

# **Distribuce částic v magnetoreologických elastomerech**

Bc. Radoslav Milde

---

Diplomová práce  
2017

 Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2016/2017

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Radoslav Milde**  
Osobní číslo: **T14544**  
Studijní program: **N3909 Procesní inženýrství**  
Studijní obor: **Výrobní inženýrství**  
Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Distribuce částic v magnetoreologických elastomerech**

Zásady pro vypracování:

1. Vypracujte literární rešerši na dané téma
2. Připravte různé vzorky magnetoreologických elastomerů
3. Proveďte analýzu distribuce částic v připravených systémech
4. Vyhodnoťte a diskutujte získané výsledky

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

1. Handbook of Thermoplastic Elastomers; Jiri George Drobny (2007) ISBN 978-0-8155-1716-4.
2. de Vicente, J., Klingenberg, D.J., Hidalgo-Alvarez, R. Magnetorheological fluids: A review. *Soft Matter*. 2011, vol. 7, no. 8, p. 3701-3710.
3. Časopisecké publikace dostupné v databázích prostřednictvím Knihovny UTB.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Michal Sedláčik, Ph.D.**

Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce: **2. ledna 2017**

Termín odevzdání diplomové práce: **12. května 2017**

Ve Zlíně dne 26. ledna 2017



doc. Ing. František Buňka, Ph.D.  
*děkan*



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

Příjmení a jméno: Milde Radošlav

Obor: Výrobní inženýrství

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

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

Ve Zlíně 27.4.2017

Milde

<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 nevdělečně zveřejňuje disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce, u kterých proběhla obhajoba, včetně posudků oponentů a výsledků 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 vzdělávacího 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 užít či poskytnout jinému licenci, není-li to v rozporu s oprávněnými zájmy školy nebo školského či vzdělávacího zařízení.*

(3) *Škola nebo školské či vzdělávací zařízení jsou oprávněny požadovat, aby jim autor školního díla z výdělku jím dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence podle odstavce 2 přiměřeně přispěl na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložily, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se 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 a podrobnou analýzu vzorků magnetoreologických elastomerů (MRE). Jednotlivé MRE se liší orientací, koncentrací a případnou modifikací povrchu dispergovaných magnetických částic systému. Jako materiál matrice byl zvolen silikonový elastomer Sylgard 184 a plnivem se stalo karbonylové železo, případně stejné částice modifikované v povrchové vrstvě tetraethoxysilanem. Připravené vzorky byly podrobeny analýze na rotačním rheometru za přítomnosti vnějšího magnetického pole a impedančním spektroskopu v širokém teplotním rozsahu. Při vyhodnocování naměřených výsledků byla sledována zejména změna elastické a viskózní složky smykového modulu na intenzitě magnetického pole a relaxační procesy uskutečňované ve sledovaném teplotním rozsahu.

Klíčová slova: magnetoreologický elastomer, magnetoreologický efekt, karbonylové železo, syntéza, rotační rheometr, dielektrická spektroskopie, modifikované částice, relaxační procesy

## **ABSTRACT**

This thesis is focused on the preparation and detailed analysis of magnetorheological elastomers (MRE). The MRE under investigation are differing in particles orientation within the system, concentration, and their surface modification. Sylgard 184 silicone rubber was chosen as a matrix material and the filler became carbonyl iron or the same particles with surface modification with tetraethoxysilane. Prepared samples were analyzed using rotational rheometer operated in the presence of external magnetic field and impedance spectroscopy operated at wide temperature range. The obtained results were evaluated mainly from the point of view of changes of the elastic and viscous component of shear modulus according to the intensity of the external magnetic field applied and relaxation processes appearing in the temperature range investigated.

Keywords: magnetorheological elastomer, magnetorheological effect, carbonyl iron, synthesis, rotational rheometer, dielectric spectroscopy, modified particles, relaxation processes

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

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

Prohlašuji, že odevzdaná verze bakalářské/diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

## OBSAH

<b>ÚVOD.....</b>	<b>10</b>
<b>I TEORETICKÁ ČÁST.....</b>	<b>11</b>
<b>1 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY .....</b>	<b>12</b>
1.1 CHARAKTERISTIKA.....	12
1.2 KLASIFIKACE KOMPOZITŮ .....	12
1.2.1 Termoplasty.....	12
1.2.2 Termosety.....	13
1.3 ROZDĚLENÍ KOMPOZITŮ .....	14
<b>2 REOLOGICKÉ VLASTNOSTI .....</b>	<b>16</b>
2.1 REOLOGICKÉ VLASTNOSTI LÁTEK.....	16
2.2 NORMÁLOVÉ A TEČNÉ NAPĚTÍ .....	17
2.3 NEWTONSKÉ LÁTKY .....	18
2.4 NE-NEWTONSKÉ LÁTKY .....	19
2.5 VISKOZIMETRY.....	20
2.5.1 Rotační viskozimetry .....	20
2.5.1.1 Válec-válec .....	20
2.5.1.2 Kužel-deska .....	21
2.5.1.3 Deska – deska .....	21
<b>3 MAGNETOREOLOGICKÉ KOMPOZITY .....</b>	<b>23</b>
3.1 MAGNETOREOLOGICKÝ EFEKT .....	23
3.2 FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ MR EFEKT .....	23
3.2.1 Tvar, velikost a koncentrace částic .....	23
3.2.2 Teplota.....	23
3.2.3 Intenzita vnějšího pole .....	24
3.3 MAGNETOREOLOGICKÉ KAPALINY .....	24
3.4 MAGNETOREOLOGICKÉ ELASTOMERY .....	25
3.5 MAGNETICKÉ CHARAKTERISTIKY ČÁSTIC.....	26
3.5.1 Diamagnetismus .....	26
3.5.2 Paramagnetismus.....	27
3.5.3 Feromagnetismus .....	27
3.5.4 Curieova teplota .....	28
3.5.5 Hystereze.....	28
<b>4 APLIKACE MRE.....</b>	<b>30</b>
<b>5 POLARIZACE DIELEKTRIKA.....</b>	<b>31</b>
5.1 POLÁRNÍ DIELEKTRIKA .....	31
5.2 NEPOLÁRNÍ DIELEKTRIKA .....	31
5.3 IONTOVÁ RELAXAČNÍ POLARIZACE.....	32
5.4 DIPÓLOVÁ RELAXAČNÍ POLARIZACE.....	32
5.5 MEZIFÁZOVÁ POLARIZACE .....	33
<b>6 ZKUŠEBNÍ METODY MRE .....</b>	<b>34</b>



6.1	VIBRAČNÍ MAGNETOMETRIE.....	34
6.2	VISKOELASTICKÉ MĚŘENÍ MRE .....	35
6.3	DIELEKTRICKÁ SPEKTROSKOPIE .....	36
6.4	3D TOMOGRAFIE .....	37
<b>7</b>	<b>ZHODNOCENÍ STUDIJNÍ ČÁSTI .....</b>	<b>38</b>
<b>II</b>	<b>PRAKTICKÁ ČÁST .....</b>	<b>39</b>
<b>8</b>	<b>CÍLE PRÁCE .....</b>	<b>40</b>
<b>9</b>	<b>PŘÍPRAVA MAGNETOREOLOGICKÝCH ELASTOMERŮ.....</b>	<b>41</b>
9.1	MATERIÁLY .....	41
9.2	SYNTÉZA .....	41
9.3	CHARAKTERIZACE CÍ ČÁSTIC .....	42
9.4	PŘÍPRAVA ELASTOMERU .....	45
<b>10</b>	<b>SLEDOVÁNÍ VLIVU FAKTORŮ V PRŮBĚHU VYTVRZOVÁNÍ POMOCÍ ANALITICKÝCH METOD .....</b>	<b>47</b>
10.1	MAGNETOREOLOGIE .....	47
10.2	DIELEKTRICKÁ SPEKTROSKOPIE .....	59
	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>63</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....</b>	<b>65</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK .....</b>	<b>72</b>
	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>75</b>
	<b>SEZNAM TABULEK.....</b>	<b>77</b>

## ÚVOD

Polymery jsou materiály, které nabízejí jedinečné vlastnosti, díky kterým jsou v některých oblastech výroby nenahraditelné. Jejich největšími výhodami je tvárnost, mechanické vlastnosti a také cena.

Tato diplomová práce se zabývá problematikou tzv. magnetoreologických elastomerů (MRE), které se v posledních letech dostávají do povědomí díky svým vlastnostem v oblasti inženýrských aplikací. Největší potenciál je v oblasti automobilového průmyslu a lékařství.

Na rozdíl od běžných kompozitů, které jsou tvořeny maticí a plnivem (plnivo je přidáváno z důvodu zvýšení mechanických vlastností, snížení ceny atd.), je u MRE přidáváno plnivo s vhodnými magnetickými vlastnostmi z důvodu získání zcela nových vlastností takového systému. Materiál matrice musí vysoce elastický, proto se běžně používá síťovaný nebo termoplastický elastomer. [1,2,3]

Cílem diplomové práce je připravit různé vzorky MRE lišících se orientací částic uvnitř systému. U takto připravených systémů je následně provedena analýza distribuce částic v připravených MRE systémech s ohledem na parametry v průběhu jejich přípravy a to za pomoci několika přístupů jako např. grafická analýza v řezu, dielektrická spektroskopie nebo magnetoreologická měření zaznamenávající změnu tuhosti celého systému v průběhu jeho vystavení vnějšímu magnetickému poli. Získané výsledky jsou podrobně graficky zpracovány včetně diskuze jednotlivých vlivů na distribuci částic.

## **I. TEORETICKÁ ČÁST**

# 1 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY

## 1.1 Charakteristika

Kompozitním materiálem je každý materiálový systém, který je složen ze dvou a více fází, z nichž nejméně jedna je pevná, s makroskopicky rozeznatelným rozhraním mezi fázemi, a který dosahuje předem jasně definovaných vlastností, kterých nemůže být dosaženo kteroukoliv fází (složkou) samostatně ani jejich součtem. [2,5,8]

Snahou je vyrobit z dvou různých materiálů A a B materiál C, který ale bude mít lepší vlastnosti, než původní dva materiály. Výsledné vlastnosti jednotlivých fází jsou ovlivněny jednak svými vlastními charakteristikami a interakcí tuhých a tekutých struktur nebo vzájemnou interakcí. Z velké části se jedná o interakce fyzikální nebo fyzikálně-chemické. Nové kvality materiálu přináší interakce jednotlivých fází a struktur, protože samostatnou složkou nelze takových vlastností dosáhnout. V kompozitu je snahou zdůraznit výhodné vlastnosti složek a naopak nevýhodné potlačit podle potřeb konstrukce. [2,6,8]

Z hlavních parametrů, na kterých závisí vlastnosti kompozitů, lze zmínit:

- Vlastnosti fází (mechanické vlastnosti a jejich poměr)
- Objemové zastoupení fází (geometrický tvar a geometrické uspořádání v systému)
- Interakce jednotlivých fází a vlastnosti styku (přenos zatížení z matrice do vyztužujících částic a naopak)
- Interakce s okolním prostředím

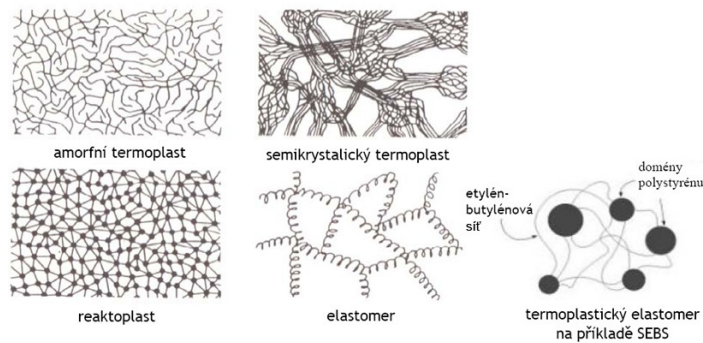
## 1.2 Klasifikace kompozitů

V dnešní době je na trhu dostupné velké množství kompozitních materiálů, které se liší matricí (pryskyřicí), charakterem a typem výztuží (vlákna, rohože, tkaniny, rouna) a také způsobem výroby (tažení, navíjení, laminace). Podle typu matric je možné kompozity rozdělit na dva základní typy podle polymerního typu matrice, a to termoplasty a termosety. [2,4]

### 1.2.1 Termoplasty

Do této kategorie patří např. polypropylen (PP), polystyren (PS), polyetylen (PE), polykarbonát (PB) a další. Jsou to tuhé látky, které při zvýšené teplotě (liší se podle druhu kon-

krétního polymeru) měknou a tečou. Po ochlazení pod tuto teplotu přecházejí do pevného skupenství. Základním charakteristickým znakem termoplastů jsou velmi dlouhé molekuly (makromolekuly) vytvořené opakováním stejných strukturních jednotek. Tyto makromolekuly nejsou vzájemně vázány chemickými vazbami. [3,6,7]



Obr. 1. Druhy termoplastů

### 1.2.2 Termosety

Mezi termosety lze zařadit například epoxidy, nenasycené polyestery, melaminy, fenol formaldehydové pryskyřice a další. Tyto látky jsou dodávány ve formě viskózních tekutin s konzistencí řídkého medu, které obsahují velmi krátké molekuly. Tyto molekuly jsou vytvrzeny chemickou reakcí po dodání iniciátoru a katalyzátoru. Vytvrzení probíhá za pokojové teploty nebo za zvýšené teploty. Při vytvrzování vznikají mezi malými molekulami chemické vazby a místo dlouhých lineárních řetězců vzniká třídímní polymerní síť s rozdílnou hustotou. Kompozity s termosetovou maticí mají mezi konstrukčními aplikacemi vláknových kompozitů ohromnou převahu. Naopak v oblasti částicových kompozitů a plněných plastů dominují termoplastické matrice. [2,5]



Obr. 2. Výrobky z termosetů

### 1.3 Rozdělení kompozitů

Vláknové kompozitní materiály se z důvodu vymezení pojmů rozdělují do tříd. K tomuto slouží celá řada kritérií. Jedním z nejpoužívanějších dělicích kritérií je orientace a délka vyztužujících vláken. Vláknové kompozity se tedy dělí na:

- Jednosměrné (vlákna jsou orientována převážně v jednom směru)
  - o Krátkovláknové (poměr délka/průměr  $L/D < 100$ )
  - o Dlouhovláknové ( $L/D > 100$  nebo vlákna s délkou rovnou rozměrům celého dílce (kontinuální vlákna))
- Mnohosměrné (vlákna jsou náhodně nebo pravidelně orientována dvěma či více směry)
  - o Krátkovláknové ( $L/D < 100$ )
  - o Dlouhovláknové ( $L/D > 100$ )

Prostorové uspořádání výztuže je dalším kritériem pro rozdělení kompozitů:

- Lamina – jedna vrstva kompozitu s tloušťkou zanedbatelnou ve srovnání se zbývajícím dvěma rozměry
- Lamináty – střídání vrstev a lamin s různými vzájemnými orientacemi výztuže
  - o Lamináty s tkanou výztuží – střídání vrstev vyztužujících rohoží, ve kterých jsou vlákna utkána běžnými nebo speciálními textilními technologiemi
  - o Lamináty s netkanou výztuží – střídání vrstev vyztužujících rohoží, ve kterých jsou vlákna zpracována do roun, aniž by byla tkána

- Tažené profily – komplikované tvary průřezu lineárních prvků s konstantním průřezem (desky, trubky, profily)
- Navíjené profily – kruhové nebo oválné tvary průřezu (tlakové nádoby, trubky)

## 2 REOLOGICKÉ VLASTNOSTI

Vědní obor reologie vznikl kolem roku 1920, kdy Markus Reiner začal uveřejňovat své články souhrnně nazývané Reologie v základním kompendiu fyziky. V roce 1929 byla založena E. C. Bighamem reologická společnost The Society of Rheology. Ta definovala reologii jako nauku o deformaci a tečení látek. Tento obor vznikl důsledkem toho, že si vědci začali uvědomovat, že přímá úměrnost mezi napětím a deformací (Hookův zákon) nemůže u řady materiálů přesně vystihnout jejich mechanické (reologické) chování. Ukázalo se, že klasická teorie pružnosti selhává při popisování látek, jako jsou kůže, těsta, pryž a asfalty. Také se ukázalo, že u látek typu med, mazací oleje nebo laky, je popsání tohoto děje podstatně složitější než u vody a lihu. Reologie nerozděluje látky na pevné a kapalné, ale hledá v kapalinách elastické vlastnosti a v pevných látkách vlastnosti kapalin. [2,3]

V reologii se určuje, jak se těleso dané látky deformuje pod působením vnějších sil. U této metody se musí silové působení na těleso a deformace vyjádřit v každém bodě zvlášť z důvodu matematického výpočtu. Silové působení ve zvoleném bodě se vyjadřuje silou, která působí na jednotkovou plochu a prochází zvoleným bodem. V okolí bodu dochází k deformaci, která popisuje, jak se v okolí bodu objem tělesa deformuje. Okolí bodu je jen tak velké, aby se mohlo považovat za homogenní (v každém bodě okolí stejné). Pokud bude za tvar okolí zvolena koule, zdeformuje se toto okolí na pravidelný elipsoid s třemi vzájemně kolmými osami s různou délkou. Poměr délek os k poloměru koule a natočení os se může popsat šesti hodnotami deformace. Tyto hodnoty popíší deformaci v daném okolí. [1,5]

### 2.1 Reologické vlastnosti látek

Látky lze obecně dělit na reálné (skutečné) a ideální (dokonalé). Na popis vlastností je například zaveden pojem ideální kapalina. Tato kapalina se vyznačuje nulovou objemovou roztažností, bez vnitřního tření, nulovou stlačitelností, nevypařuje se, a nulovou rozpustností plynů. Další rozdělení látek je například na newtonské (voda) a neneutonské (emulze, barvy).

Proudění reálné kapaliny

- Laminární – jsou to částice pohybující se ve vrstvách, které jsou vzájemně rovnoběžné a nedochází k jejich přemísťování kolmo ke směru pohybu



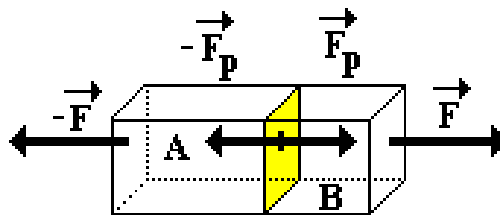
- Turbulentní – částice mají i turbulentní (flukтуаční) rychlost, díky které se přemísťují do průřezu

## 2.2 Normálové a tečné napětí

Normálové napětí je dáno podílem elementární síly a velikosti dané plochy:

$$p = \frac{dF_n}{dS} \quad (1)$$

Jedná se o tlak a jednotkou je Pascal [Pa]. V kapalině se nedá vyvolat tahové napětí a proto je tlak vždy kladný.



Obr. 3. Normálové napětí

Tečné napětí je dáno podílem tečné elementární síly a velikosti dané plochy:

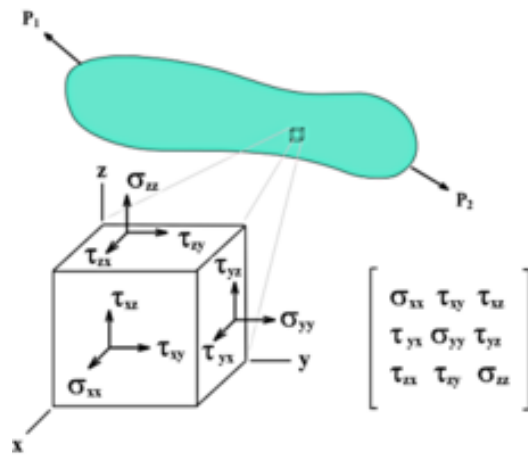
$$\tau = \frac{dF_t}{dS} \quad (2)$$

Toto napětí vyvolává v kapalině posun částic. Pro elementární hranol o výšce  $dy$ , jehož spodní stěna se pohybuje rychlostí  $v$  a horní stěna rychlostí  $v + dv$ , pak Isaac Newton odvodil vztah:

$$\tau = \eta \frac{dv}{dy} \quad (3)$$

, kde

$\eta$  je dynamická viskozita kapaliny a  $\frac{dv}{dy}$  je rychlostní spád tzv. smyková rychlost,  $\dot{\gamma}$ .



Obr. 4. Napětový tenzor

### 2.3 Newtonské látky

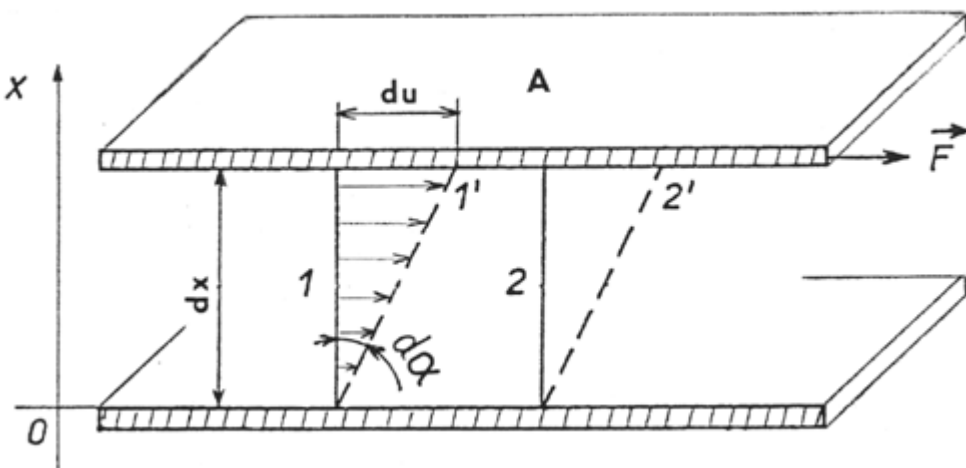
U ideálně viskózního materiálu platí pro tečné napětí Newtonův zákon:

$$\tau = \eta \frac{dv}{dx} = \eta \cdot D \tag{4}$$

, kde

$\eta$  = dynamická viskozita, která charakterizuje vnitřní tření neronské kapaliny

$dv$  = rychlost pohybu smykových rovin vzdálených o  $dx$  a  $D$  (gradient rychlosti).



