN>

- [32] JOHNSTON, I D, D K MCCLUSKEY, C K L TAN a M C TRACEY. Mechanical characterization of bulk Sylgard 184 for microfluidics and microengineering. *Journal of Micromechanics and Microengineering*. 2014-03-01, vol. 24, issue 3, s. 035017-. DOI: 10.1088/0960-1317/24/3/035017. Dostupné z: <http://stacks.iop.org/09601317/24/i=3/a=035017?key=crossref.cf83b17be3210f20943ae0e9169fc9b8>
- [33] BASF. *Carbonyl Iron Powder Brochure: Overview CIP product range*. 3. 5. 2015. Dostupné z: [http://www.monomers.basf.com/cm/internet/en/portal/\\_/content/Produkte/Metallsysteme/CIP/CIP](http://www.monomers.basf.com/cm/internet/en/portal/_/content/Produkte/Metallsysteme/CIP/CIP)
- [34] *Vidět znamená vědět - elektronová mikroskopie*. [Online]. [Cit. 3. 5. 2015]. Dostupné z: <<http://www.chempoint.cz/videt-znamena-vedet>>
- [35] *Elektronová mikroskopie - úvod*. [Online]. [Cit. 3. 5. 2015]. Dostupné z: <<http://www.paru.cas.cz/lem/bak/>>
- [36] Fyzikální podstata elektronového mikroskopu. *Přírodovědecká fakulta UNIVERZITY KARLOVY V PRAZE* [online]. [cit. 2015-05-03]. Dostupné z: <http://web.natur.cuni.cz/parasitology/parpages/mikroskopickatechnika/elektronova.htm>
- [37] PARK, Bong Jun, Kang Hyun SONG a Hyoung Jin CHOI. Magnetic carbonyl iron nanoparticle based magnetorheological suspension and its characteristics. *Materials Letters*. 2009, vol. 63, issue 15, s. 1350-1352. DOI: 10.1016/j.matlet.2009.03.013. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0167577X09002201>

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

|         |   |
|---------|---|
| PE      | Polyetylén  |
| PP      | Polypropylén  |
| PVC     | Polyvinylchlorid  |
| PS      | Polystyren  |
| PMMA    | Polymethylmetakrylát  |
| ABS     | Akrylonitrilbutadienstyren                                    |
| PEEK    | Polyéteréterketon   |
| MR      | Magnetoreologické (Magnetorheological)                        |
| MRE     | Magnetoreologické elastomery (Magnetorheological elastomers)  |
| MRF     | Magnetoreologické kapaliny (Magnetorheological fluids)        |
| PMC     | Magnetické kompozitní materiály (Polymer magnetic composites) |
| MRS     | Magnetoreologické suspenze (Magnetorheological suspensions)   |
| ERF     | Elektroreologické tekutiny (Electrorheological fluids)        |
| CI      | Karbonylové železo (Carbonyl iron)                            |
| CIP     | Částice karbonylového železa (Carbonyl iron particles)        |
| Al      | Hliník  |
| Si      | Křemík  |
| Fe      | Železo  |
| Ni      | Nikl  |
| Mo      | Molybden  |
| Cu      | Měď   |
| Cr      | Chrom   |
| $\mu$   | Permeabilita  |
| $\mu_0$ | Permeabilita vakua  |
| $\mu_r$ | Relativní permeabilita  |



---

|        |   |
|--------|---|
| $\chi$ | Susceptibilita  |
| $B$    | Magnetická indukce  |
| $B_s$  | Nasyčená magnetizace  |
| $B_r$  | Remanence   |
| $H$    | Intenzita magnetického pole   |
| $H_c$  | Koercivní síla  |
| $J$    | Magnetizace   |
| $T$    | Termodynamická teplota  |
| $T_c$  | Curieova teplota  |
| $C$    | Látkově specifická konstanta  |
| ATVA   | Adaptivní laděný tlumič vibrací (Adaptive tuned vibration absorber) |
| DVA    | Dynamický absorbér vibrací (Dynamic vibration absorber)             |
| PUR    | Polyuretan  |
| MRP    | Magnetoreologické plastomery (Magnetorheological plastomers)        |
| PDMS   | Polydimetylsiloxan  |
| PANI   | Polyanilin  |
| SEM    | Skenovací elektronová mikroskopie (Scanning Electron Microscopy)    |
| SE     | Sekundární elektrony  |
| BSE    | Zpětně odražené elektrony   |
| TGA    | Termogravimetrická analýza  |
| MEMS   | Mikroelektromechanické systémy                                      |
| VSM    | Vibrační vzorková magnetometrie (Vibrating Sample Magnetometry)     |

