

# **Vliv oxidace částic na jejich magnetoreologické chování**

Středoškolská odborná činnost

Jakub Smutek

---

Zlín 2015



GYMNÁZIUM ZLÍN-LESNÍ ČTVRŤ

---



## STŘEDOŠKOLSKÁ ODBORNÁ ČINNOST

Obor SOČ: 02 Fyzika

# Vliv oxidace částic na jejich magnetoreologické chování

**Autor:** Jakub Smutek

**Škola:** Gymnázium Lesní čtvrť 1364, Zlín

**Vedoucí práce:** Ing. Michal Sedlačík, PhD.

Zlín 2015



## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou práci SOČ vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, SW atd.) uvedené v seznamu vloženém v práci SOČ. Prohlašuji, že tištěná verze a elektronická verze soutěžní práce SOČ jsou shodné. Nemám závažný důvod proti zpřístupnění této práce v souladu se zákonem č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) v platném znění.

Ve Zlíně dne ..... podpis: .....



## **Poděkování**

Chtěl bych poděkovat Ing. Michalu Sedlačikovi, PhD. za zasvěcení do problematiky, a za trpělivé odpovídání všech mých dotazů. Dále bych rád poděkoval Univerzitnímu institutu UTB ve Zlíně, na kterém práce vznikala.

Velké poděkování také patří učitelům Gymnázia Zlín - Lesní čtvrť, kteří mi poskytli prostor a čas k zhotovení práce.



## Anotace

Práce se zaměřuje na vliv jednotlivých kyselin na vlastnosti MR suspenzí.

Nejprve byla provedena oxidace částic pomocí HCl, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> a HNO<sub>3</sub>. Poté byla zkoumána morfologie částic na SEM a následně byly zhotoveny magnetizační křivky na VSM pro určení magnetických vlastností. Nakonec byly měřeny tokové křivky na viskozimetru a všechna data byla vyhodnocena a porovnána. Výsledky práce ukazují, že vystavení MR suspenzí kyselinám má značný vliv na jejich účinnost, a proto by se měly veškeré MR systémy v praxi před nimi chránit. Možné způsoby ochrany MR suspenzí jsou diskutovány v teoretické části.

Klíčová slova: Magnetoreologické suspenze, oxidace, kyselina, reologie.



## 1 Obsah

2	Úvod .....	8
3	Teoretická část .....	9
3.1	Magnetoreologické suspenze .....	9
3.2	Magnetoreologický efekt .....	9
3.3	Reologie.....	10
3.3.1	Dynamická viskozita .....	10
3.3.2	Reologické vlastnosti MR tekutin .....	11
3.3.3	Viskoelastické vlastnosti.....	12
3.4	Materiály .....	14
3.4.1	Dispergované částice.....	14
3.4.2	Disperzní tekutina.....	15
3.5	Faktory ovlivňující MR efekt.....	16
3.5.1	Teplota.....	16
3.5.2	Magnetizace .....	16
3.5.3	Koncentrace suspenze.....	17
3.5.4	Tvar částic.....	17
3.5.5	Síla vnějšího pole .....	17
3.6	Chemická oxidace.....	18
3.7	Tepelná oxidace.....	18
3.8	Využití MR tekutin .....	19
3.8.1	MR tlumiče .....	19
3.8.2	MR leštící technologie .....	20
4	Experimentální část .....	21
4.1	Metodika .....	21
4.1.1	Oxidace .....	21
4.1.2	Klasifikace magnetických vlastností .....	21
4.1.3	Určení morfologie vzorků .....	22
4.1.4	Klasifikace reologických vlastností MR tekutin .....	22
4.2	Cíle práce .....	24
4.3	Výsledky.....	24
4.3.1	Magnetické vlastnosti .....	24



---

4.3.2	Morfologie magnetických částic.....	25
4.3.3	Reologické vlastnosti .....	28
4.3.4	Ustálený smykový tok.....	28
4.3.5	Oscilační vlastnosti .....	32
5	<i>Závěr</i> .....	36
6	<i>Reference</i> .....	37
7	<i>Seznam grafů a obrázků</i> .....	39
8	<i>Seznam zkratk</i> .....	41
9	<i>Posudek konzultanta</i> .....	42



## 2 Úvod

Magnetoreologické suspenze (dále jen "MR" suspenze) patří do skupiny inteligentních materiálů. V posledních dvaceti letech dostalo velké pozornosti, a to z důvodu jejich implementace do mnoha průmyslových odvětví. Běžné MR suspenze jsou suspenze tvořené z nemagnetické disperzní fáze (např. silikonový olej nebo voda) obsahující rozdispergované ferromagnetické částice o průměru v rozmezí 1 – 10  $\mu\text{m}$ . V přítomnosti dostatečně silného magnetického pole jsou tyto systémy schopny v řádu milisekund reverzní přeměny z tekutého stavu do gelovitého až tuhého stavu. Po vypnutí magnetického pole se částice důsledkem hydrodynamických sil opět rozdispergují. Tento jev lze navíc kontrolovat intenzitou magnetického pole. MR technologie se nejčastěji používá v automobilovém průmyslu (tlumiče, spojky, brzdy), ale své uplatnění našla i v jiných inženýrských odvětvích, kde je potřeba zajistit rychlou změnu tuhosti nebo přenos kroutícího momentu.