Obr. 5. Rychlostní profil toku v látce mezi nepohyblivou a pohybující se deskou

Dynamická viskozita závisí především na teplotě a tlaku. U kapalin s teplotou klesá, u plynů naopak stoupá.

## 2.4 NeNewtonské látky

Jedná se o látky, které se neřídí Newtonovým zákonem. Proto se nazývají neNewtonské. Do této skupiny patří taveniny, roztoky, suspenze a pasty. Platí pro ně vztah:

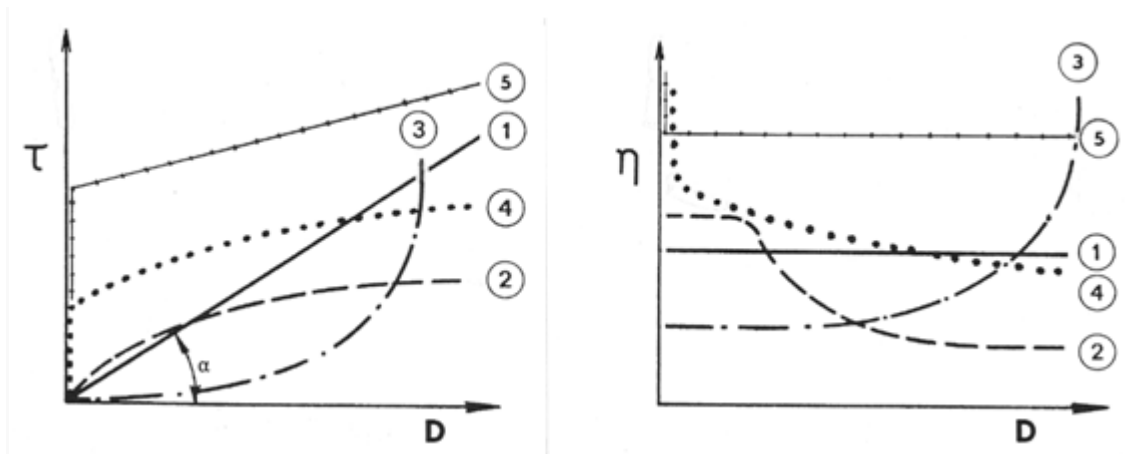
$$\tau = \eta_a \cdot D \quad (5)$$

, kde

$\eta_a$  je zdánlivá viskozita (není látkovou viskozitou, ale závisí na tečném napětí nebo rychlosti deformace viz. Obr. 6)

Základní typy neNewtonských látek jsou:

- Pseudoplastické látky – jejich viskozita se s rostoucím gradientem rychlosti zmenšuje (Obr. 6). Podle tokové křivky se rozlišují dvě základní podskupiny těchto látek: pravé pseudoplastické látky a strukturně viskózní látky.



Obr. 6. Tokové a viskozitní charakteristiky některých nenewtonských látek - 1- Newtonská látka, 2- strukturně viskózní látka, 3- dilatantní látka, 4- plastická látka (pseudoplastická s mezí toku), 5- Binghamská látka

- Dilatantní látka – zdánlivá viskozita roste s rostoucím gradientem rychlosti. Dilataci se snažíme u většiny technologických procesů potlačit, protože komplikuje výrobu
- Binghamská látka – je to kapalina s plastickou složkou deformace, k toku dochází až po překročení daného smykového napětí tzv. meze toku. Patří sem např. kašovitě suspenze křídly a vápna

## 2.5 Viskozimetry

Viskozita kapalin se měří tzv. viskozimetry. Mezi hlavní metody měření řadíme:

- Absolutní měření – z Newtonova zákona, měříme všechny ostatní veličiny
- Relativní měření – srovnání s kapalinou se známou dynamickou viskozitou

K hlavním podmínkám správného měření patří dobře definovaná geometrie toku (v případě neNewtonských kapalin) a laminárnost proudění v celém rozsahu měření. [12,13]

### 2.5.1 Rotační viskozimetry

Měří tření kapaliny mezi pevnou a rotující plochou. Otáčející se části mají rozdílné rychlosti díky nimž vzniká rychlostní spád, který napomáhá ke vzniku kroutícího momentu (míra smykového napětí). Rotační viskozimetr má různé měřicí geometrie jako kužel-deska, deska-deska a válec-válec. U měření je důležité zvolit správnou geometrii zařízení, aby bylo možné správně určit měřené parametry. [8,9]

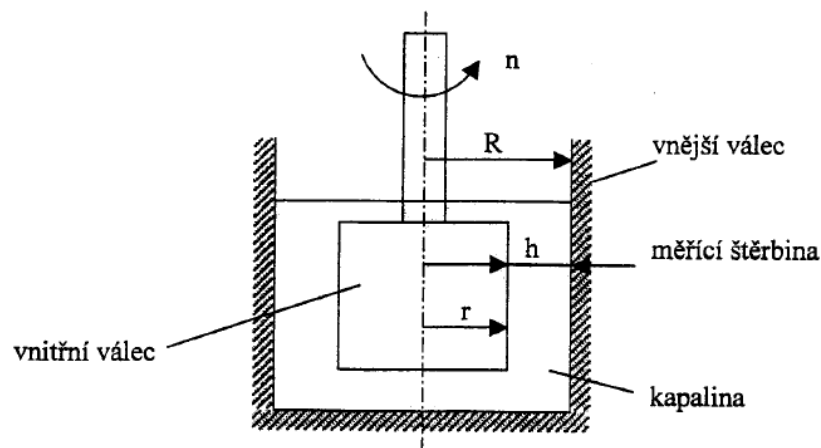
#### 2.5.1.1 Válec-válec

Tento viskozimetr se skládá z válcové nádoby o poloměru  $R$ , v níž se otáčí válec o poloměru  $r$  ponořený do kapaliny úhlovou rychlostí  $\omega$  [ $\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$ ]. K překonání odporu proti otáčení válce je třeba vynaložit sílu  $F$ :

$$F = \frac{M_K}{r} \quad (6)$$

, kde  $M_K$  je kroutící moment

Válec o poloměru  $r$  se otáčí, větší válec o poloměru  $R$  se nepohybuje.



Obr. 7. Viskozimetr válec-válec

### 2.5.1.2 Kužel-deska

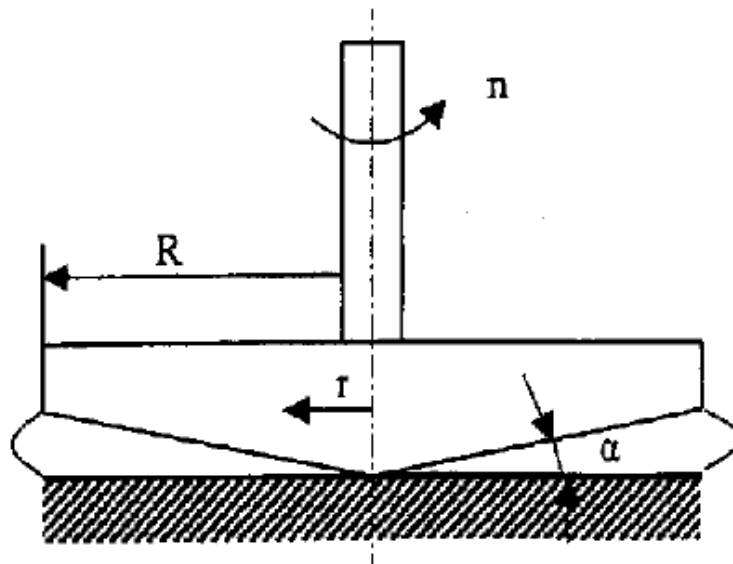
Tento typ viskozimetru je znám pod názvem Weissenbergův reogoniometr. Unášivý tok (paralelní geometrie) může být aproximován prouděním ve štěrbině mezi deskou a kuželem s malými úhly. Pro viskozitu platí:

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (7)$$

, kde  $\tau = \frac{3M_k}{2\pi R^3}$ ,  $\dot{\gamma} = \frac{\omega}{a}$ ,  $M_k$  – krouticí moment,  $\omega$  – rychlost rotace,  $a$  – úhel

$$\eta = \frac{3aM_k}{2\pi R^3\omega} \quad (8)$$

Tento vztah platí hlavně pro taveniny se smykovou rychlostí v rozsahu  $10^{-2}$  až  $10 \text{ s}^{-1}$ . Vyšší hodnoty smykové rychlosti lze touto metodou měřit velmi obtížně, protože dochází k sekundárnímu proudění a nakonec může vzorek i vytéct.

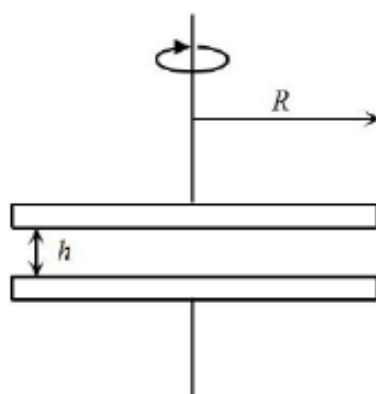


Obr. 8. Viskozimetr kužel-deska

### 2.5.1.3 Deska – deska

Největším rozdílem oproti geometrii kužel – deska je, že rychlost smykové deformace závisí na vzdálenosti mezi deskami  $h$ . Smykové napětí lze poté vypočítat z naměřeného kroutícího momentu  $M_k$  následovně:

$$\tau = \frac{2M_k}{\pi R^2} \quad (9)$$



Obr. 9. Geometrie deska -  
deska

### 3 MAGNETOREOLOGICKÉ KOMPOZITY

#### 3.1 Magnetoreologický efekt

Tento jev nastává u magnetoreologických (MR) systémů při interakci mezi magneticky polarizovatelnými částicemi a vnějším stejnosměrným magnetickým polem. Pro snadnější popis bude situace diskutována pro MR suspenze. Dispergované částice se zde pohybují Brownovým pohybem, pokud na ně nepůsobí magnetické pole a jejich magnetické dipólové momenty jsou orientovány zcela nahodile. Suspenze vykazuje Newtonské chování. Tvorbu magnetických dipólů a magnetické polarizace způsobují mezičásticové přitažlivé síly, které shlukují dispergované částice do řetězcových útvarů skrz nosnou kapalinu. Při zvyšování intenzity magnetického pole se postupně dosahuje rovnoběžného seřazení částic do sloupců orientovaných ve směru působení pole. To vede k nárůstu meze kluzu a viskozity až o několik řádů. Vnitřní struktury zformované magnetickým polem musí odolávat zvýšenému působení tahových, oscilačních a smykových sil. Díky tomu je MR suspenze účinná v reálných zařízeních. Důležité je také, aby přechod mezi stavy proběhl v rozmezí 1–10 milisekund. [9,16,18]

#### 3.2 Faktory ovlivňující MR efekt

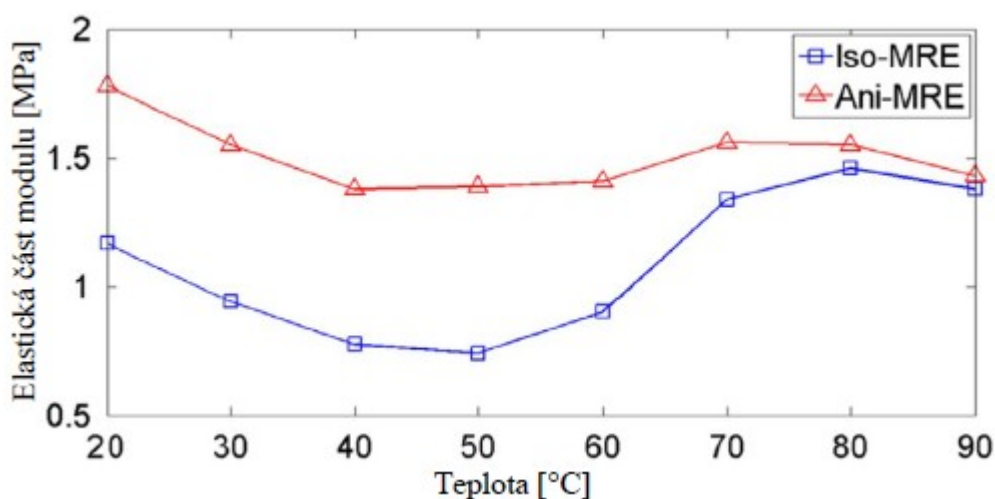
##### 3.2.1 Tvar, velikost a koncentrace částic

Důležitou roli při hodnocení MR efektu hraje v suspenzi koncentrace pevných částic. V systému je snahou docílit optimálního objemového podílu částic, který ideálně reaguje na magnetické pole. Optimální koncentrací je 20-40 objemových % magnetických částic. S nižší koncentrací, než je 15 objemových %, se nevytvoří dostatečně pevné struktury, které by odolávaly působícím silám. Při vyšší koncentraci (nad 40 objemových %) dochází k nárůstu viskozity, která pak snižuje účinnost systému. Ideální velikost částic je v rozmezí 0,5 až 10  $\mu\text{m}$ . Díky této velikosti překonávají Brownův pohyb a zároveň u nich dochází k pomalé sedimentaci. Díky menšímu průměru částic v suspenzi, dochází ke snížení smykového napětí. Naopak při zvyšování podílu jemných částic vůči hrubším, dojde ke snížení viskozity v neaktivovaném stavu. [12,15,16]

##### 3.2.2 Teplota

Způsob výroby feromagnetických částic (nejčastěji z vysoce čistého železa) probíhá rozkladem pentakarbonylu železa. U izotropních i anizotropních vzorků MR kompozitu, které

byly tvořeny PUR matricí a CIP, došlo díky ojedinělé struktuře PUR matrice k vlivu teploty na vlastnosti připravených MR elastomerů. Se zvyšující se teplotou a intenzitou magnetického pole dosahoval MR efekt při teplotě 80 °C hodnoty až 4177 % (Obr. 10). Magneto-reologické elastomery jsou často využity v aplikacích, kde jsou vystaveny širokému rozsahu teplot. [7,11]



Obr. 10. Elastická složka smykového modulu v závislosti na teplotě pro izotropní a anizotropní vzorek v magnetickém poli

### 3.2.3 Intenzita vnějšího pole

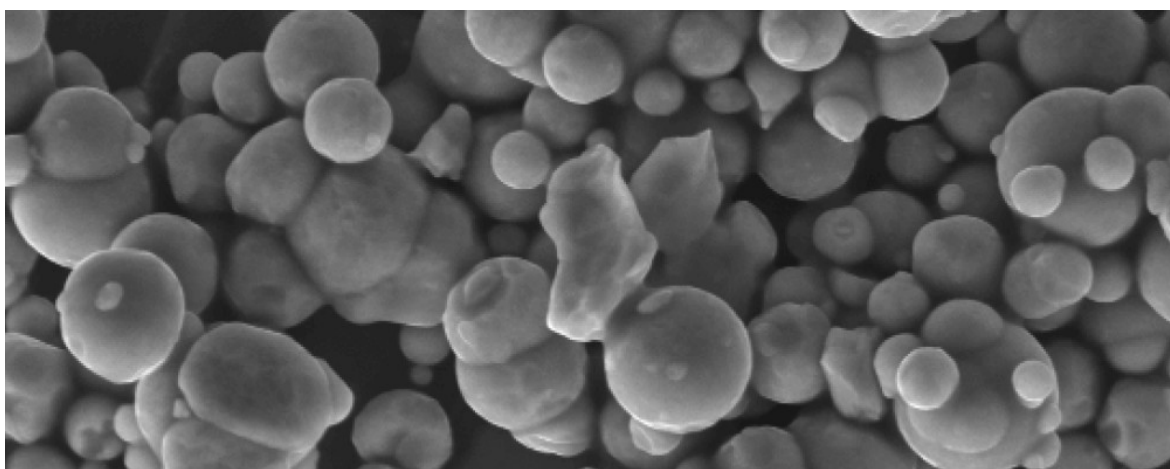
Magneto-reologický efekt v suspenzích ovlivňuje nejvíce působení vnějšího magnetického pole. Částice se začnou agregovat ve směru působení siločar a to jakmile dojde k překročení kritické hodnoty intenzity magnetického pole. Při dalším zvyšování pole dojde ke zkompatnění a ztuhnutí vytvořených vnitřních struktur. Jestliže má intenzita pole rostoucí charakter, může v určitém okamžiku dosáhnout magnetické saturace (nasyčení) materiálu, který tvoří dispergovanou část. Z magnetické saturace také zjistíme maximální hodnoty magnetického pole, při nichž je dosaženo nejvyšších možných mezí kluzu. [10,13]

### 3.3 Magnetoreologické kapaliny

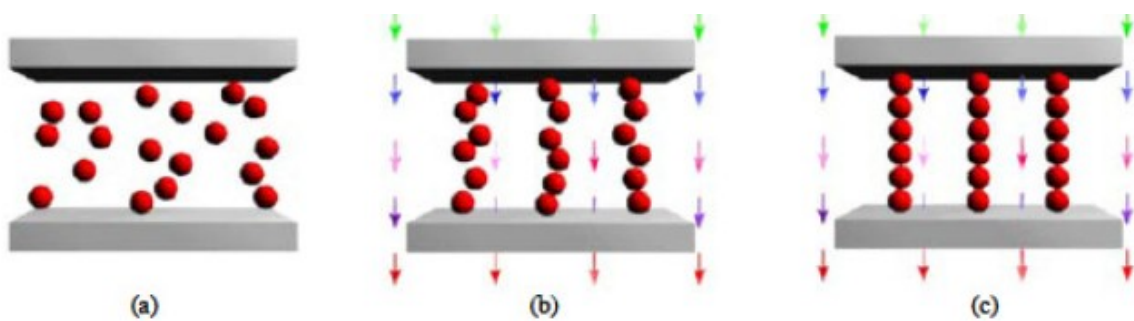
Magneto-reologické kapaliny se skládají ze tří základních složek: feromagnetické částice, nosná kapalina a aditivní přísady. Patří do skupiny tzv. inteligentních materiálů, které se vyznačují rychlým přechodem z kapalného do pevného stavu za přítomnosti vnějšího magnetického pole. Konvenční MR kapaliny jsou dvoufázové kapaliny, které jsou tvořeny vysoce magnetizovatelnými mikročásticemi dispergovanými v nemagnetickém kontinuál-



ním prostředí. Jinými slovy se tedy v neferomagnetické kapalině disperguje jemný prášek (Fe, Ni, Co nebo jejich slitiny) ve formě mikročastic. Mezi nosné kapaliny se řadí minerální a silikonové oleje, polyestery, syntetické uhlovodíky nebo voda. Ve vnějším magnetickém poli se zmagnetizují mikročastice a podél siločar magnetického pole vytvoří uspořádané řetězce, jejichž síla závisí na intenzitě magnetického pole a typu častic. Díky tvorbě řetězců mikročastic v kapalně matrici dochází ke změnám fyzikálních a reologických vlastností. Tento proces se v současné době nejčastěji využívá pro aplikace tlumičů vibrací, mechanických rázů a výrobu spojek. Bez aplikace magnetického pole je MR kapalina volně tekoucí suspenze s podobnou konzistencí jako motorový olej. [14,19,21]



Obr. 11. Snímek častic železa pod elektronovým mikroskopem

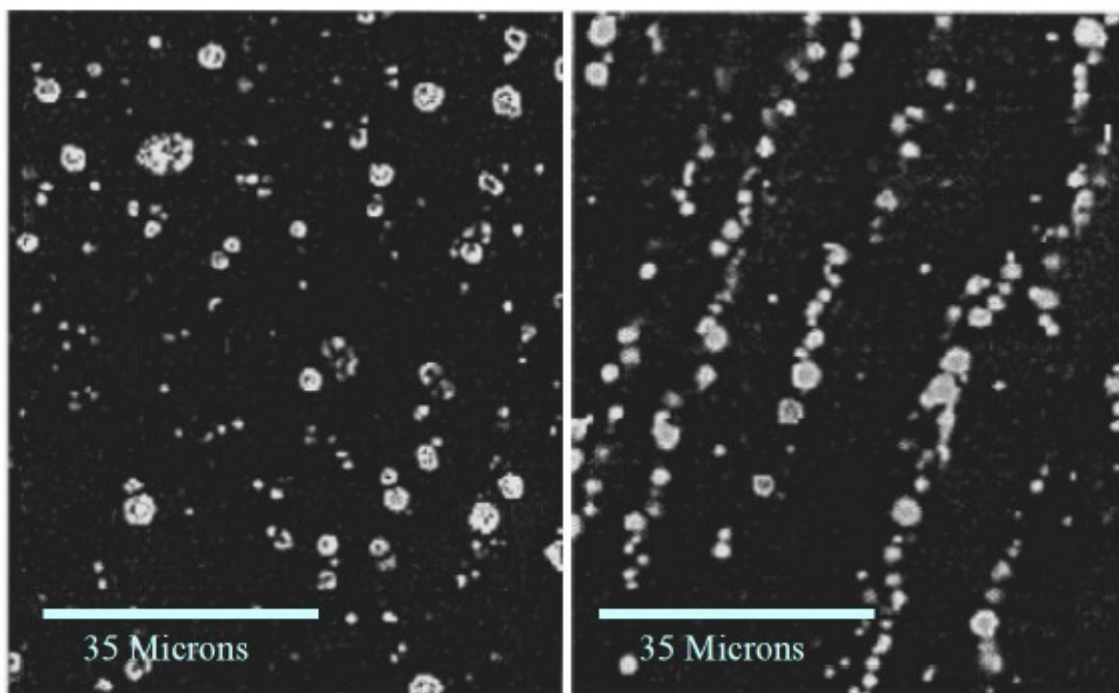


Obr. 12 Aktivace MR kapaliny: (a) bez mag. pole (b) s mag. polem (c) plně zorientované častice

### 3.4 Magnetoreologické elastomery

Patří do skupiny tzv. inteligentních materiálů a mají modul pružnosti reagující na magnetické pole, díky čemuž získaly široké uplatnění. Jejich reologické vlastnosti obvykle bývají řízeny aplikací vnějšího magnetického pole. V MRE je obecně olej nahrazen do určité míry elastickým materiálem.