## SEZNAM OBRÁZKŮ

|  |    |
|--|----|
| <i>Obr. 1 Klasifikace kompozitů na základě geometrie výztuže [3]</i> .....   | 14 |
| <i>Obr. 2 Tahové prodloužení a smrštění elastomeru vykazující hysterizi [10]</i> .....   | 16 |
| <i>Obr. 3 SEM snímky částic v elastomeru, vlevo je snímek náhodně dispergovaných částic, vpravo jsou pak částice zřetězené působením magnetického pole [19]</i> .....                    | 21 |
| <i>Obr. 4 Spektrum komplexní permeability stlačeného vzorku CI (SL-typ) [2]</i> .....  | 22 |
| <i>Obr. 5 Relativní permeabilita v závislosti na intenzitě magnetického pole [23]</i> .....  | 25 |
| <i>Obr. 6 Hysterezní křivka</i> .....  | 25 |
| <i>Obr. 7 Schématické znázornění ATVA: 1 kryt, 2 vodící tyč, 3 lineární ložisko, 4 magnetický vodič, 5 smyková deska, 6 MRE, 7 konsolka, 8 elektromagnet, 9 montážní kryt [16]</i> ..... | 29 |
| <i>Obr. 8 Závislost rezonanční frekvence na proudu cívkami [16]</i> .....  | 30 |
| <i>Obr. 9 Elastická složka smykového modulu v závislosti na teplotě pro izotropní a anizotropní vzorek v magnetickém poli [28]</i> .....   | 32 |
| <i>Obr. 10 Izotropní magnetický elastomer [30]</i> .....   | 33 |
| <i>Obr. 11 Vliv mag. pole na elastický modul MRE obsahující různá množství CIP [30]</i> .....  | 33 |
| <i>Obr. 12 Vliv mag. pole na elastický modul [30]</i> .....  | 34 |
| <i>Obr. 13 Vliv mag. pole na elastický modul [30]</i> .....  | 34 |
| <i>Obr. 14 SEM fotografie a) nepotažený CI b) CI potažený vrstvou PANI [21]</i> .....  | 35 |
| <i>Obr. 15 Chemická struktura polydimetylsiloxanu</i> .....  | 38 |
| <i>Obr. 16 Závislost výsledného Youngova modulu na teplotě vytvrzování pro Sylgard 184 [32]</i> .....  | 40 |
| <i>Obr. 17 Elektromagnet s vloženou formou zajištěnou svorkami. Vlevo vzadu je vidět laboratorní zdroj DC proudu cívkou.</i> .....   | 42 |
| <i>Obr. 18 SEM snímek částic CI-HQ</i> .....   | 45 |
| <i>Obr. 19 SEM snímek částic CI-SL</i> .....   | 46 |
| <i>Obr. 20 SEM snímek řezu kompozitem 35SL-izo</i> .....   | 47 |
| <i>Obr. 21 SEM snímek řezu kompozitem 35SL-anizo</i> .....   | 47 |
| <i>Obr. 22 SEM snímek řezu kompozitem 35SL-anizo s detailem na uspořádané řetězcovité struktury CI</i> .....   | 48 |
| <i>Obr. 23 SEM snímek řezu kompozitem 35SL-izo s detailem na klastr částic CI</i> .....  | 48 |
| <i>Obr. 24 Naměřená hysterezní smyčka pro částice CI SL (▲) a CI HQ (■)</i> .....  | 49 |

|  |    |
|--|----|
| Obr. 25 Frekvenční závislost elastického modulu $G'$ a viskózního modulu $G''$ kompozitu <b>35SL-anizo</b> (a), <b>35SL-izo</b> (b) bez přítomnosti mag. pole a následně s intenzitami ( $kA.m^{-1}$ ): 290, 865, 1439. .... | 50 |
| Obr. 26 Frekvenční závislost elastického modulu $G'$ a viskózního modulu $G''$ kompozitu <b>70SL-anizo</b> (a), <b>70SL-izo</b> (b) bez přítomnosti mag. pole a následně s intenzitami ( $kA.m^{-1}$ ): 290, 865, 1439. .... | 51 |
| Obr. 27 Frekvenční závislost elastického modulu $G'$ a viskózního modulu $G''$ kompozitu <b>35HQ-izo</b> (a), <b>35HQ-anizo</b> (b) bez přítomnosti mag. pole a následně s intenzitami ( $kA.m^{-1}$ ): 290, 865, 1439. .... | 52 |
| Obr. 28 Frekvenční závislost elastického modulu $G'$ a viskózního modulu $G''$ kompozitu <b>70HQ-anizo</b> (a), <b>70HQ-izo</b> (b) bez přítomnosti mag. pole a následně s intenzitami ( $kA.m^{-1}$ ): 290, 865, 1439. .... | 53 |
| Obr. 29 Srovnání závislostí elastického modulu $G'$ na intenzitě mag. pole při 1 Hz pro <b>35SL-anizo</b> (■) a <b>35SL-izo</b> (■) .....  | 55 |
| Obr. 30 Srovnání závislostí elastického modulu $G'$ na intenzitě mag. pole při 1 Hz pro <b>70SL-anizo</b> (■) a <b>70SL-izo</b> (■) .....  | 55 |
| Obr. 31 Srovnání závislostí elastického modulu $G'$ na intenzitě mag. pole při 1 Hz pro <b>35HQ-anizo</b> (■) a <b>35HQ-izo</b> (■) .....  | 56 |
| Obr. 32 Srovnání závislostí elastického modulu $G'$ na intenzitě mag. pole při 1 Hz pro <b>70HQ-anizo</b> (■) a <b>70HQ-izo</b> (■) .....  | 56 |

**SEZNAM TABULEK**

|   |    |
|---|----|
| <i>Tab. 1 Charakteristické vlastnosti PDMS [31]</i> .....                                       | 38 |
| <i>Tab. 2 Označení jednotlivých MR kompozitů</i> .....  | 41 |
| <i>Tab. 3 Hodnoty modulů kompozitů bez pole, s polem o max. intenzitě a jejich nárůst</i> ..... | 54 |