Mezi disperzní fází a částicemi může docházet k chemickým reakcím nebo jiným jevům, které v důsledku vedou ke snížení účinnosti MR efektu. Nejdůležitějšími z nich jsou oxidace a sedimentace. Sedimentace je způsobena velkým rozdílem hustot mezi disperzní fází a ferromagnetickými částicemi. Problém se sedimentací je možné řešit přidáním vhodné povrchově aktivní látky, nebo úpravou tvaru a velikosti částic. Oxidace nastává buď chemicky, reakcí s disperzní fází (např. vlhkost, kyselé prostředí), nebo změnou vnějších podmínek (nejčastěji teplota). Problém s oxidací je obecně možné redukovat přidáním antioxidačního aditiva. Důvodem, proč se zabývat vlivem oxidace, je skutečnost, že v praxi existuje celá řada různých MR suspenzí, přičemž každá má jiné vlastnosti a může na oxidaci reagovat jiným způsobem.

Práce je zaměřena na oxidaci ferromagnetických částic pomocí různých kyselin, charakterizaci zoxidovaného stavu, přípravu MR suspenzí, a nakonec na určení jejich reologických vlastností ve vnějším magnetickém poli.



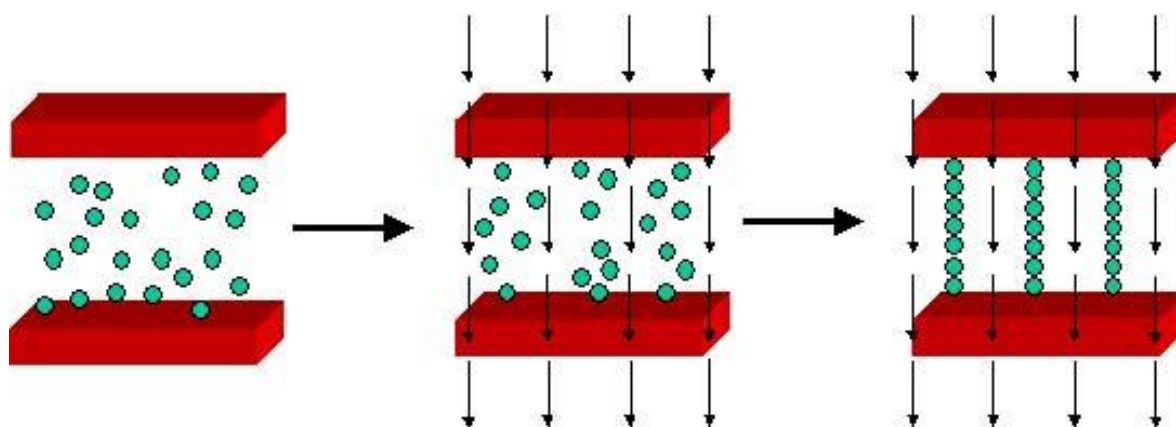
### 3 Teoretická část

#### 3.1 Magnetoreologické suspenze

MR systémy jsou suspenze tvořené disperzní fází a dispergovanou látkou. Jako prostředí se nejčastěji používá silikonový olej nebo voda. Dispergovaná látka by měla být tvořena z ferromagnetických, případně ferrimagnetických mikročástic. Řadí se mezi inteligentní materiály, tj. systémy, které jsou schopny rychlé a vratné změny svého stavu v reakci na změnu vnějších podmínek (teplota, pH, magnetické nebo elektrické pole).

#### 3.2 Magnetoreologický efekt

MR efekt je jev, při kterém se MR tekutina v přítomnosti vnějšího magnetického pole dostane z tekutého do tuhého stavu. Je způsoben vytvořením řetězkových struktur ve směru působícího pole z magnetických částic v tekutině. V absenci magnetického pole jsou částice volně distribuovány v suspenzi. Při aplikaci pole se částice magnetizují v závislosti na intenzitě magnetického pole a začnou se uspořádávat ve směru pole do struktur, které mají vliv na reologické vlastnosti (viskozita, prahové napětí, viskoelastické moduly). V potenciálních aplikacích jsou MR suspenze vystaveny smykovým nebo oscilačním silám. V obou případech poté v systému soupeří síly hydrodynamické a magnetické. Jestliže jsou magnetické síly větší, nedochází k toku kapaliny. [1]



Obrázek 1 Vliv vnějšího magnetického pole na strukturu MR suspenze.

### 3.3 Reologie

Reologie je obecně věda zabývající se deformací a tokem hmoty vlivem vnějšího napětí, které může být např. smykové nebo extenzionální. Její znalost je důležitá pro vědce v mnoha odvětvích, převážně tam, kde se pracuje s polymery, nátěry, tiskařským inkoustem, detergenty, nebo oleji. Dnes se reologie považuje za samostatnou vědeckou disciplínu a je možné ji studovat na akademické úrovni, i bez cíle obohacení jiného oboru.