Magnetoreologické elastomery se skládají z magneticky polarizovatelných částic dispergovaných v polymerní matrici. Během síťování, aplikované magnetické pole vyvolá interakci mezi částicemi, které podporují vznik sloupců orientovaných ve směru pole (Obr. 13) a vznik anizotropní struktury ve formě řetězců. Výsledná struktura pomáhá zvýšit závislost mechanických vlastností MRE na vnějším aplikovaném magnetickém poli. [17,19,22]



*Obr. 13. Levá strana – snímek náhodně dispergovaných částic, pravá strana – částice zřetelně zorientovány působením magnetického pole*

### 3.5 Magnetické charakteristiky částic

#### 3.5.1 Diamagnetismus

Mezi nejméně aktivní magnetické látky se řadí diamagnetické látky. Díky působení vnějšího magnetického pole je u těchto látek nulový moment. Ovlivněním pohybů elektronů dochází na základě diamagnetické látky ve vnějším magnetickém poli k tzv. Larmorově precesi. Vzniká tím opačně orientovaný magnetický moment vzhledem k vektoru intenzity vnějšího pole. Diamagnetická látka je vytláčována z míst s větší indukcí do míst s nižší indukcí. Indukovaný moment zmizí (tím i Larmorova precese) jakmile přestane pole působit. [8,14]

### 3.5.2 Paramagnetismus

Při chybějícím vnějším magnetickém poli mají všechny molekuly a atomy nenulový magnetický moment. Díky náhodné orientaci jednotlivých dipólů je celkový magnetický moment paramagnetické látky nulový. Tyto atomy na sebe nepůsobí magneticky ani mechanicky. Tato teorie platí jenom pro plyny se sníženým tlakem (ne pro všechny látky).

Aplikací vnějšího magnetického pole se přinutí magnetické momenty orientovat do směru pole. Chaotický tepelný pohyb brání uspořádání momentů do směru vnějšího pole. [7,9]

Susceptibilita paramagnetických látek se liší od diamagnetické hlavně svou teplotní závislostí na základě vztahu:

$$\chi^{(T)} = \frac{C}{T} \quad (11)$$

, kde

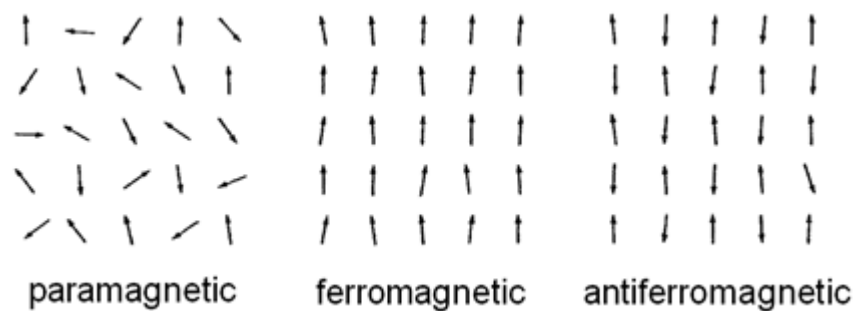
$C$  - Curieho konstanta

$T$  – termodynamická teplota

Ve velmi silných polích dochází k nasycené magnetizaci, je to stav, kdy jsou do směru působícího magnetického pole srovnány všechny momenty atomů dané látky.

### 3.5.3 Feromagnetismus

Spinové magnetické momenty ovlivňují především vnější pole. Vlastnosti feromagnetismu určují elektrony na nezaplňených hladinách s nevykompenzovanými spinovými momenty. Naproti tomu u paramagnetismu k magnetizaci přispívají orbitální momenty. V paramagnetismu se jedná o individuální proces. Ve feromagnetismu je to proces kolektivní. Je možné předpokládat, že existuje nějaká vnitřní interakce, která se snaží srovnat magnetické momenty vzájemně rovnoběžně. Obvykle se nazývá kvantová síla nebo výměnné pole. Závisí na vzájemném překrývání elektronových drah. Interakce má rozměr energie. Malá hodnota odpovídá velkým vzdálenostem, tudíž nemůže konkurovat tepelnému pohybu. [12,15]



Obr. 14. Základní typy uspořádání magnetických momentů

### 3.5.4 Curieova teplota

Je to teplota, při které se feromagnetikum rozděluje na jednotlivé domény, kterým se odborně říká Weissovy domény. Teplota má velký vliv na spontánní magnetizaci. K největší magnetizaci dochází při absolutní nule. Postupným zvyšováním teploty se změní momentům jejich orientace díky tepelnému pohybu. Feromagnetická látka ztrácí nad Curieovou teplotou magnetické vlastnosti a chová se jako paramagnetikum. Pro její susceptibilitu platí Curieův-Weissův zákon:

$$X = \frac{C}{T - T_C} \quad (12)$$

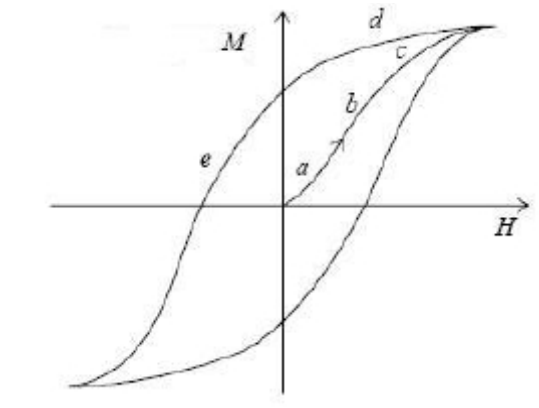
, kde:

$T_C$  - Curieova teplota

### 3.5.5 Hystereze

Magnetické pole není vůči magnetizaci lineární, je závislé na historii procesu. Feromagnetická látka, která není zmagnetizována, má domény orientované do náhodných směrů. Spontánní magnetizace se navenek neprojevuje. Zapnutím mírného magnetického pole dojde k posunutí doménových stěn ve prospěch domén s orientací shodnou s vnějším polem (Obr. 15, křivka a). Jedná se o vratný proces. Křivka má jen mírné odchytky od lineární funkce magnetického pole. Při zvyšování síly vnějšího pole dojde k výraznému posuvu doménových stěn, tento proces je už nevratný (Obr. 15, křivka b). Další zvyšování magnetického pole nemá vliv na zvyšování magnetizace (Obr. 15, křivka c). Magnetizace je saturována. V tento moment při snižování intenzity vnějšího pole proběhne proces opačný. Jedná se o nevratný děj a při nulové intenzitě vnějšího pole bude mít látka zbytkovou mag-

netizaci (Obr. 15, křivka d). Pro odmagnetizování se použije opačné orientace (Obr. 15, křivka e). [3,5,6]



Obr. 15. Hysterezní smyčka

#### 4 APLIKACE MRE

Elastomery s obsahem plniv, které jsou citlivé na magnetické pole, umožňují kompozitům variabilně kontrolovat jejich tuhost. Výhody těchto aplikací jsou: rychlá odezva na venkovní stimul, stálost za vyšších napětí a bezkontaktní kontrola pomocí vnějšího magnetického pole. Tyto výhody se dají využít v širokém spektru odvětví, jako například tlumící účinky. Například pouzdrové ložisko, které je založeno na magnetickém elastomeru, má patentované firma Ford Motor. Podle hmotnosti vozidla se upravuje tuhost pouzdra. To pak pomáhá kontrolovat odpružení vozidla, čímž zlepšuje pohodlí cestujících. Další aplikací pouzder jsou tzv. silen bloky (pouzdra na uložení motoru) díky nimž lze kontrolovanou tuhostí ovlivnit vibrace motoru, které se přenáší v celém automobilu. Tyto komponenty také minimalizují rezonance způsobené opotřebením brzdových kotoučů. Kvůli vysokým pracovním teplotám se u těchto komponentů používá jako matrice silikonový elastomer a plnivo částice železa. Podobné komponenty si nechala patentovat i Toyota, avšak namísto silikonových elastomerů používá silikonové gely. [10,16]

Významné změny v tuhosti v důsledku aplikovaného magnetického pole slouží k ovládní tlumících vlastností. U vysokých frekvencí, a to až v rozsahu několika kHz, se významnost MR efektu zvyšuje. Proto se MR elastomery mohou používat při konstrukcích zařízení eliminujících hluk a vibrace. Další využití se nachází v oblasti medicíny, při navrhování akumulátorů napodobujících činnost svalů nebo při tvorbě síly a pohybu. [12,13]

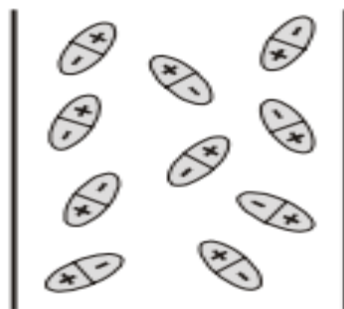
## 5 POLARIZACE DIELEKTRIKA

Tento děj nastává, je-li dielektrikum vloženo do elektrostatického pole. Pro vysvětlení chování dielektrika v elektrostatickém poli se rozlišují dva typy dielektrik:

- Polární dielektrika
- Nepochární dielektrika

### 5.1 Polární dielektrika

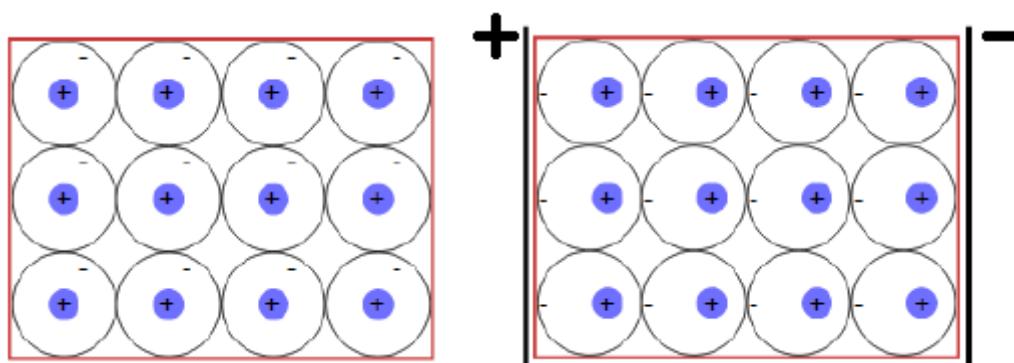
Jedná se o dielektrika s rozložením nábojů jako celku vykazující vlastnosti elektrického dipólu (mají vlastní elektrický dipólový moment, např. molekula vody). Pokud není polární dielektrikum v elektrostatickém poli, dochází k nahodilé orientaci vektorů těchto dipólových momentů (Obr. 16). Když vložíme polární dielektrikum do vnějšího elektrostatického pole, dochází u molekul ke stáčení vlivem rotačního účinku sil pole. Směr dipólového momentu se shoduje se směrem intenzity vnějšího elektrostatického pole. [38,39]



Obr. 16. Chaoticky rozmístěné dipóly

### 5.2 Nepochární dielektrika

Jedná se o molekuly nebo atomy, které nemají vlastní elektrické dipólové momenty. Jejich polarizace, po vložení nepochárních dielektrik do vnějšího elektrostatického pole, probíhá odlišným způsobem. Prostorové rozdělení kladného a záporného náboje způsobují síly vnějšího pole. Atomy nebo molekuly ve vnějším poli tím pádem získávají elektrický dipólový moment. [38,40]



Obr. 17. Schéma vzniku indukovaného dipólového momentu po vložení dielektrika do vnějšího elektrického pole.

### 5.3 Iontová relaxační polarizace

Obvykle se projevuje u molekul, atomů nebo iontových sloučenin, které jsou v látkách slabě vázány. Mechanismus iontové relaxační polarizace je možné popsat tzv. modelem dvojitě potenciálové jámy, tj. všechny přechody nosičů jsou stejně pravděpodobné, pokud na dielektrikum nepůsobí elektrické pole. Za přítomnosti elektrického pole dojde k posunutí energetických úrovní výchozích poloh nosiče. Z výchozí polohy do konečné polohy překonává nosič menší bariéru. V opačném případě je tato bariéra vyšší. Z tohoto důvodu dochází k nerovnoměrnému rozložení nosiče náboje, neboť se v konečné poloze nachází více nosičů než ve výchozí poloze. Vzniká dipólový moment v jednotce objemu dielektrika. Polarizační účinek silně ovlivňuje tepelný pohyb, a proto je tedy tato polarizace silně závislá na teplotě. [39,41]

### 5.4 Dipólová relaxační polarizace

Probíhá u elementárních látek s dipólovými momenty. Slabě vázané dipólové momenty nebo zcela volné se dokážou vlivem elektrického pole natáčet do směru odpovídajícího směru působení pole. Tepelný pohyb částic brání tomuto natáčení. Z toho plyne, že dipólová relaxační teorie je stejně jako předchozí polarizace silně závislá na teplotě. Bez přítomnosti elektrického pole v dielektriku dochází k nahodilé orientaci částic a látka se chová elektricky neutrálně. V přítomnosti elektrického pole dochází k přechodu částic do energeticky výhodné polohy. Dipólový moment má orientaci shodnou s orientací lokálního pole. [40]



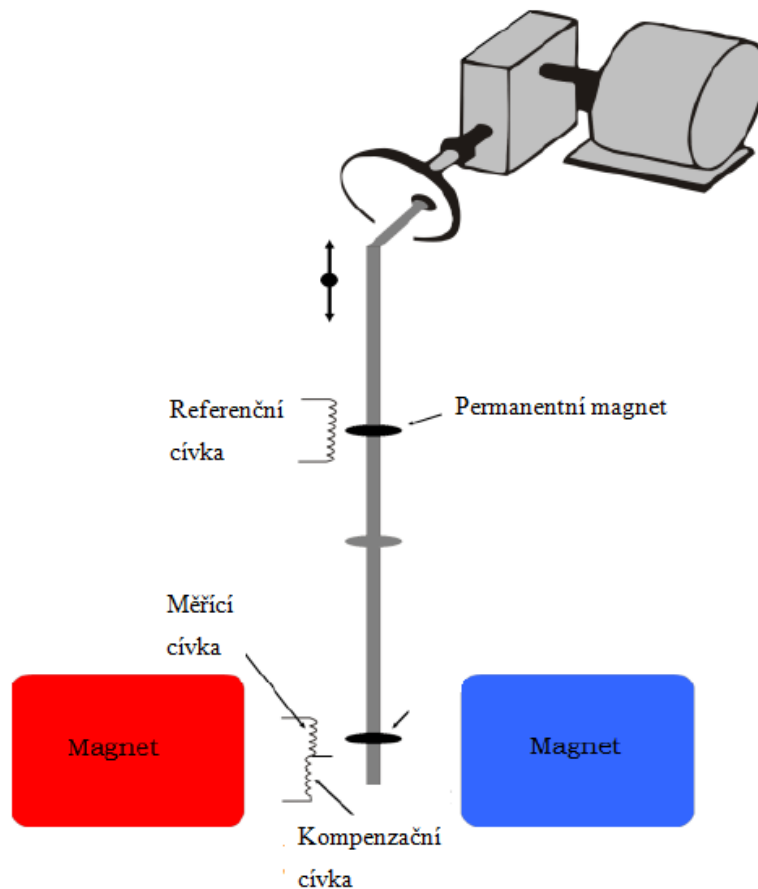
## 5.5 Mezifázová polarizace

Označovaná též jako migrační nebo Maxwell Wagner Sillarsova polarizace. Polarizačních jevů v dielektriku se účastní elektricky volné náboje i vázané nosiče náboje. Důležitou podmínkou, která vede ke vzniku migrační polarizace, je existence makroskopických nehomogenit v materiálu. Volné nosiče náboje se po přiložení vnějšího elektrického pole zachycují na těchto nehomogenitách. Lze do nich zařadit praskliny, bubliny, strukturální poruchy nebo různé nečistoty materiálu. V těchto nehomogenitách jsou vytvořené oblasti, které neodpovídají vlastnostem původního dielektrika. Dochází zde ke vzniku jiných vlastností, což se projeví různou relativní permitivitou a měrnou elektrickou vodivostí. Tím dochází ke stavu, že nosiče elektrického náboje se v těchto místech zachycují a vytváří rozhraní dvou prostředí, jako by se jednalo o rozhraní dvou různých dielektrik. [47]

## 6 ZKUŠEBNÍ METODY MRE

### 6.1 Vibrační magnetometrie

Jde o vibrační metodu měřící vibrační tok, která se označuje anglickou zkratkou VSM (Vibrating-Sample Magnetometer). Popisuje vznik elektromotorického napětí na cívce při časové změně magnetického toku plochou cívkou. Při měření dochází k vibraci vzorku v místě měřicí cívky. Vibrační magnetometrie pracuje jako radiometr měřící rozdíl magnetické indukce v měřicím přístroji se vzorkem i bez něj. Výstupem z měření je informace o magnetizaci zkoumaného vzorku. Prostor mezi póly elektromagnetu, omezuje maximální rozměry vzorku. To znesnadňuje přímé určení vnitřní hodnoty magnetizace. U vzorku s menšími rozměry dochází k demagnetizačnímu efektu, který zkresluje výsledky. Výhoda metody spočívá v určení saturační magnetizace. V současné době lze demagnetizační efekt (díky konstrukci přístroje) zanedbat a změřit vnitřní hodnotu magnetizace nebo skutečnou hysterezní křivku materiálu. [20,21]



Obr. 18. VSM magnetometr

## 6.2 Viskoelastické měření MRE

Při mechanickém namáhání dochází u viskoelastických látek ke změně chování, látka se chová současně jako pružná (elastická) látka a viskózní kapalina. Tento typ látky reaguje na mechanické namáhání se zpožděním (Obr. 19). Chování suspenzí v rozsahu malých deformací lze popsat jako viskoelastické systémy s komplexním smykovým modulem  $G^*$ , rozděleným na reálnou složku,  $G'$ , a imaginární složku,  $G''$ :

$$G^* = G' + iG'' \quad (13)$$

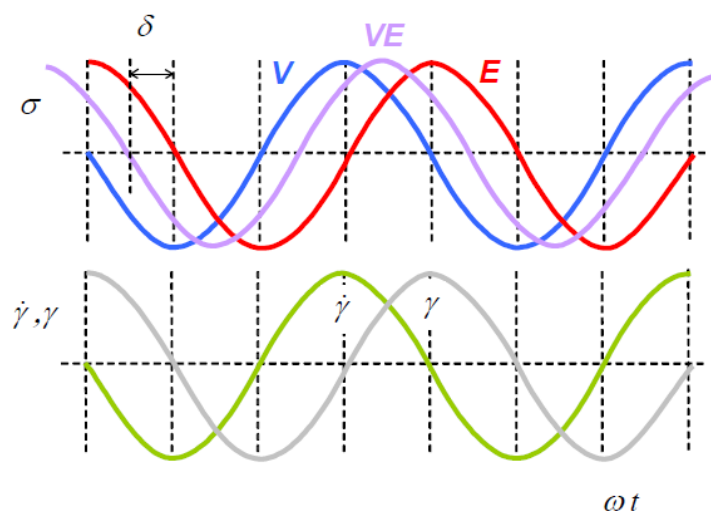
Při měření dochází k oscilaci nejčastěji jedné měřicí části geometrie konstantní hodnotou deformace, která se zvolí tak, že napětí a rychlost bude lineární. Označujeme ji jako oblast lineární viskoelasticity. V této oblasti je elastická a viskózní část nezávislá na úhlové frekvenci,  $\omega$ . Dochází zde jenom k deformacím vnitřních struktur. Při vyšších koncentracích pevných částic dosahuje  $G''$  nižších hodnot a  $G'$  vyšších hodnot již bez přítomnosti magnetického pole. Naopak při aplikaci vnějšího magnetického pole tekutina tuhne a oba viskoelastické moduly se zvýší o několik řádů. [17,19]

Z hodnot dynamických modulů můžeme definovat komplexní smykovou viskozitu:

$$\eta^* = \frac{\tau(t)}{r(t)} = \frac{G^*}{i\omega} \quad (14)$$

,kde

$r$  - úhlová deformace



Obr. 19. Odezva napětí při oscilování: V- Newtonská kapalina, E – Hookovo těleso, VE – viskoelastický materiál

### 6.3 Dielektrická spektroskopie

Dielektrická spektroskopie (DS) je velmi šetrný nástroj pro charakterizaci materiálů a měření dielektrických vlastností. Nedochozí při ní k mechanické deformaci vzorku. Princip metody spočívá v interakci elektromagnetického vlnění s elektrickým dipólovým momentem zkoumaného materiálu. Rozsah frekvencí se pohybuje v rozmezí  $10^{-6}$  Hz až  $10^{10}$  Hz. Vyzařování vlnění probíhá společně s absorpcí v důsledku změn indukovaných dipólových momentů. Dané změny jsou závislé na polarizovatelnosti molekul nebo atomů. V případě nízké frekvence je indukovaný dipólový moment v porovnání s permanentním dipólovým momentem systému malý. Dielektrická spektroskopie je určena hlavně pro zkoumání polárních molekul v plynné nebo kapalně fázi, kde dochází k absorpci vlnění změnou orientace permanentních dipólů. V roce 1931 byla tato metoda objevena Nizozemským fyzikem Peterem Debyem. [16,19]

V pevném stavu je použití této metody poněkud složitější. Dielektrické chování pevných látek může být přesně popsáno pouze z hlediska excitovaného stavu a důsledkem toho mohou indukované dipólové momenty výrazně přispět k absorpci vlnění i při nízkých frekvencích. Tyto momenty jsou velmi ovlivněny intermolekulárními interakcemi, které bývají popsány v excitovaném stavu.

Příspěvek excitovaných stavů k permanentním dipólovým momentům ve viskoelastických látkách a tuhých polymerech není moc velký. Polymer, který v základním stavu obsahuje polární skupiny v první aproximaci, je považován za nepříliš silný systém interakcí elektrických dipólů. Díky této skutečnosti může být DS používána pro kapaliny a plyny, použita také pro polymerní systémy.

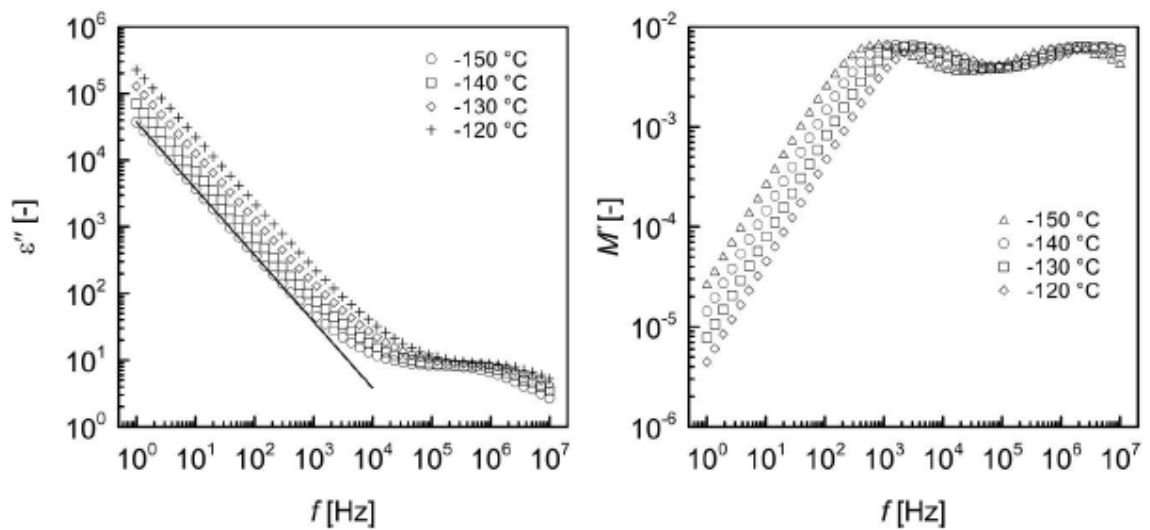
Statický efekt je odezva látky na vnější elektrické pole. Měřit můžeme jenom celkovou sumu momentů, ne každý moment zvlášť. Z toho plyne, že dielektrická spektroskopie je založena na statistickém termodynamickém kritériu. [10,15]

Pomocí DS se měří komplexní relativní permitivita  $\epsilon^*$  v širokém frekvenčním rozsahu:

$$\epsilon^* = \epsilon' + i\epsilon'' \quad (15)$$

Dále měříme veličiny inverzní a extenzivní, jako je například komplexní elektrická vodivost:

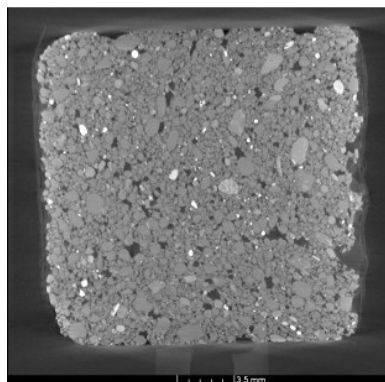
$$\sigma^* = \sigma' + i\sigma'' \quad (16)$$



Obr. 20. Obecná transformace ztrátové složky permitivity na elektrický modul

#### 6.4 3D tomografie

3D tomografie je metoda zobrazení, která nepoškozuje při analýze zkoumaný předmět (také je schopna zobrazovat vzorek v různých řezech). Výsledkem měření jsou obrazy představující virtuální řezy vzorkem. Tyto řezy jsou matematicky spočítány z rentgenových snímků objektu vytvořených během otáčení vzorku o 360°. K tomuto ději dochází u vědeckých a průmyslových tomografických stanic. V lékařství se otáčí zdroj s detektorem kvůli stabilizaci pacienta. Počítačová tomografie (mikrotomografie) s voxelovým rozlišením v rozmezí jednotek až desítek mikrometrů, dovoluje snímat vnitřní struktury trojrozměrných předmětů s vysokým prostorovým rozlišením. Tato metoda našla uplatnění jak v průmyslu (strojírenství, stavebnictví, elektrotechnika) tak i různých vědních oborech. Pomocí mikrotomografie lze snadno zjistit tvar vnějších a vnitřních struktur, praskliny, porozity a jiné vady vzorku. [12]



Obr. 21. Tomografický řez vzorku vápenaté malty

## 7 ZHODNOCENÍ STUDIJNÍ ČÁSTI

V teoretické části byly nejdříve popsány základní informace o kompozitních materiálech a jejich rozdělení. V další části je popis reologických vlastností látek, normálové a tečné napětí, popis a princip měření danými viskozimetry a také vysvětlen rozdíl mezi Newtonskými a neNewtonskými látkami. Ve zbytku teoretické části jsou již diskutovány samotné magnetoreologické kompozity a to z pohledu jejich vlastností, aplikací v reálném prostředí, magnetickými charakteristikami částic a jejich zkušebními metodami. Dále pak vysvětlím co je magnetoreologický efekt a faktory, které jej ovlivňují.

## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

## 8 CÍLE PRÁCE

Podle zadání diplomové práce byly stanoveny tyto cíle:

- Připravit různé vzorky MRE lišících se koncentrací a orientací částic uvnitř systému, případně také modifikací daných částic polymerním potahem
- Provést analýzu distribuce částic v připravených MRE systémech s ohledem na parametry v průběhu jejich přípravy
- Vyhodnotit a diskutovat získané výsledky opět ve vztahu ke vstupním parametrům při přípravě MRE systémů a to pomocí rotačního viskozimetru v přítomnosti vnějšího magnetického pole a dielektrické spektroskopie v širokém teplotním rozsahu



## 9 PŘÍPRAVA MAGNETOREOLOGICKÝCH ELASTOMERŮ

### 9.1 Materiály

CI částice (SL jakosti), který byl použit v rámci celé této práce je obchodním produktem firmy BASF (Německo). Podle materiálového listu od výrobce obsahuje CI prášek minimálně 99,5 % čistého železa. K modifikaci částic byl použit tetraethoxysilan (TEOS, >98 %), jehož výrobcem je Sigma Aldrich (USA). Rozpouštědla a látky na proplachování byly tetrahydrofuran (THF, p.a.), aceton (p.a.), ethanol (absolutní bezvodý, p.a.), toluen (p.a.) a kyselina chlorovodíková (HCl, 35%, p.a.), které byly získány od společnosti Penta Labs (Česká republika). [25]

Dále byl použit silikonový kaučuk Sylgard 184. Je to čirý, středně viskózní kapalný silikon, jehož dvě složky se dají snadno smíchat v poměru 10:1. Vnikne tak směs s nízkou viskozitou, která teče i při běžném tlaku. K vytvrzení dochází při pokojové teplotě (25 °C). Zvýšením teploty do maximální výše 150 °C dojde k urychlení vytvrzování. Tyto elastomery se vytvrzují bez vývinu tepla konstantní rychlostí bez ohledu na tloušťku nebo stupeň prostorového omezení a bez vedlejších produktů. [25,28]

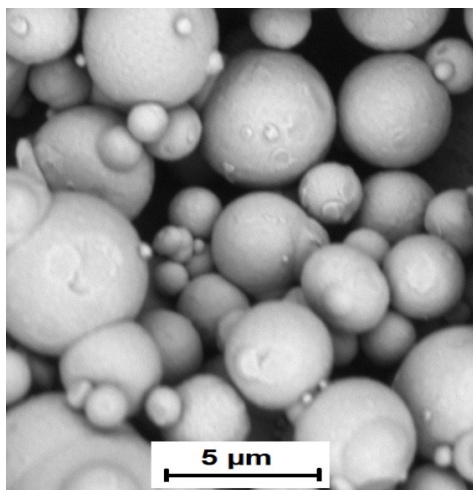
### 9.2 Syntéza

Základní postup chemické aktivace a modifikace CI objevil Belyavskii. Zkráceně lze tento proces popsat následovně. CI částice (100 g) byly umístěny do kádinky a poté bylo přidáno 250 ml 0,5 M HCl, jejíž účinek byl nastaven na dobu 10 minut za účelem vytvoření reaktivních hydroxylových skupin na povrchu CI částic. Takto aktivované CI částice byly následně promyty destilovanou vodou 5 x 300 ml, ethanolem 3 x 150 ml a acetonem 3 x 100 ml za použití dekantační metody s permanentním magnetem pro urychlení sedimentace částic na dně kádinky. Takto promyté CI částice byly poté sušeny po dobu 3 hodin při teplotě 60 °C a za sníženého tlaku (200 mbar), aby se odstranil zbytkový aceton. Chemicky aktivované vysušené CI částice (90 g) byly umístěny do 500 ml tříhrdlé baňky a dispergovány ve 300 ml nepolárního rozpouštědla toluenu. Baňka byla vybavena mechanickým míchadlem, zpětným chladičem a teploměrem. Poté byl přidán TEOS (10 ml) jako modifikátor částic a suspenze byla míchána rychlostí 250 ot/min a zahřívána pod zpětným chladičem po dobu 6 hodin při teplotě 110 °C. Po skončení reakce byly modifikované částice CI důkladně promyty toluenem 3 x 100 ml, ethanolem 3 x 150 ml a acetonem 3 x 100 ml, a sušeny po dobu 24 hodin opět za sníženého tlaku. [29,32]

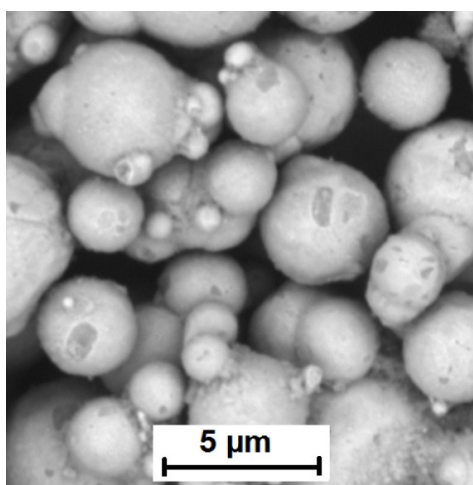
### 9.3 Charakterizace CI částic

Snímací elektronový mikroskop (SEM) byl použit pro důkladné prozkoumání distribuce a morfologie připravených částic (Phenom Pro, Phenom-World, Nizozemí). Presentované SEM snímky byly pořízeny při urychlovacím napětí 5 kV s použitím detektoru sekundárních elektronů, aby mohla být prokázána přítomnost vrstvy TEOS na CI částicích. [33,37]

SEM Snímky původních CI částic a CI/TEOS částic jsou zobrazeny na obrázcích 22 a 23. Analýza snímků potvrdila, že CI částice, stejně jako CI/TEOS částice mají kulovitý tvar. Modifikace ovlivnila morfologii částic. Povrch CI částic je zcela hladký, zatímco povrch modifikovaných CI částic je hrubší, což dokazuje přítomnost modifikované povrchové vrstvy. [33,35]



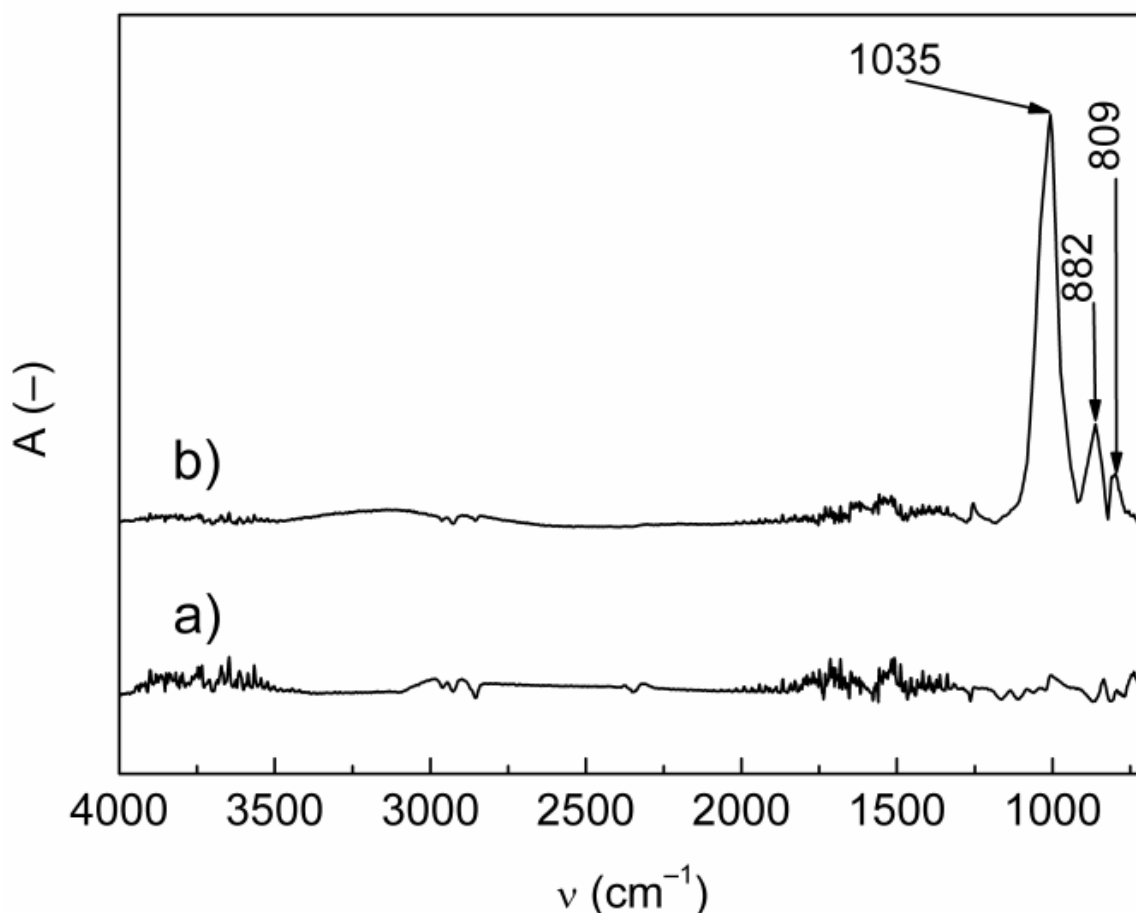
*Obr. 22. SEM Snímky původních CI částic*



*Obr. 23. SEM Snímky původních CI/TEOS částic*

Infračervená spektroskopie s Fourierovou transformací (FTIR) byla provedena za použití spektrometru Nicolet 6700 (Thermo Scientific, USA) v režimu zeslabené úplné reflektance (ATR). Absorbance ( $A$ ) závislá na vlnové délce,  $\nu$ , v rozmezí  $4000\text{--}700\text{ cm}^{-1}$  byla snímána pomocí germaniového krystalu. Pro každé měření spektra bylo použito spektrálním rozlišení  $2\text{ cm}^{-1}$ .

Metodou FTIR byla prokázána přítomnost povrchové vrstvy TEOS. Jak je vidět na obrázku 22, spektrum CI nevykazovalo žádné výrazné absorpční pásy díky svému chemickému složení. Avšak spektrum částic CI/TEOS vykazovalo vzory typické pro siloxanové materiály (Obr. 24). Pík na  $1035\text{ cm}^{-1}$  je přisuzován antisymetrickému roztahování vazby Si-O-Si. Zvýšené hladiny absorpce při  $882\text{ cm}^{-1}$  a při  $809\text{ cm}^{-1}$  jsou přiřazeny Si-OH a Si-C typické pro organo-křemičité sloučeniny. [33,35]

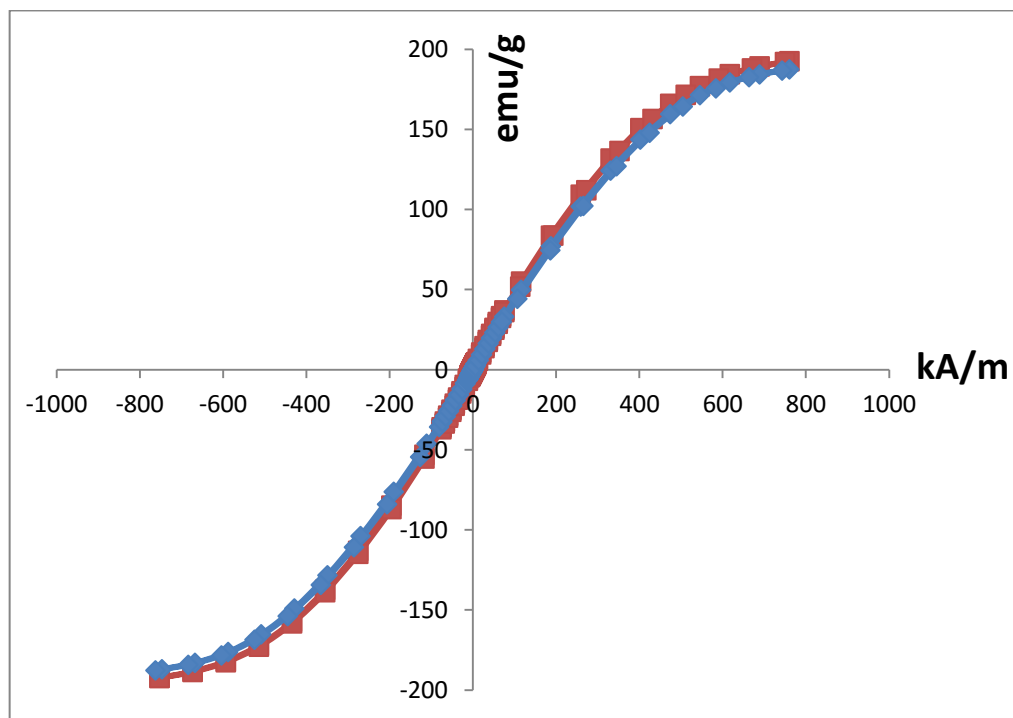


Obr. 24. Prokázání přítomnosti povrchové vrstvy TEOS

Magnetizace ( $M$ ) částic CI a CI-TEOS ve vnějším magnetickém poli v rozsahu  $\pm 10\text{ kOe}$  ( $\pm 780\text{ kA/m}$ ) byla zkoumána při laboratorní teplotě s použitím vibračního magnetometru

(VSM Model 7404, Lake Shore, USA). Frekvence vibrací byla nastavena na 82 Hz, přičemž amplituda vibrací byla 1,5 mm. [40,41]

Aplikace polymerního povlaku na povrchu částic CI může zvýšit termooxidační a chemickou stabilitu. Je však nutné zachovat dostatečnou hodnotu  $M$ , neboť aplikované povlaky jsou většinou neferomagnetické. Z tohoto důvodu byly zkoumány magnetické hysterezní smyčky CI před a po procesu povlakování, jak je znázorněno na obrázku 25. Jak se dalo očekávat, hodnota  $M$  se snížila v důsledku přítomnosti TEOS povlaku na částicích CI. I přesto, že metoda silanizace neumožňuje přímé řízení tloušťky navazované vrstvy, snížení hodnoty  $M$  lze považovat za zanedbatelné, což znamená, že tloušťka polymerní povrchové vrstvy se pohybovala v řádu nanometrů. Z tohoto důvodu je možné tvrdit, že molární poměry reakčních složek a reakční podmínky byly zvoleny optimálně. Oba materiály také vykazovaly téměř nulový hysterezní charakter, což ukazuje na rychlou a kompletní demagnetizaci procesu, tj. magnetickou charakteristiku, která je pro MR systémy vysoce žádaná. [39,42]



Obr. 25. Magnetizace částic CI a CI/TEOS ve vnějším magnetickém poli - ■ částice CI, ◆ částice CI/TEOS

## 9.4 Příprava elastomeru

Úkolem této diplomové práce bylo připravit vzorky MRE obsahující částice CI a modifikované částice CI (CI/TEOS) s různými koncentracemi (Tab. 1). Vzorky byly vytvrzeny při teplotě 60 °C v nepřítomnosti magnetického pole (isotropní) nebo v přítomnosti magnetického pole s různou intenzitou (anizotropní). Doba vytvrzování byla 200 min. Takto vytvrzené vzorky, byly následně podrobeny testování na přístrojích impedanční spektroskopie (Novocontrol Concept 50) a rotačním reometru (Anton-Paar, MCR502, Rakousko).

Tab. 1. Identifikace jednotlivých MRE vzorků (hmotnostní koncentrace)

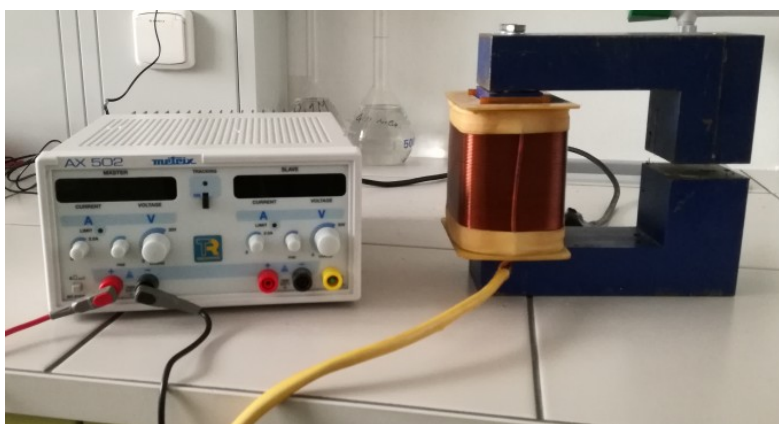
CI			TEOS		
iso	aniso 150 mT	aniso 300 mT	iso	aniso 150 mT	aniso 300 mT
30%	30%	30%	30%	30%	30%
50%	50%	50%	50%	50%	50%
70%	70%	70%	70%	70%	70%

Podrobný popis přípravy MRE byl následující. Navážení určeného množství (Tab. 1) CI částic, respektive CI/TEOS částic, kdy zbytek reakční směsi tvoří elastomerní matrice, která se skládá z polymerní složky a síťovadla v poměru 20:1. Takto navážená směs byla 5 minut intenzivně mechanicky míchána, čímž došlo k její homogenizaci.



Obr. 26. Vakuová sušárna

Obrázek 26 zobrazuje vakuovou sušárnu, která byla použita pro evakuaci nevytvrzených vzorků (25 °C, tlaku 40 mbar a době trvání 15 minut) s cílem odstranit bubliny ze systému, které byly přítomny jako důsledek míchání při homogenizačním procesu. Takto připravené směsi byly odlity do teflonových forem válcového tvaru (25 mm průměr, 1.2 mm výška). V případě isotropních vzorků byly formy umístěny do předem vyhřáté sušárny (60 °C). V případě anisotropních vzorků byly tyto vloženy do dutiny elektromagnetu protékaného elektrickým proudem 0,6 A resp. 1,5 A, což odpovídalo hustotě magnetického pole 150 mT resp. 300 mT. Skutečná hodnota intenzity magnetického pole byla zjištěna pomocí Teslametru (Magnet-Physik, FH 51, Dr. Steingroever GmbH, Germany).



*Obr. 27. Elektromagnet*

## 10 SLEDOVÁNÍ VLIVU FAKTORŮ V PRŮBĚHU VYTVRZOVÁNÍ POMOCÍ ANALITICKÝCH METOD

### 10.1 Magnetoreologie

Měření byla prováděna na rotačním rheometru Anton-Paar, MCR502. Tento přístroj vybavený motorem s nízkým třením ložisek a patentovaným normálovým snímačem, byl optimalizován, aby splňoval nejvyšší nároky reologických měření. Je zde možné provádět jakýkoliv typ reologického měření nebo kombinace reologických zkoušek, a to jak v rotačním, tak i v oscilačním režimu. Modularita systému umožňuje integraci širokého spektra teplotních rozpětí pro specifické aplikace.

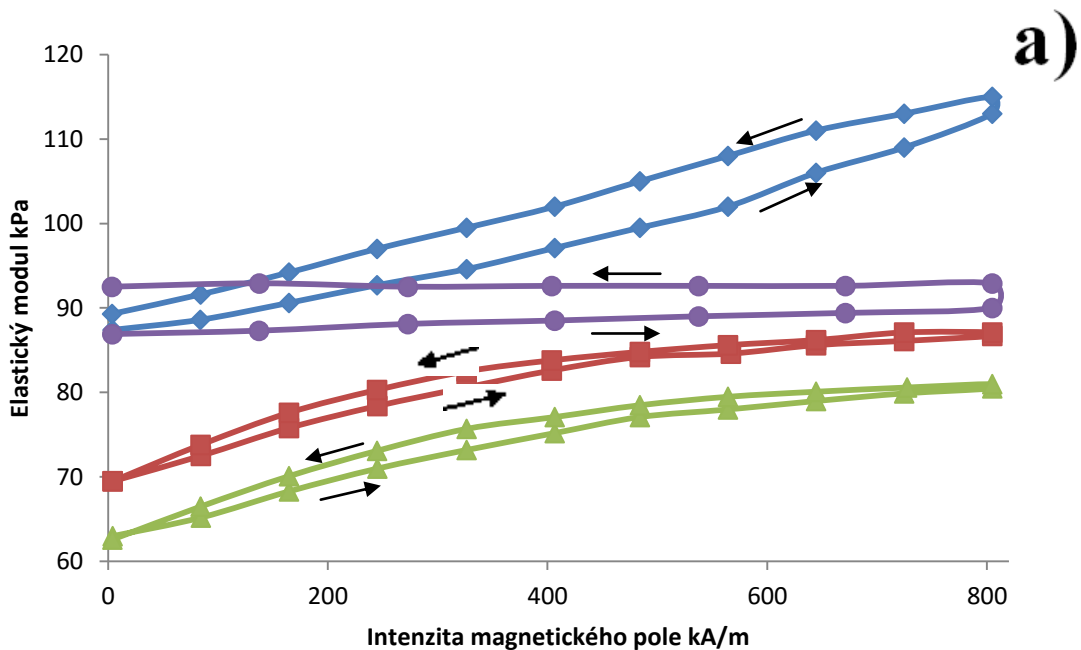


Obr. 28. Anton-Paar, MCR502

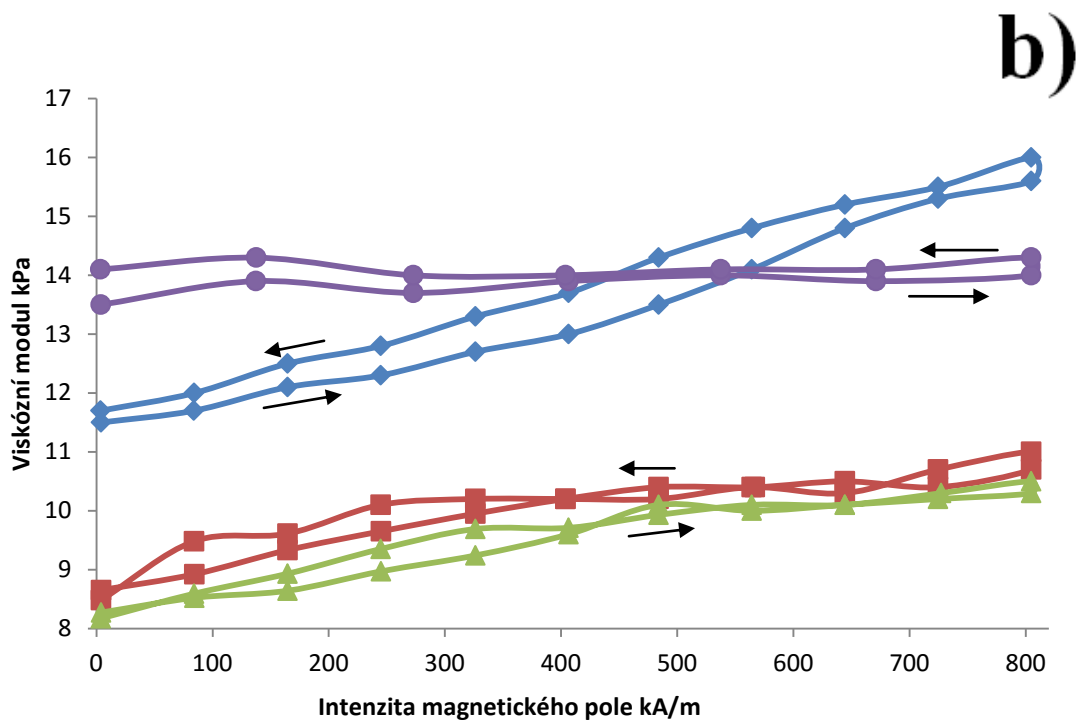
Každý vzorek byl podroben osmi měřením. Ty probíhaly při teplotě 25 °C, frekvenci 5 Hz a deformace 0,2 N. Síla, která zatěžovala vzorek po dobu měření, byla zvolena 1 N. Díky magnetostrickci narostla během zkoušky na 2 N. Čtyři měření proběhla na horní straně vzorku a čtyři na spodní straně vzorku. Pokud vzorek nevykazoval žádné poškození (trhliny, bubliny), byly výsledky z těchto zkoušek téměř totožné. K rozdílům docházelo jen v případech, kdy došlo při přípravě vzorku k nesprávné homogenizaci reakčního systému nebo při následné evakuaci v sušárně (vznik bublin). Takto poškozená strana vzorku neby-

la do následné zkoušky započítána. Ukázalo se, že dynamický modul se sytí po několika cyklech zatížení smykem. Kromě toho bylo pozorováno výrazné hysteretzní chování při namáhání ve sledovaném rozsahu amplitudy. Z tohoto důvodu sloužila první 2-3 měření k saturaci (nasyčení) hysteretzní smyčky, která se projevila až po několika zatěžovacích cyklech. Tudiž až čtvrté měření bylo relevantní a započítávalo se do výsledků měření v této diplomové práci. [32,33]

Při nízké koncentraci částic jsou elastické moduly koncentrací nižší nebo srovnatelné s hodnotou čisté matrice, což může být způsobeno nedostatečnou adhezí částic k matrici. Tento jev je výraznější pro případ anisotropních vzorků. Z obrázku 29a) je vidět, že se zvyšující se intenzitou magnetického pole roste elastický modul. U anisotropních vzorků (vytvrzovány při 150 a 300 mT) je pod hodnotou matrice. Isotropní měření se již dostává nad tuto hodnotu. Podobné chování můžeme vypočítat u viskózního modulu (Obr. 29b)) s tím rozdílem, že až tak nezáleží na intenzitě magnetického pole aplikovaného při vytvrzování daných vzorků MRE. Tyto křivky v uvedeném grafu téměř splývají. [32,33]

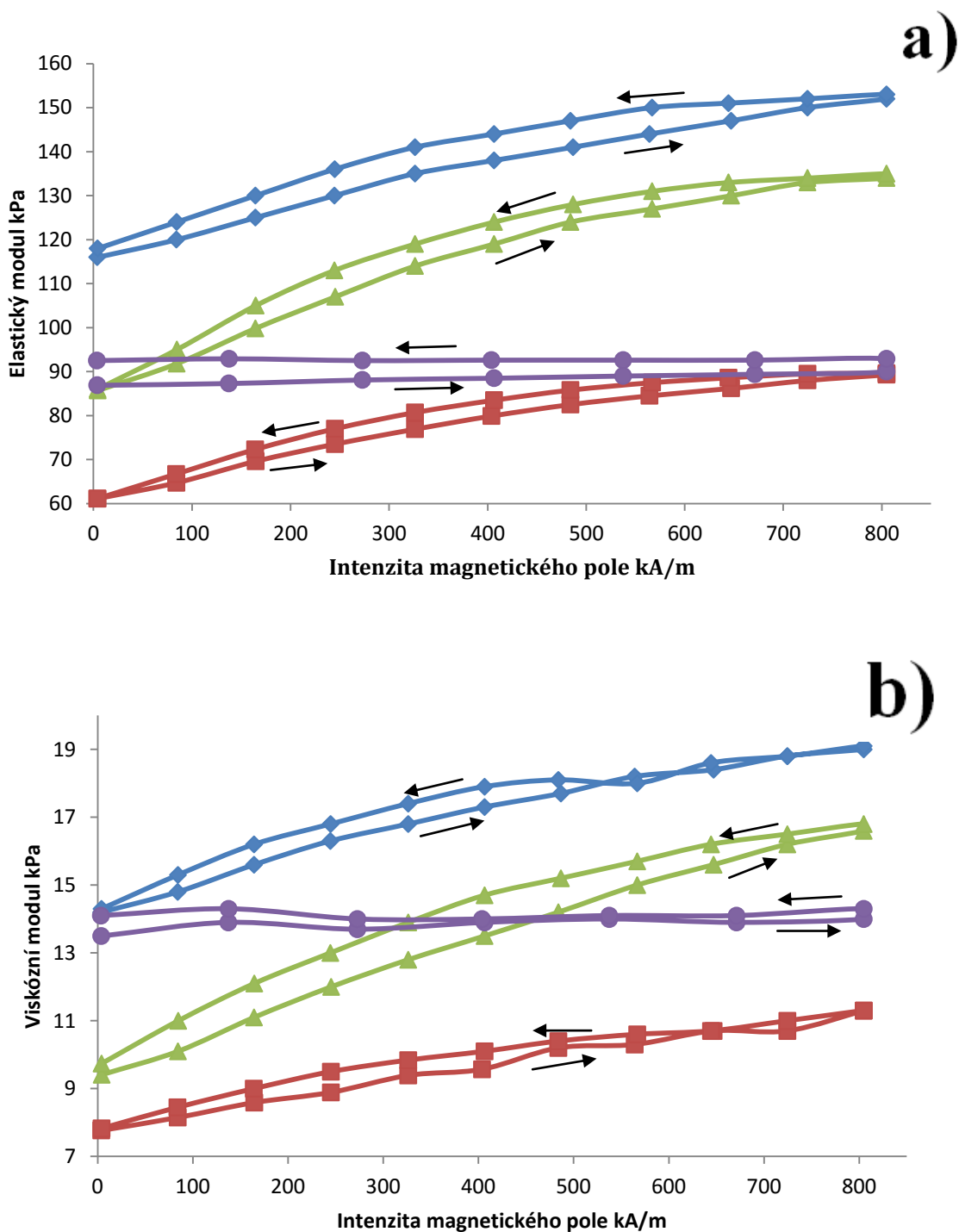






Obr. 29. CI 30 hm.% a) Elastický modul - ♦ isotropní, ■ 150 mT, ▲ 300 mT, ● matrice b) Viskózní modul - ♦ isotropní, ■ 150 mT, ▲ 300 mT, ● matrice

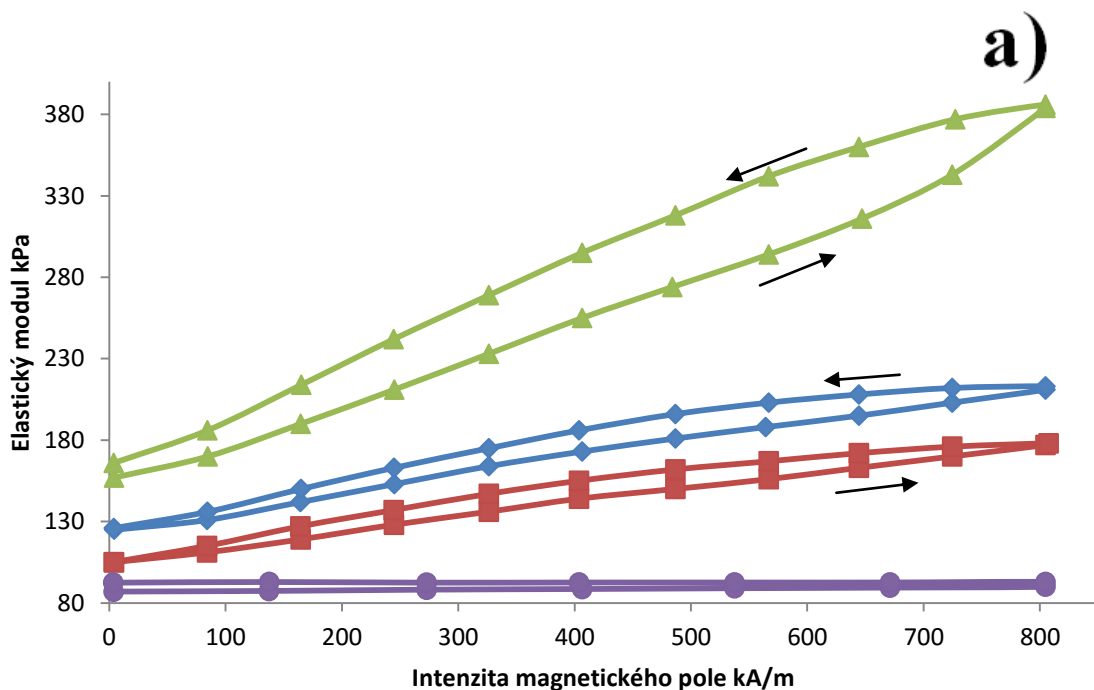
Při plnění 50 hm.% CI částic (Obr. 30a)) dosahuje nejvyšší hodnoty elastického modulu opět isotropní materiál. Jeho modul je na počátku zhruba o 25 kPa vyšší než při plnění 30 hm.% CI částic a jejich maximální hodnoty se liší téměř o 35 kPa. Modul je vyšší, než je hodnota modulu matrice. Anisotropní materiál vytvrzovaný při 300 mT vykazuje v tomto případě vyšší elastický modul než MRE vytvrzovaný při 150 mT. U vzorku 300 mT dochází k zásadnímu růstu viskózního modulu, křivka se jeví jako strmější (Obr. 30b)) na rozdíl od 30% CI částic (Obr. 29b)). [32,33]

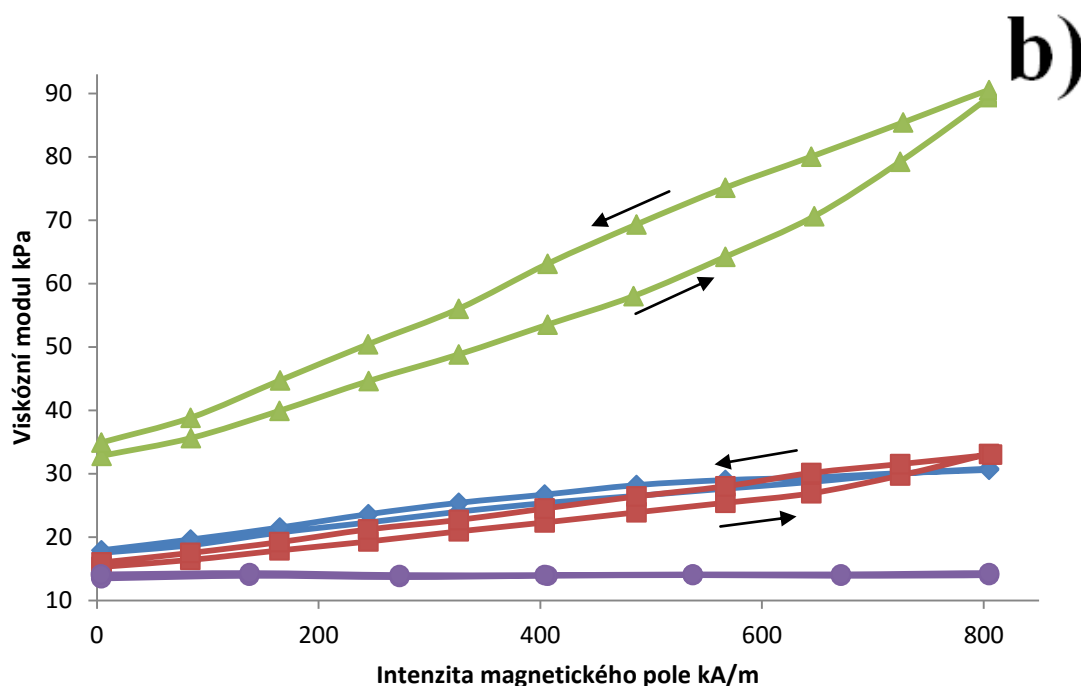


Obr. 30. CI 50 hm.% a) Elastický modul -  $\blacklozenge$  isotropní,  $\blacksquare$  150 mT,  $\blacktriangle$  300 mT,  $\bullet$  matrice b) Viskózní modul -  $\blacklozenge$  isotropní,  $\blacksquare$  150 mT,  $\blacktriangle$  300 mT,  $\bullet$  matrice

Kompozity obsahující 70 hm.% CI částic vykazovaly nejvyšší hodnoty elastických modulů, i když trend v oblasti vytvrzování vzorku nebyl pozorován, což může být zapříčiněno při přípravě vzorku. Anisotropní vzorek MRE vytvrzovaný za přítomnosti vnějšího magne-

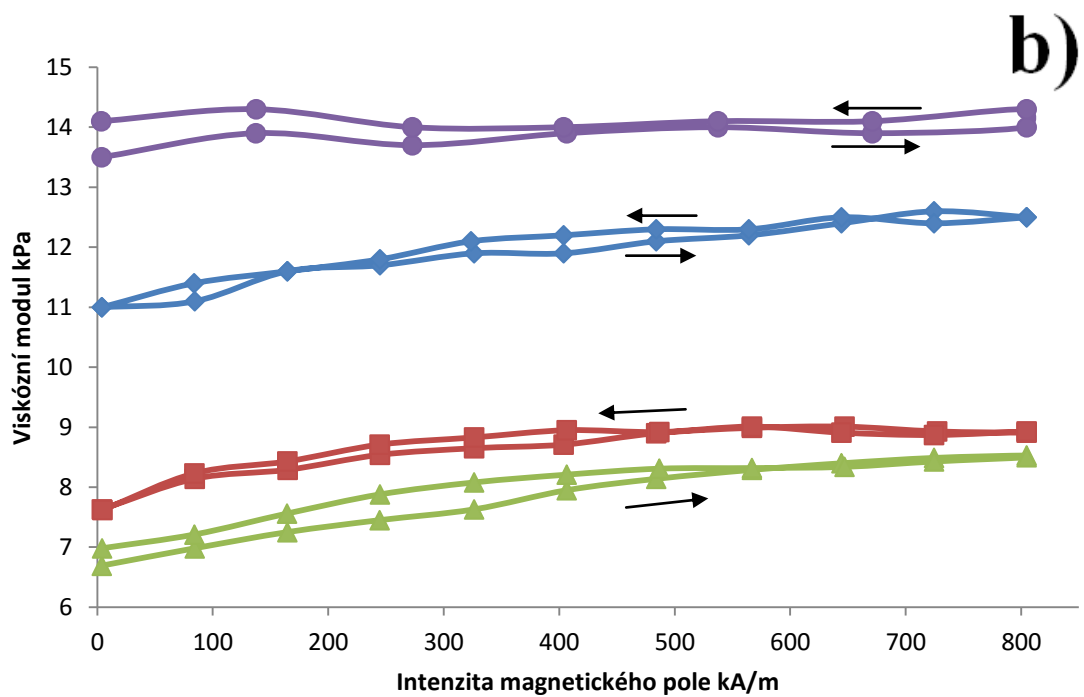
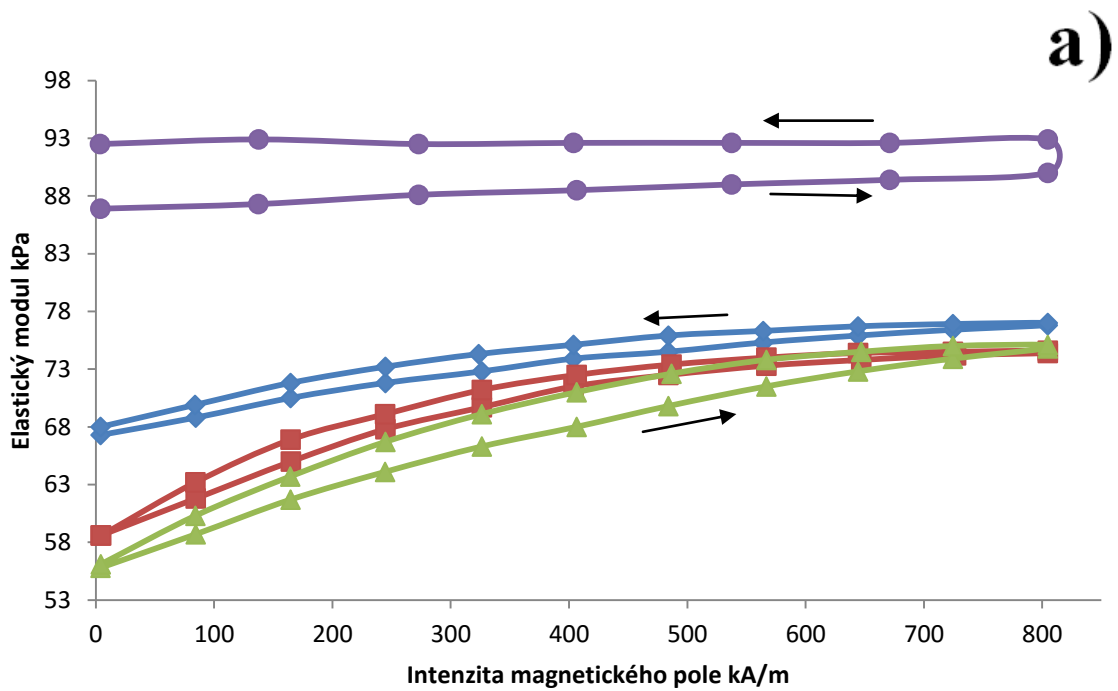
tického pole o magnetické indukci 300 mT má u CI částic 70 hm.% nejvyšší elastický modul (Obr. 31a)). Vzhledem k výše uvedeným grafům (Obr. 29a), 30a)) lze tvrdit, že se zvyšujícím se podílem CI částic v matrici a zvyšující se hodnotou magnetického pole vykazuje materiál vyšší elastický modul. Naproti tomu u isotropních MRE vzorků se zvyšujícím se plněním CI částicemi hodnota viskózního modulu klesá. Na obrázku 31b) je patrné, že je podobná anisotropnímu MRE vytvrzovanému při 150 mT. Viskózní modul vykazoval značnou zvyšující se hysterzi. Tento jev nevzniká jenom v důsledku tření mezi částicemi, ale také v důsledku možného protržení polymerních segmentů, které přispívají k velké ztrátové energii. [32,33]





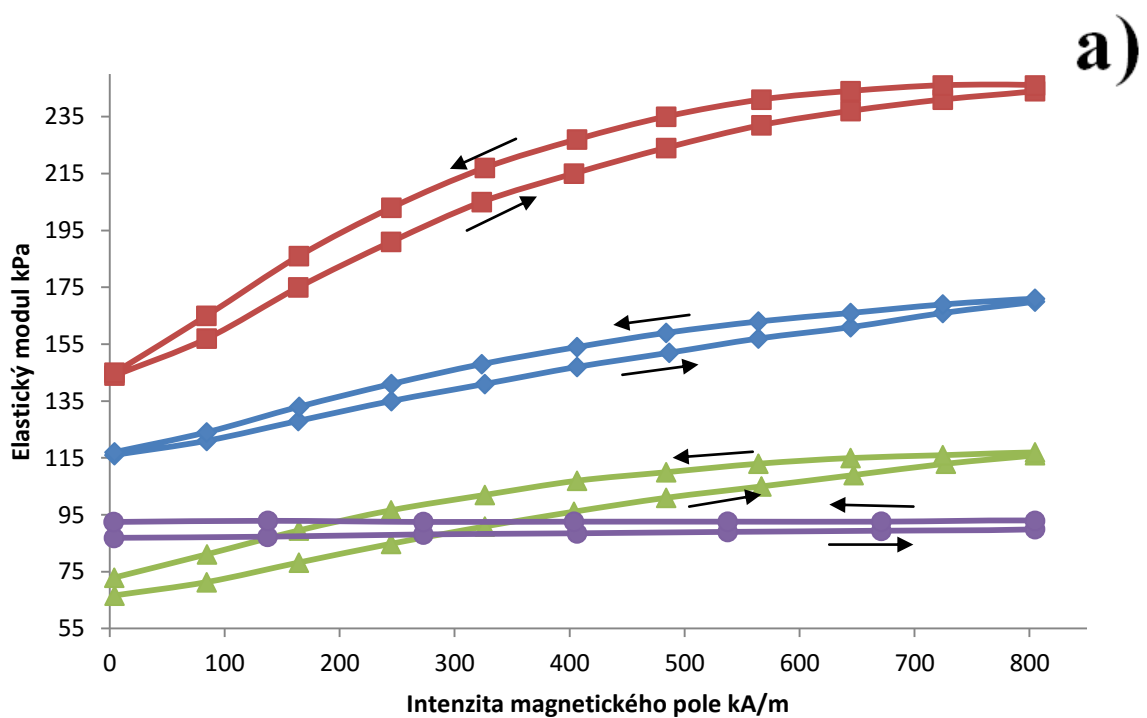
Obr. 31. CI 70 hm.% a) Elastický modul - ♦ isotropní, ■ 150 mT, ▲ 300 mT, ● matrice b) Viskózní modul - ♦ isotropní, ■ 150 mT, ▲ 300 mT, ● matrice

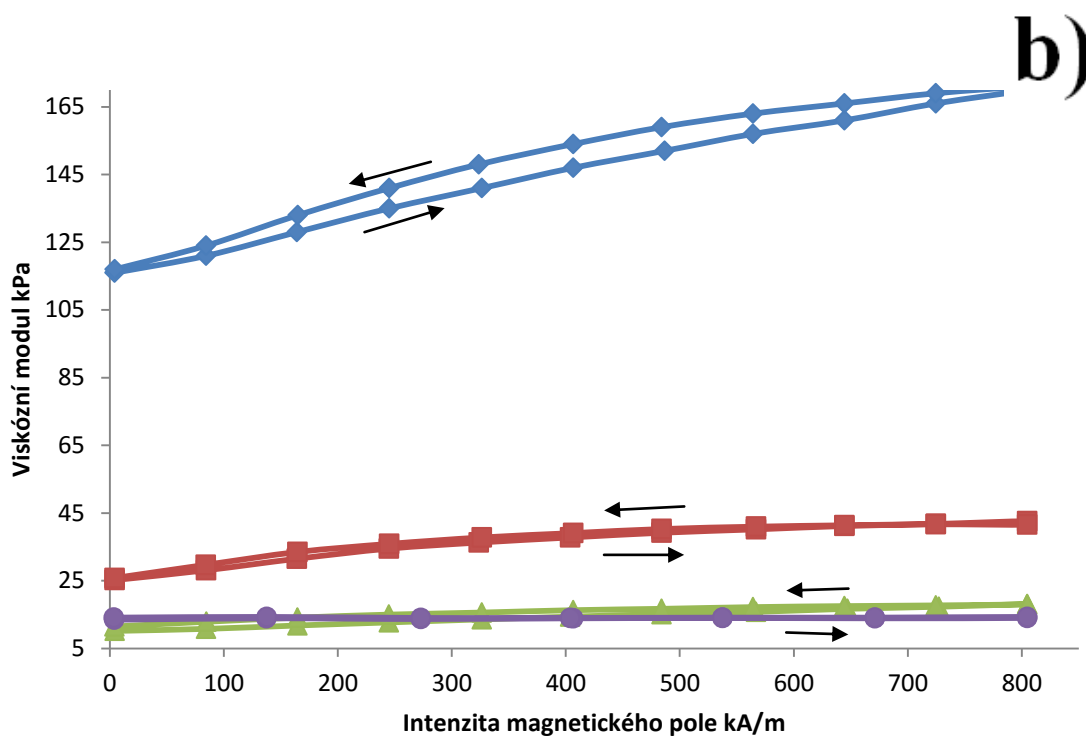
MRE elastomery obsahující 30 hm.% CI/TEOS modifikovaných částic vykazovaly nižší hodnoty elastických modulů ve srovnání se vzorky obsahujícími 30 hm.% nemodifikovaných CI částic. V literatuře není žádný důkaz, že mezi částicemi CI a maticí mohou být vytvořeny pomocí těchto systémů kovalentní vazby. V našem případě, kovalentní vazby mezi částicemi CI a maticí byly způsobeny reakcí hydroxylových skupin na povrchu kovu a silanového činidla. Na obrázku 32a) je pozorovatelné, že pro systémy obsahující CI částice modifikované polysiloxanovou povrchovou vrstvou ve formě TEOS jsou maximální hodnoty elastického modulu u všech vzorků téměř totožné a pod hodnotou matrice. Podobné chování vykazují vzorky i v případě viskózního modulu (Obr. 32b). Také nepřekračují modul matrice. Avšak lze pozorovat zlepšené vlastnosti u isotropního vzorku, který se blíží k hodnotě modulu matrice. [32,33]



Obr. 32. CI/TEOS 30 hm.% a) Elastický modul - ♦ isotropní, ■ 150 mT, ▲ 300 mT, ● matrice b) Viskózní modul - ♦ isotropní, ■ 150 mT, ▲ 300 mT, ● matrice

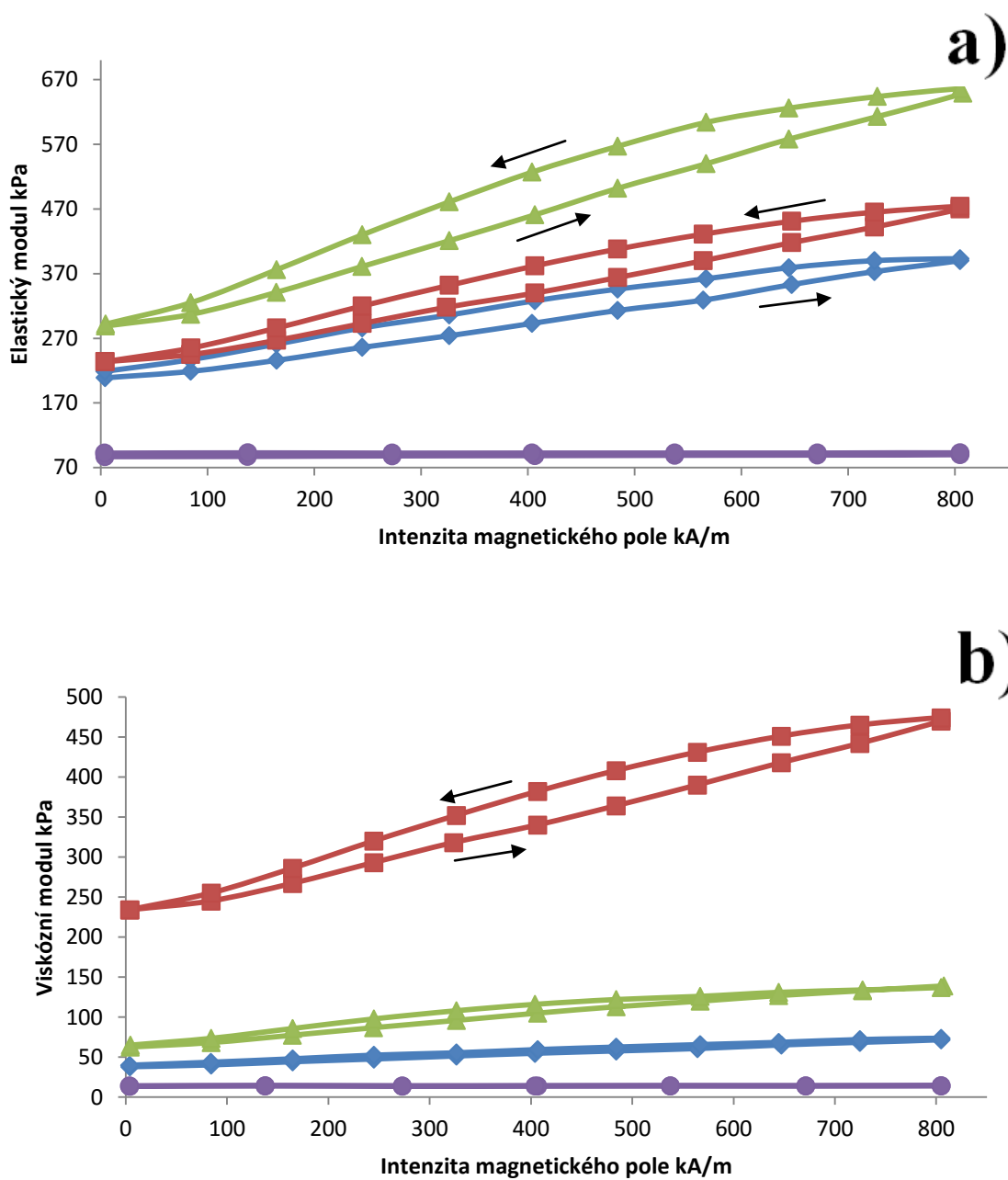
K posunu dochází až při plnění 50 hm.% CI/TEOS částic, kdy se hodnoty elastických modulů u MRE dostanou nad elastický modul matrice (Obr. 33a)). U tohoto grafu se mění trend, neboť nejlepší vlastnosti vykazuje vzorek MRE vytvrzovaný při indukci vnějšího magnetického pole 150 mT následovaný isotropním a vzorkem MRE vytvrzovaným při 300 mT. Naopak trend u viskózního modulu zůstává stejný jako v případě 30 hm.% CI/TEOS částic a u všech vzorků se dostává nad modul matrice (Obr. 33b)). V případě anisotropního 300 mT je to nárůst nepatrný, ale zbylé dva vzorky (isotropní, 150 mT) vykazují výrazné zlepšení svých modulů. [32,33]





Obr. 33. CI/TEOS 50 hm.% a) Elastický modul - ♦ isotropní, ■ 150 mT, ▲ 300 mT, ● matrice b) Viskózní modul - ♦ isotropní, ■ 150 mT, ▲ 300 mT, ● matrice

U MRE systémů obsahujících CI částice modifikované pomocí TEOS 70 hm.% (Obr. 34a)) mají opět nejvyšší elastický modul (jako v případě nemodifikovaných CI částic) anisotropní materiály vytvrzované při indukcích vnějšího magnetického pole 300 a 150 mT. Skokový nárůst velikosti modulů je patrný u všech vzorků. Viskózní modul roste u všech vzorků se zvyšujícím se poměrem TEOS modifikovaných CI částic ve směsi (obrázek 32b), 33b), 34b)). Nejvyšší skokový nárůst zaznamenal vzorek MRE vytvrzovaný při 150 mT. Z toho plyne, že zvyšující se intenzita magnetického pole aplikovaná na připravené MRE nezaručuje automaticky vyšší viskózní modul. [32,33]

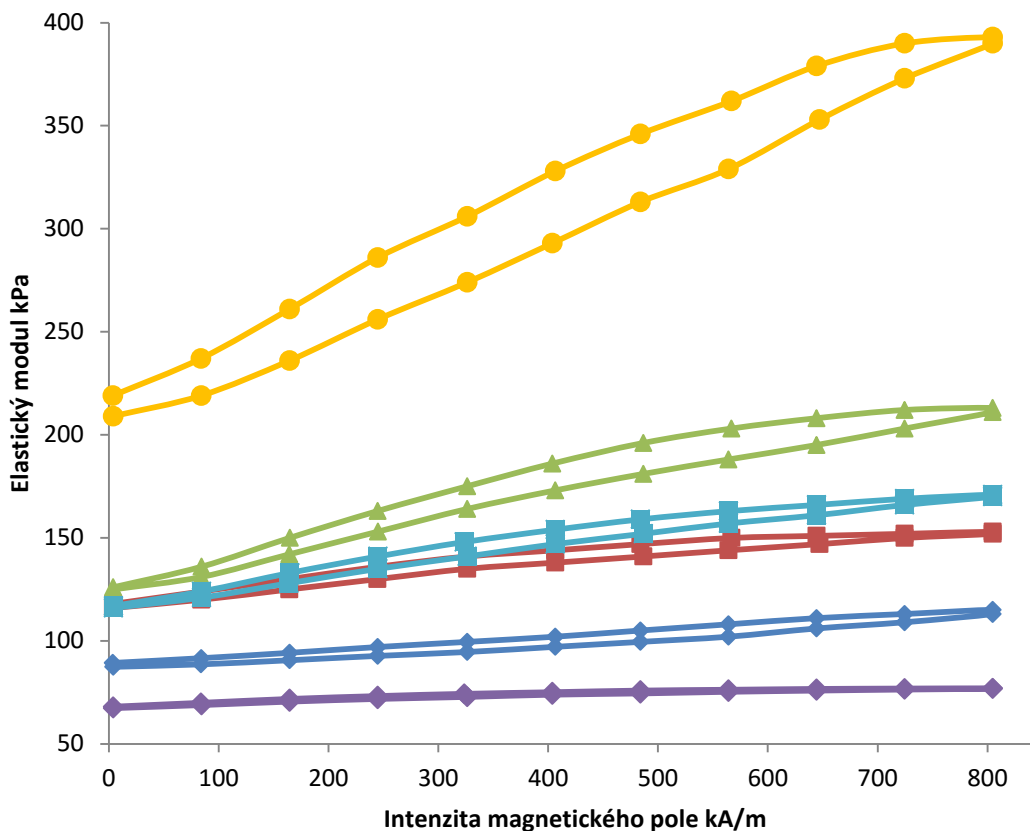


Obr. 34. CI/TEOS 70 hm.% a) Elastický modul - ♦ isotropní, ■ 150 mT, ▲ 300 mT, ● matrice b) Viskózní modul - ♦ isotropní, ■ 150 mT, ▲ 300 mT, ● matrice

U všech isotropních vzorků, ať už se jedná o částice CI nebo modifikované částice CI/TEOS lze tedy tvrdit, že zvyšující se podíl CI částic (resp. CI/TEOS částic) má za následek nárůst elastického modulu (Obr. 35). V obou případech dosahuje nejvyšších hodnot vzorek s obsahem 70 hm.% CI (resp. CI/TEOS) částic. Zatímco u 70 hm.% CI/TEOS je

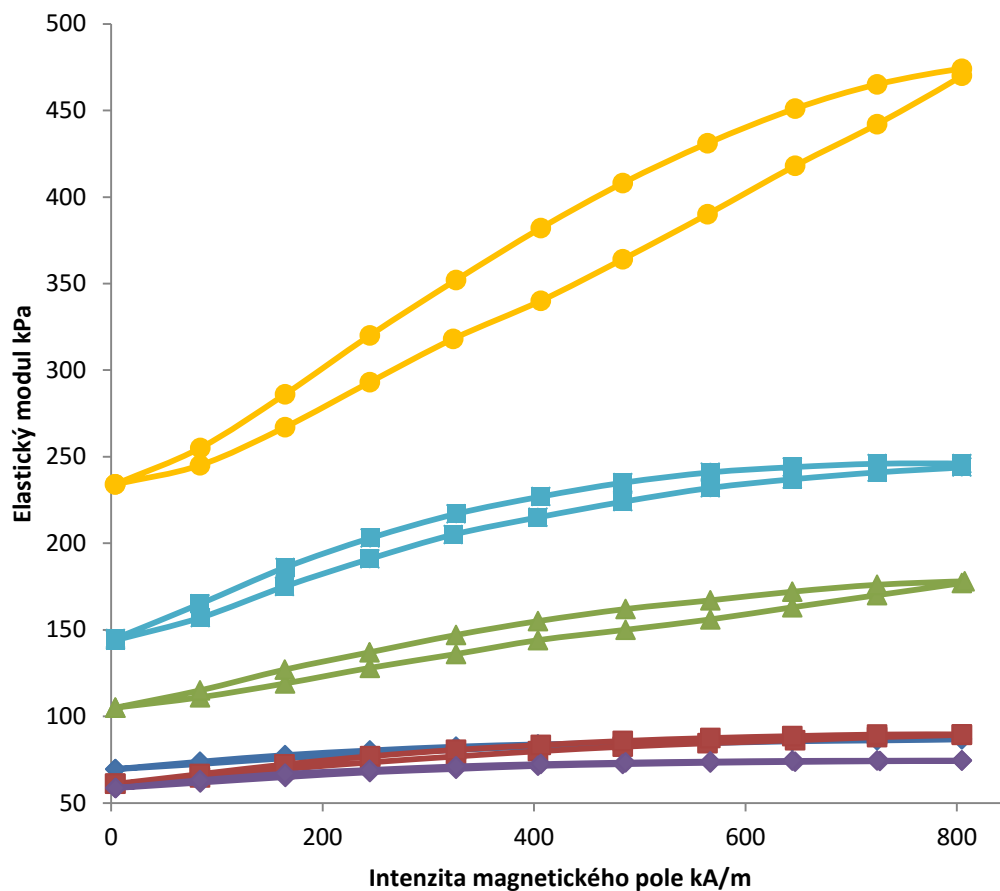


nárůst modulu v řádu stovek kPa, u 70 hm.% CI není tento rozdíl tak markantní. Ostatní vzorky se pohybují v rozmezí 70 – 170 kPa.



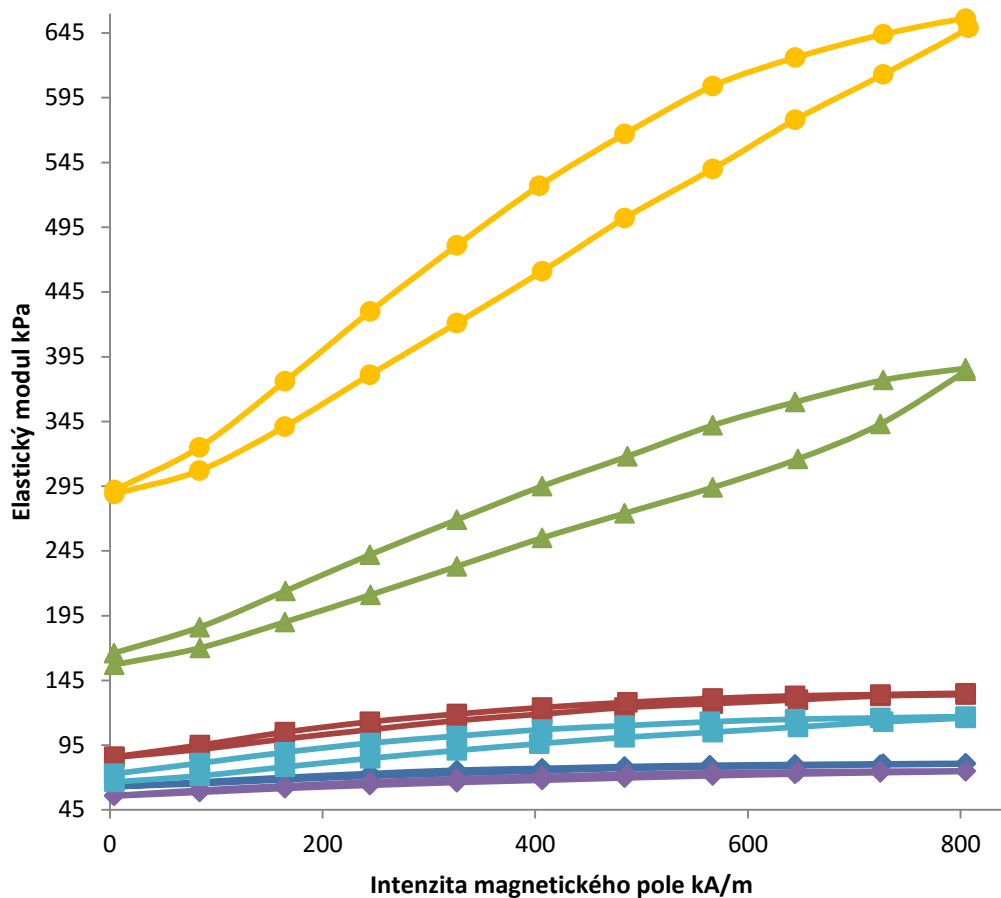
Obr. 35. CI a CI/TEOS isotropní - elastický modul - ♦ 30 hm.% CI, ■ 50 hm.% CI, ▲ 70 hm.% CI, ◆ 30 hm.% CI/TEOS, ■ 50 hm.% CI/TEOS, ● 70 hm.% CI/TEOS

U CI a CI/TEOS částic vytvrzovaných za přítomnosti vnějšího magnetického pole o indukci 150 mT dochází ke změně chování. Už neplatí, že u všech vzorků dochází k výraznému zlepšení elastického modulu jako v předešlém případě (Obr. 35). Toto tvrzení platí pouze pro CI/TEOS částice. Zlepšené vlastnosti u CI částic vykazuje až vzorek 70 hm.% CI částic 150 mT. Vzorky CI částic 30 hm.% vytvrzovaný při 150 mT a 50 hm.% CI částic vytvrzovaný při 150 mT mají téměř totožný průběh zkoušky a tím pádem i stejnou hodnotu elastického modulu. V tomto rozmezí se pohybuje i MRE vzorek obsahující 30 hm.% CI/TEOS částic vytvrzovaný při 150 mT.



Obr. 36. CI a CI/TEOS 150 mT - elastický modul - ♦ 30 hm.% CI, ■ 50 hm.% CI, ▲ 70 hm.% CI, ◆ 30 hm.% CI/TEOS, ■ 50 hm.% CI/TEOS, ● 70 hm.% CI/TEOS

Vzorky MRE obsahující CI částice o koncentraci 30 hm.% a 50 hm.%, oba vytvrzované za přítomnosti magnetického pole o indukci 300mT, vykazují nepatrně lepší vlastnosti než částice CI/TEOS o stejné koncentraci, jak je patrné z obrázku 36. Jde o první případ v diplomové práci, kdy se tomu tak stalo. U předešlých měření MRE vzorků obsahujících CI částice (150 mT při vytvrzování) a isotropního distribuce CI částic (Obr. 34 a 35) tomu tak nebylo. Beze změny zůstává až koncentrace částic CI/TEOS 70 hm.% při intenzitě vytvrzování 300 mT, která má opět téměř dvojnásobný modul oproti CI částicím 70 hm.% (300 mT při vytvrzování) a vykazuje nejlepší vlastnosti napříč měřenými koncentracemi a velikostí magnetického pole.



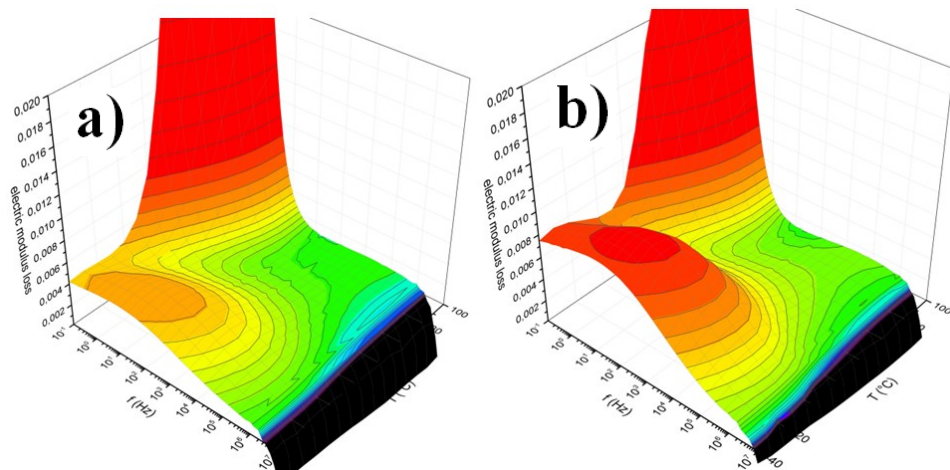
Obr. 37. CI a CI/TEOS 300 mT - elastický modul - ♦ 30 hm.% CI, ■ 50 hm.% CI, ▲ 70 hm.% CI, ◆ 30 hm.% CI/TEOS, ■ 50 hm.% CI/TEOS, ● 70 hm.% CI/TEOS

## 10.2 Dielektrická spektroskopie

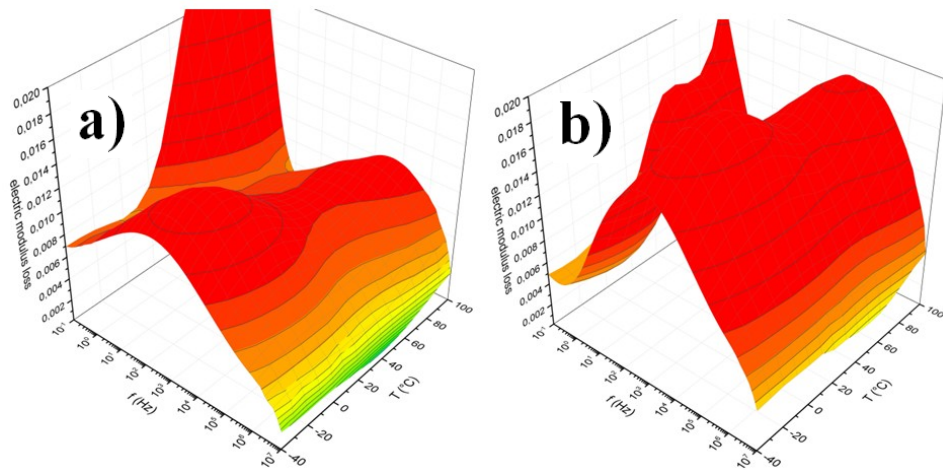
Pro identifikaci jednotlivých relaxačních mechanismů byla vynesena závislost sledované dielektrické veličiny. V tomto případě se jedná o elektrický ztrátový modul, který bude sledován v závislosti s nezávislými proměnnými teplotou a frekvencí. V těchto 3D grafech se jednotlivé relaxace (což je polarizace shluků částic) projevují jako zvlnění plochy. Částice nestíhají kmitat mezi kladným a záporným nábojem. U všech vzorků dochází k mezifázové polarizaci, která je tak větší než polarizace matrice. Jak je patrné z obrázků 38a), 39a) a 40a) nejnižší relaxaci vykazuje isotrovní materiál. Mezi vzorky MRE obsahujícími 30 hm.% CI částic a které byly v průběhu vytvrzování vystaveny vnějšímu magnetickému poli o indukci 150 mT a 300 mT je možné pozorovat nárůst peaku mezifázové polarizace s rostoucí anisotropií vzorků danou vnějším magnetickým polem v průběhu vytvrzování MRE vzorků.. Při zhodnocení vlivu koncentrace dispergovaných CI částic

v MRE je možné pozorovat, že u vzorků obsahujících 50 hm.% CI částic je zachován trend nárůstu peaku mezifázové polarizace s narůstající anisotropií MRE vzorků jako u koncentrace 30 hm.% CI částic, avšak obecně je u těchto systémů silnější mezifázová polarizace a to z důvodu většího množství plniva zastoupeného v systému.

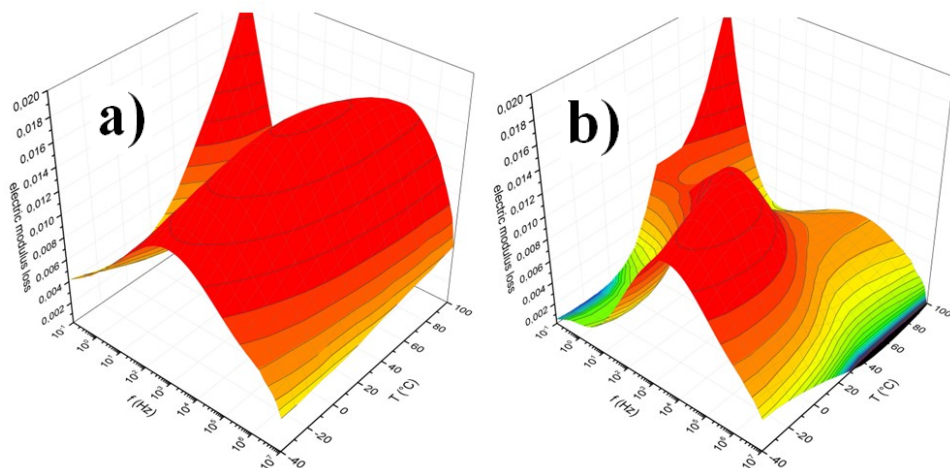
U MRE vzorků obsahujících 70 hm.% CI částic je nicméně mezifázová polarizace nejnižší ze všech měřených koncentrací. Dochází zde k porušení trendu, že se vzrůstající koncentrací CI částic ve vzorku roste relaxace. Jinými slovy při poměrně vysoké koncentraci CI částic (70 hm.%) již nedochází k výrazné změně relaxace u žádného z měřených vzorků (Obr. 41) a to nehledě orientaci částic v systému. Isotropní MRE vykazuje téměř stejnou relaxaci jako MRE obsahující 70 hm.% CI částic vytvrzované při indukci vnějšího magnetického pole 150 mT a 300 mT. Tento výsledek je dán skutečností, že příliš vysoká viskozita zapříčiněná právě vysokou koncentrací CI částic a tím větší smáčenou plochou v průběhu samotného vytvrzování MRE vzorků zabraňovala orientaci plniva ve směru působení vnějšího magnetického pole, tj. nedocházelo ke vzniku významné anisotropie. Z daného lze konstatovat, že dielektrická spektroskopie je mimo jiné vhodná také pro ne-destruktivní studium orientace plniva uvnitř MRE.



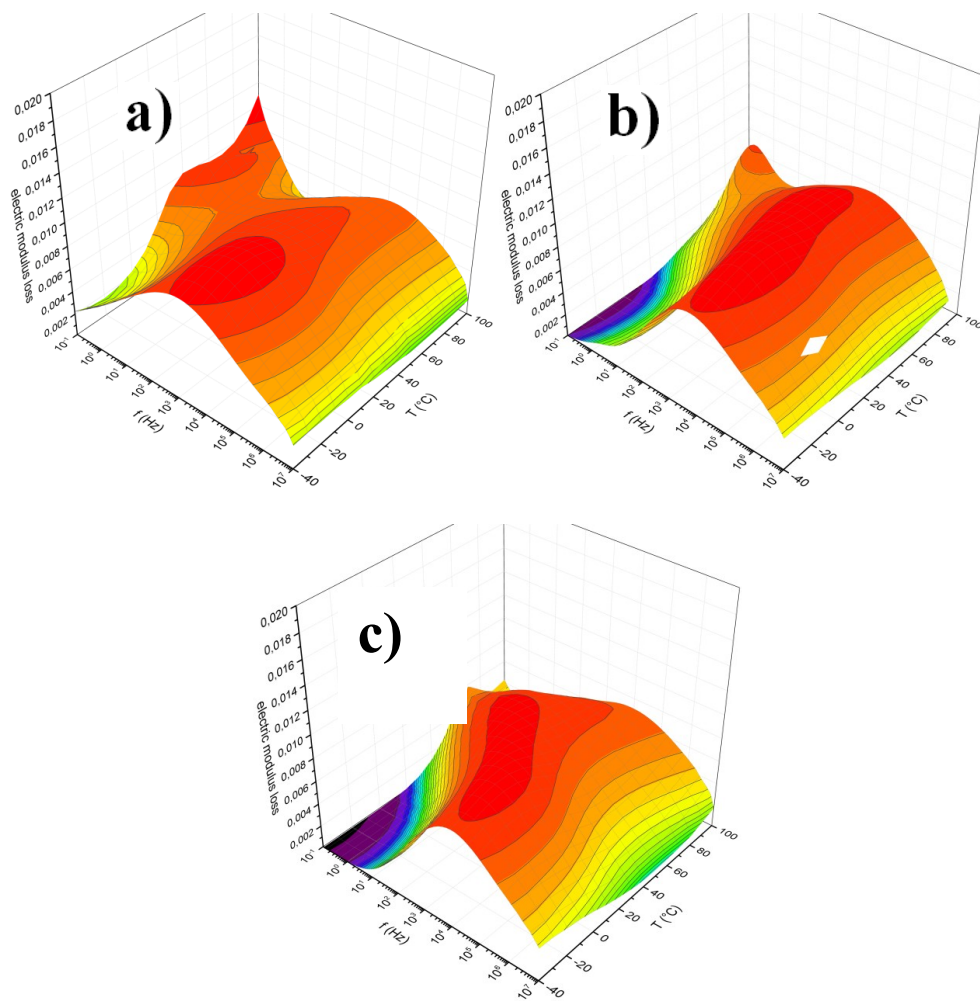
Obr. 38 a) CI 30 hm.% isotropní, b) CI 50 hm.% isotropní



Obr. 39 a) CI 30 hm.% 150 mT, b) CI 50 hm.% 150 mT



Obr. 40 a) CI 30 hm.% 300 mT, b) CI 50 hm.% 300 mT



Obr. 41. a) CI 70 hm.% isotropní, b) CI 70 hm.% 150 mT, c) CI 70 hm.% 300 mT

## ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo připravit různé vzorky MRE lišících se koncentrací a orientací částic uvnitř systému, případně také modifikací daných částic polymerním potahem a provést analýzu distribuce částic v připravených MRE systémech s ohledem na parametry v průběhu jejich přípravy včetně vyhodnocení a diskuze získaných výsledků opět ve vztahu ke vstupním parametrům při přípravě MRE systémů a to pomocí rotačního viskozimetru v přítomnosti vnějšího magnetického pole a dielektrické spektroskopie v širokém teplotním rozsahu. V praktické části byly za tímto účelem připraveny isotropní a anisotropní MRE kompozity s různou strukturou a různými parametry. Jako plnivo byly použity částice CI a stejné částice modifikované na povrchu tetraethoxysilanem (CI/TEOS). Jako matrice totožná pro všechny typy MRE byl využit silikonový kaučuk Sylgard 184. SEM analýzou byla vyhodnocena velikost a tvar částic. Pomocí vibrační magnetometrie byly analyzovány magnetizační křivky plniv, kdy se ukázalo, že hodnota  $M$  se snížila v důsledku přítomnosti TEOS povlaku na částicích CI. Toto snížení lze ovšem považovat za zanedbatelné, z čehož plyne, že podmínky a molární poměry reakčních složek byly zvoleny optimálně. Z reologických měření prováděných také za přítomnosti vnějšího magnetického pole aplikovaného na zkoumané vzorky MRE bylo při porovnávání isotropních vzorků obsahujících čisté CI částice a modifikované částice CI/TEOS prokázáno, že se zvyšující se podíl částic magnetického plniva má za následek nárůst elastického modulu. U anisotropních MRE, u kterých bylo při vytvrzování aplikováno vnější magnetické pole o magnetické indukci 150 mT, nedocházelo k výraznému nárůstu elastického modulu a to nehledě na typ magnetických částic použitých jako plnivo. Zlepšené vlastnosti vykazuje až vzorek MRE s vysokou koncentrací CI částic (70 hm.%) vytvrzovaný při 150 mT. Při porovnání vlivu potažení u anisotropních vzorků vytvrzovaných za přítomnosti magnetického pole o indukci 300mT vykazují MRE vzorky obsahující CI částice o koncentraci 30 hm.% a 50 hm.% nepatrně lepší vlastnosti než systémy založené na částicích CI/TEOS o stejné koncentraci.

Dielektrická spektroskopie se prokázala jako efektivní metoda pro analýzu struktury MRE a to za využití analýzy intenzity mezifázové polarizace v širokém teplotním rozsahu. Pro vzorky obsahující nižší koncentrace CI částic (30 hm.% a 50 hm.%) byl pozorován nárůst peaku mezifázové polarizace s rostoucí anisotropií vzorku. Tento nárůst byl výraznější u vzorků MRE s vyšší koncentrací CI částic, tj. 50 hm.%, u nichž měla vyšší koncentrace magnetického plniva vliv na silnější mezifázovou polarizaci. Odlišný charakter byl poz-

rován u nejvyšší koncentrace magnetického plniva v MRE systémech (70 hm.% CI částic), kdy právě velký smáčený povrch částic daný jejich vysokou koncentrací vedl k příliš vysoké viskozitě systémů v průběhu jejich vytvrzování, která zabraňovala dostatečné orientaci plniva za přítomnosti vnějšího magnetického pole aplikovaného v průběhu procesu vytvrzování a tím nedocházelo ke vzniku výrazné anisotropie uvnitř MRE vzorků.



## SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] 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.
- [2] DE VICENTE, Juan, Daniel J. KLINGENBERG a Roque HIDALGO ALVAREZ. Magnetorheological fluids: a review. *Soft Matter* [online]. 2011, **7**(8), 3701- [cit. 2017-04-07]. DOI: 10.1039/c0sm01221a. ISSN 1744-683x. Dostupné z: <http://xlink.rsc.org/?DOI=c0sm01221a>
- [3] 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* [online]. 2015, **22**, 53-62 [cit. 2017-04-07]. DOI: 10.1016/j.jiec.2014.06.024. ISSN 1226086x. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1226086X14003220>
- [4] DENG, Hua-xia a Xing-long GONG. Application of magnetorheological elastomer to vibration absorber. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation* [online]. 2008, **13**(9), 1938-1947 [cit. 2017-04-07]. DOI: 10.1016/j.cnsns.2007.03.024. ISSN 10075704. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1007570407000524>
- [5] 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* [online]. 2015, **374**, 283-288 [cit. 2017-04-07]. DOI: 10.1016/j.jmmm.2014.08.012. ISSN 03048853. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0304885314007008>
- [6] CHEN, L, X L GONG a W H LI. Microstructures and viscoelastic properties of anisotropic magnetorheological elastomers. *Smart Materials and Structures* [online]. 2007, **16**(6), 2645-2650 [cit. 2017-04-07]. DOI: 10.1088/0964-1726/16/6/069. ISSN 0964-1726. Dostupné z: <http://stacks.iop.org/0964-1726/16/i=6/a=069?key=crossref.03ca69b03d44aa14af6557fd323a77b1>

- [7] Chování látek v magnetickém poli. *Matematicko-fyzikální fakulta UK* [online]. [cit. 2015-02-25].
- [8] Glosář Aldebaran. *Aldebaran* [online]. [cit. 2015-03-11]. Dostupné z: <http://www.aldebaran.cz/glossary/print.php?id=741>
- [9] MALÝ, Marek. Magnetické vlastnosti látky. *Univerzita J. E. Purkyně* [online]. [cit. 2015-02-25].
- [10] CARLSON, J.David a Mark R JOLLY. MR fluid, foam and elastomer devices. *Mechatronics* [online]. 2000, **10**(4-5), 555-569 [cit. 2017-04-07]. DOI: 10.1016/S0957-4158(99)00064-1. ISSN 09574158. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0957415899000641>
- [11] HOLUBOVÁ, Renata. *Základy reologie a reometrie kapalin*. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 2014. ISBN 978-80-244-4178-8.
- [12] MENTLÍK, Václav. *Dielektrické prvky a systémy*. Praha: BEN - technická literatura, 2006. ISBN 80-7300-189-6.
- [13] 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, **93**(10), 1826-1831 [cit. 2017-04-07]. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2008.07.008. ISSN 01413910. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0141391008002140>
- [14] ABSHINOVA, Madina A., Alexander V. LOPATIN, Natalia E. KAZANTSEVA, Jarmila VILČÁKOVÁ a Petr SÁHA. Correlation between the microstructure and the electromagnetic properties of carbonyl iron filled polymer composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* [online]. 2007, **38**(12), 2471-2485 [cit. 2017-04-07]. DOI: 10.1016/j.compositesa.2007.08.002. ISSN 1359835x. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359835X07001418>

- [15] KIM, Min Su, Ying Dan LIU, Bong Jun PARK, Chun-Yeol YOU a Hyoung Jin CHOI. Carbonyl iron particles dispersed in a polymer solution and their rheological characteristics under applied magnetic field. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry* [online]. 2012, **18**(2), 664-667 [cit. 2017-04-07]. DOI: 10.1016/j.jiec.2011.11.062. ISSN 1226086x. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1226086X11002474>
- [16] BASF. Carbonyl iron powder – made by its inventor. Basf.com [online]. ©2012 [cit. 2012-03-24].
- [17] LIM, Sung Taek, Min Seong CHO, In Bae JANG a Hyoung Jin CHOI. Magnetorheological characterization of carbonyl iron based suspension stabilized by fumed silica. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* [online]. 2004, **282**, 170-173 [cit. 2017-04-07]. DOI: 10.1016/j.jmmm.2004.04.040. ISSN 03048853. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0304885304004391>
- [18] JIANG, Wanquan, Yanli ZHANG, Shouhu XUAN, Chaoyang GUO a Xinglong GONG. Dimorphic magnetorheological fluid with improved rheological properties. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* [online]. 2011, **323**(24), 3246-3250 [cit. 2017-04-07]. DOI: 10.1016/j.jmmm.2011.07.024. ISSN 03048853. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0304885311004884>
- [19] BEDNAREK, Stanisław. The giant linear magnetostriction in elastic ferromagnetic composites within a porous matrix. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* [online]. 2006, **301**(1), 200-207 [cit. 2017-04-11]. DOI: 10.1016/j.jmmm.2005.05.041. ISSN 03048853. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0304885305006633>
- [20] HU, WEI a NORMAN M. WERELEY. BEHAVIOR OF MR FLUIDS AT HIGH SHEAR RATE. *International Journal of Modern Physics B* [online]. 2011, **25**(07), 979-985 [cit. 2017-04-07]. DOI: 10.1142/S0217979211058535. ISSN 0217-9792. Dostupné z: <http://www.worldscientific.com/doi/abs/10.1142/S0217979211058535>

- [21] ABRAMCHUK, S. S., D. A. GRISHIN, E. Yu. KRAMARENKO, G. V. STEPANOV a A. R. KHOKHLOV. Effect of a homogeneous magnetic field on the mechanical behavior of soft magnetic elastomers under compression. *Polymer Science Series A* [online]. 2006, **48**(2), 138-145 [cit. 2017-04-11]. DOI: 10.1134/S0965545X06020064. ISSN 0965-545x. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1134/S0965545X06020064>
- [22] LAUN, H. M., C. GABRIEL a C. KIEBURG. Magnetorheological Fluid in Oscillatory Shear and Parameterization with Regard to MR Device Properties. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* [online]. 2010, **21**(15), 1479-1489 [cit. 2017-04-11]. DOI: 10.1177/1045389X09351759. ISSN 1045-389x. Dostupné z: <http://jim.sagepub.com/cgi/doi/10.1177/1045389X09351759>
- [23] PARK, Bong Jun, Kang Hyun SONG a Hyoung Jin CHOI. Magnetic carbonyl iron nanoparticle based magnetorheological suspension and its characteristics. *Materials Letters* [online]. 2009, **63**(15), 1350-1352 [cit. 2017-04-11]. DOI: 10.1016/j.matlet.2009.03.013. ISSN 0167577x. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0167577X09002201>
- [24] ALLAHYAROV, Elshad, Andreas M MENZEL, Lei ZHU a Hartmut LÖWEN. Magnetomechanical response of bilayered magnetic elastomers. *Smart Materials and Structures* [online]. 2014, **23**(11), 115004- [cit. 2017-04-11]. DOI: 10.1088/0964-1726/23/11/115004. ISSN 0964-1726. Dostupné z: <http://stacks.iop.org/0964-1726/23/i=11/a=115004?key=crossref.29dd19b2bcdef381822c7b30c0af1bb8>
- [25] SEONG, Min-Sang, Seung-Bok CHOI a Young-Min HAN. Damping force control of a vehicle MR damper using a Preisach hysteretic compensator. *Smart Materials and Structures* [online]. 2009, **18**(7), 074008- [cit. 2017-04-11]. DOI: 10.1088/0964-1726/18/7/074008. ISSN 0964-1726. Dostupné z: <http://stacks.iop.org/0964-1726/18/i=7/a=074008?key=crossref.39bdf87c51f878ec23d1481bc6df6ce>
- [26] SEDLACIK, Michal, Vladimir PAVLINEK, Petra PEER a Petr FILIP. Tailoring the magnetic properties and magnetorheological behavior of spinel nanocrystalline cobalt ferrite by varying annealing temperature. *Dalton Transactions* [online]. 2014, **43**(18), 6919- [cit. 2017-04-11]. DOI: 10.1039/c4dt00166d. ISSN 1477-9226. Dostupné z: <http://xlink.rsc.org/?DOI=c4dt00166d>

- [27] YU, Miao, X.M. DONG, S.B. CHOI a C.R. LIAO. Human simulated intelligent control of vehicle suspension system with MR dampers. *Journal of Sound and Vibration* [online]. 2009, **319**(3-5), 753-767 [cit. 2017-04-11]. DOI: 10.1016/j.jsv.2008.06.047. ISSN 0022460x. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0022460X08006056>
- [28] KARAKOC, Kerem, Edward J. PARK a Afzal SULEMAN. Design considerations for an automotive magnetorheological brake. *Mechatronics* [online]. 2008, **18**(8), 434-447 [cit. 2017-04-11]. DOI: 10.1016/j.mechatronics.2008.02.003. ISSN 09574158. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0957415808000366>
- [29] DIGUET, G., E. BEAUGNON a J.Y. CAVAILLÉ. From dipolar interactions of a random distribution of ferromagnetic particles to magnetostriction. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* [online]. 2009, **321**(5), 396-401 [cit. 2017-04-11]. DOI: 10.1016/j.jmmm.2008.08.112. ISSN 03048853. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0304885308009232>
- [30] A. SILVA, A., E. SILVA, A. CARRICO a E. T. EGITO. Magnetic Carriers: A Promising Device for Targeting Drugs Into the Human Body. *Current Pharmaceutical Design* [online]. 2007, **13**(11), 1179-1185 [cit. 2017-04-11]. DOI: 10.2174/138161207780618993. ISSN 13816128. Dostupné z: <http://www.eurekaselect.com/openurl/content.php?genre=article&issn=1381-6128&volume=13&issue=11&spage=1179>
- [31] VARGA, Zsolt, Genovéva FILIPCSEI a Miklós ZRÍNYI. Magnetic field sensitive functional elastomers with tuneable elastic modulus. *Polymer* [online]. 2006, **47**(1), 227-233 [cit. 2017-04-11]. DOI: 10.1016/j.polymer.2005.10.139. ISSN 00323861. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0032386105016125>
- [32] CVEK, Martin, Miroslav MRLIK, Marketa ILCIKOVA, Tomas PLACHY, Michal SEDLACIK, Jaroslav MOSNACEK a Vladimir PAVLINEK. A facile controllable coating of carbonyl iron particles with poly(glycidyl methacrylate): a tool for adjusting MR response and stability properties. *J. Mater. Chem. C* [online]. 2015, **3**(18), 4646-4656 [cit. 2017-04-11]. DOI: 10.1039/C5TC00319A. ISSN 2050-7526. Dostupné z: <http://xlink.rsc.org/?DOI=C5TC00319A>

- [33] CVEK, Martin, Miroslav MRLÍK, Markéta ILČÍKOVÁ, Jaroslav MOSNÁČEK, Vladimír BABAYAN, Zdenka KUČEKOVÁ, Petr HUMPOLÍČEK a Vladimír PAVLÍNEK. The chemical stability and cytotoxicity of carbonyl iron particles grafted with poly(glycidyl methacrylate) and the magnetorheological activity of their suspensions. *RSC Adv* [online]. 2015, **5**(89), 72816-72824 [cit. 2017-04-11]. DOI: 10.1039/C5RA11968E. ISSN 2046-2069. Dostupné z: <http://xlink.rsc.org/?DOI=C5RA11968E>
- [34] GONÇALVES, Gil, Paula A. A. P. MARQUES, Ana BARROS-TIMMONS, Igor BDKIN, Manoj K. SINGH, Nazanin EMAMI a José GRÁCIO. Graphene oxide modified with PMMA via ATRP as a reinforcement filler. *Journal of Materials Chemistry* [online]. 2010, **20**(44), 9927- [cit. 2017-04-11]. DOI: 10.1039/c0jm01674h. ISSN 0959-9428. Dostupné z: <http://xlink.rsc.org/?DOI=c0jm01674h>
- [35] SOROKIN, Vladislav V., Gennady V. STEPANOV, Mikhail SHAMONIN, Gareth J. MONKMAN, Alexei R. KHOKHLOV a Elena Yu. KRAMARENKO. Hysteresis of the viscoelastic properties and the normal force in magnetically and mechanically soft magnetoactive elastomers: Effects of filler composition, strain amplitude and magnetic field. *Polymer* [online]. 2015, **76**, 191-202 [cit. 2017-04-11]. DOI: 10.1016/j.polymer.2015.08.040. ISSN 00323861. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0032386115301798>
- [36] KHIMI, S. Raa a K.L. PICKERING. Comparison of dynamic properties of magnetorheological elastomers with existing antivibration rubbers. *Composites Part B: Engineering* [online]. 2015, **83**, 175-183 [cit. 2017-04-11]. DOI: 10.1016/j.compositesb.2015.08.033. ISSN 13598368. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359836815004631>
- [37] HAASZ, Vladimír a Miloš SEDLÁČEK. *Elektrická měření: přístroje a metody*. Vyd. 2. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2003. ISBN 8001027317.
- [38] *Elektronová mikroskopie - úvod*. [Online]. [Cit. 3. 5. 2015]. Dostupné z: <http://www.paru.cas.cz/lem/bak/>
- [39] *Vidět znamená vědět - elektronová mikroskopie*. [Online]. [Cit. 3. 5. 2015]. Dostupné z: <http://www.chempoint.cz/videt-znamenava-vedet>
- [40] Glosář Aldebaran. *Aldebaran* [online]. [cit. 2015-03-11]. Dostupné z: <http://www.aldebaran.cz/glossary/print.php?id=741>

- [41] 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)
- [42] ZUBAREV, Andrey. Magnetodeformation of ferrogels and ferroelastomers. Effect of microstructure of the particles' spatial disposition. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* [online]. 2013, **392**(20), 4824-4836 [cit. 2017-04-11]. DOI: 10.1016/j.physa.2013.06.054. ISSN 03784371. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378437113005724>
- [43] GÜNTHER, D, D Yu BORIN, S GÜNTHER a S ODENBACH. X-ray microtomographic characterization of field-structured magnetorheological elastomers. *Smart Materials and Structures* [online]. 2012, **21**(1), 015005- [cit. 2017-04-11]. DOI: 10.1088/0964-1726/21/1/015005. ISSN 0964-1726. Dostupné z: <http://stacks.iop.org/0964-1726/21/i=1/a=015005?key=crossref.d404e2773608d700aedb8311043a76cd>
- [44] SOROKIN, Vladislav V., Eva ECKER, Gennady V. STEPANOV, Mikhail SHAMONIN, Gareth J. MONKMAN, Elena Yu. KRAMARENKO a Alexei R. KHOKHLOV. Experimental study of the magnetic field enhanced Payne effect in magnetorheological elastomers. *Soft Matter* [online]. 2014, **10**(43), 8765-8776 [cit. 2017-04-11]. DOI: 10.1039/C4SM01738B. ISSN 1744-683x. Dostupné z: <http://xlink.rsc.org/?DOI=C4SM01738B>
- [45] STEPANOV, G. V., D. A. SEMERENKO, A. V. BAKHTIAROV a P. A. STOROZHENKO. Magneto-resistive Effect in Magnetoactive Elastomers. *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism* [online]. 2013, **26**(4), 1055-1059 [cit. 2017-04-11]. DOI: 10.1007/s10948-012-1853-1. ISSN 1557-1939. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s10948-012-1853-1>
- [46] AN, Haining, Stephen J. PICKEN a Eduardo MENDES. Nonlinear rheological study of magneto responsive soft gels. *Polymer* [online]. 2012, **53**(19), 4164-4170 [cit. 2017-04-11]. DOI: 10.1016/j.polymer.2012.07.023. ISSN 00323861. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0032386112005903>
- [47] MENTLÍK, Václav. *Dielektrické prvky a systémy*. Praha: BEN - technická literatura, 2006. ISBN 80-7300-189-6.

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

MRE	magnetoreologický elastomer
PP	polypropylen
PS	polystyren
PE	polyetylen
PB	polykarbonát
MR	magnetoreologie
PUR	polyuretan
CIP	částice karbonylového železa
Fe	železo
Ni	nikl
Co	kobalt
VSM	vibrating-sample magnetometer
DS	dielektrická spektroskopie
TEOS	tetraethoxysilan
THF	tetrahydrofuran
HCl	kyselina chlorovodíková
SEM	snímací elektronový mikroskop
FTIR	Fourierova transformace infračervené spektroskopie
ATR	režim zeslabené úplné reflektance absorpce
<i>A</i>	absorbce
Si	křemík
OH	hydroxylová skupina
C	uhlík
<i>M</i>	magnetizace



---

Pa	pascal
$\mu\text{m}$	mikrometr
$^{\circ}\text{C}$	stupeň Celsia
$\omega$	úhlová frekvence
$G'$	reálná složka smykového modulu
$G''$	imaginární složka smykového modulu
Hz	hertz
$^{\circ}$	stupeň
%	procento
g	gram
ml	mililitr
min	minuta
mbar	milibar
kV	kilovolt
$\text{cm}^{-1}$	reciproký centimetr
kOe	kilooersted
A	ampér
mm	milimetr
mT	militesla
N	newton
kPa	kilopascal
kA/m	kiloampér na metr
$F_n, Ft$	elementární síla
S	plocha
$\tau$	tečné napětí

---

$y$	výška hranolu
$v$	rychlost stěny
$\eta$	dynamická viskozita
$\dot{\gamma}$	rychlost smykové deformace
$x$	vzdálenost rovin
$D$	gradient rychlosti
$\eta_a$	zdánlivá viskozita
$r$	poloměr válce
$F$	síla
$M_k$	kroučící moment
$a$	úhel
$R$	poloměr nádoby
$p$	normálové napětí
$f$	frekvence
$T$	teplota

## SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1. Druhy termoplastů.....</i>	13
<i>Obr. 2. Výrobky z termosetů .....</i>	14
<i>Obr. 3. Normálové napětí .....</i>	17
<i>Obr. 4. Napěťový tenzor.....</i>	18
<i>Obr. 5. Rychlostní profil toku v látce mezi nepohyblivou a pohybující se deskou.....</i>	18
<i>Obr. 6. Tokové a viskozitní charakteristiky některých neneutonských látek - 1- Newtonská látka, 2- strukturně viskózní látka, 3- dilatantní látka, 4- plastická látka (pseudoplastická s mezí toku), 5- Binghamská látka.....</i>	19
<i>Obr. 7. Viskozimetr válec-válec .....</i>	20
<i>Obr. 8. Viskozimetr kužel-deska .....</i>	21
<i>Obr. 9. Geometrie deska - deska.....</i>	22
<i>Obr. 10. Elastická složka smykového modulu v závislosti na teplotě pro izotropní a anizotropní vzorek v magnetickém poli .....</i>	24
<i>Obr. 11. Snímek částic železa pod elektronovým mikroskopem .....</i>	25
<i>Obr. 12 Aktivace MR kapaliny: (a) bez mag. pole (b) s mag. polem (c) plně zorientované částice .....</i>	25
<i>Obr. 13. Levá strana – snímek náhodně dispergovaných částic, pravá strana – částice zřetelné zorientovány působením magnetického pole .....</i>	26
<i>Obr. 14. Základní typy uspořádání magnetických momentů .....</i>	28
<i>Obr. 15. Hysterezní smyčka .....</i>	29
<i>Obr. 16. Chaoticky rozmístěné dipóly .....</i>	31
<i>Obr. 17. Schéma vzniku indukovaného dipólového momentu po vložení dielektrika do vnějšího elektrického pole. ....</i>	32
<i>Obr. 18. VSM magnetometr .....</i>	34
<i>Obr. 19. Odezva napětí při oscilování: V- Newtonská kapalina, E – Hookovo těleso, VE – viskoelastický materiál .....</i>	35
<i>Obr. 20. Obecná transformace ztrátové složky permitivity na elektrický modul.....</i>	37
<i>Obr. 21. Tomografický řez vzorku vápenaté malty .....</i>	37
<i>Obr. 22. SEM Snímky původních CI částic .....</i>	42
<i>Obr. 23. SEM Snímky původních CI/TEOS částic .....</i>	42
<i>Obr. 24. Prokázání přítomnosti povrchové vrstvy TEOS .....</i>	43

Obr. 25. Magnetizace částic CI a CI/TEOS ve vnějším magnetickém poli - ■ částice CI, ◆ částice CI/TEOS .....	44
Obr. 26. Vakuová sušárna .....	45
Obr. 27. Elektromagnet .....	46
Obr. 28. Anton-Paar, MCR502.....	47
Obr. 29. CI 30 hm.% a) Elastický modul - ◆ isotropní, ■ 150 mT, ▲ 300 mT, ● matrice b) Viskózní modul - ◆ isotropní, ■ 150 mT, ▲ 300 mT, ● matrice.....	49
Obr. 30. CI 50 hm.% a) Elastický modul - ◆ isotropní, ■ 150 mT, ▲ 300 mT, ● matrice b) Viskózní modul - ◆ isotropní, ■ 150 mT, ▲ 300 mT, ● matrice.....	50
Obr. 31. CI 70 hm.% a) Elastický modul - ◆ isotropní, ■ 150 mT, ▲ 300 mT, ● matrice b) Viskózní modul - ◆ isotropní, ■ 150 mT, ▲ 300 mT, ● matrice.....	52
Obr. 32. CI/TEOS 30 hm.% a) Elastický modul - ◆ isotropní, ■ 150 mT, ▲ 300 mT, ● matrice b) Viskózní modul - ◆ isotropní, ■ 150 mT, ▲ 300 mT, ● matrice .....	53
Obr. 33. CI/TEOS 50 hm.% a) Elastický modul - ◆ isotropní, ■ 150 mT, ▲ 300 mT, ● matrice b) Viskózní modul - ◆ isotropní, ■ 150 mT, ▲ 300 mT, ● matrice .....	55
Obr. 34. CI/TEOS 70 hm.% a) Elastický modul - ◆ isotropní, ■ 150 mT, ▲ 300 mT, ● matrice b) Viskózní modul - ◆ isotropní, ■ 150 mT, ▲ 300 mT, ● matrice .....	56
Obr. 35. CI a CI/TEOS isotropní - elastický modul - ◆ 30 hm.% CI, ■ 50 hm.% CI, ▲ 70 hm.% CI, ◆ 30 hm.% CI/TEOS, ■ 50 hm.% CI/TEOS, ● 70 hm.% CI/TEOS .....	57
Obr. 36. CI a CI/TEOS 150 mT - elastický modul - ◆ 30 hm.% CI, ■ 50 hm.% CI, ▲ 70 hm.% CI, ◆ 30 hm.% CI/TEOS, ■ 50 hm.% CI/TEOS, ● 70 hm.% CI/TEOS .....	58
Obr. 37. CI a CI/TEOS 300 mT - elastický modul - ◆ 30 hm.% CI, ■ 50 hm.% CI, ▲ 70 hm.% CI, ◆ 30 hm.% CI/TEOS, ■ 50 hm.% CI/TEOS, ● 70 hm.% CI/TEOS .....	59
Obr. 38 a) CI 30 hm.% isotropní, b) CI 50 hm.% isotropní .....	61
Obr. 39 a) CI 30 hm.% 150 mT, b) CI 50 hm.% 150 mT.....	61
Obr. 40 a) CI 30 hm.% 300 mT, b) CI 50 hm.% 300 mT.....	61
Obr. 41. a) CI 70 hm.% isotropní, b) CI 70 hm.% 150 mT, c) CI 70 hm.% 300 mT.....	62

**SEZNAM TABULEK**

*Tab. 1. Identifikace jednotlivých MRE vzorků (hmotnostní koncentrace) ..... 45*