K popisu tokových vlastností látek je vhodné znát závislost viskozity a smykového napětí na rychlosti smykové deformace.

#### 3.3.1 Dynamická viskozita

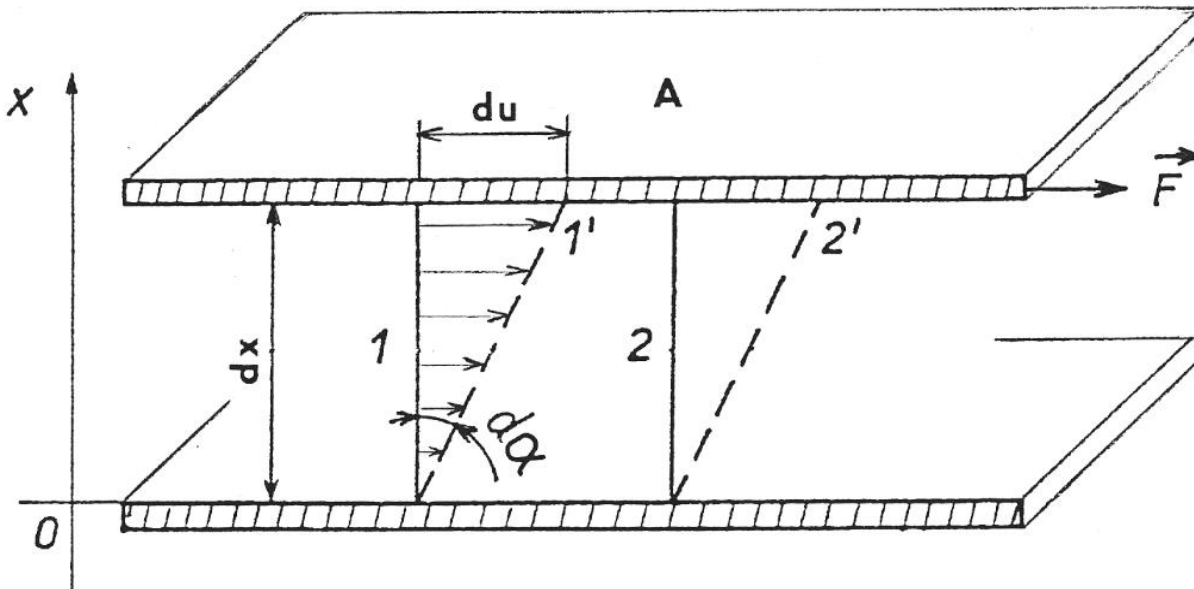
Viskozita je míra odporu látky vystavené smykovému napětí. Pro kapaliny viskozita určuje, jak dobře bude daná kapalina téct. Například voda má nižší viskozitu než med. Definice viskozity je založená na principu suspenze mezi dvěma rovnoběžnými deskami, z nichž jedna se pohybuje rovnoměrným pohybem (Obr. 2). V ideálním případě by se díky druhému Newtonovu zákonu na pohybující se desku nemuselo působit žádnou silou, aby zůstala v pohybu. Kdyby rychlost pohybu byla dostatečně malá, jednotlivé vrstvy suspenze by se pohybovaly rovnoběžně. Každá vrstva by měla nižší rychlost než předcházející. Díky tomu mezi nimi vzniká třecí síla, kterou musíme vyrovnat silou vnější,  $F$ . Velikost síly  $F$  je přímo úměrná ploše desky,  $A$  a rychlostnímu gradientu. Míra úměrnosti je  $\eta$  neboli dynamická viskozita a má jednotku Pa·s. Pro Newtonské kapaliny je viskozita konstantní. Z těchto poznatků vyplývá rovnice:

$$F = A * \eta * \frac{du}{dx} \quad (1)$$

Rychlost smykové deformace je definována jako gradient rychlosti, který lze po několika úpravách zapsat následovně:

$$\dot{\gamma} = \frac{du_1}{dx_2} = \frac{d}{dx_2} \left( \frac{dx_1}{dt} \right) = \frac{d}{dt} \left( \frac{dx_1}{dx_2} \right) \quad (2)$$

Zde výraz  $\left(\frac{dx_1}{dx_2}\right)$  reprezentuje deformaci (změna polohy v jednom směru vůči změně polohy ve směru druhém). Vzhledem k tomu že  $x_1$  i  $x_2$  mají stejné jednotky, vychází konečná rychlost v reciprokých sekundách a lze ji označovat jako rychlost deformace.



Obrázek 2: Profil toku kapaliny mezi pohyblivou a nepohyblivou deskou.

Smykové napětí je v tekutinách definováno jako viskozita vynásobená rychlostí smykové deformace. Z rovnice (1) vyplývá, že smykové napětí je rovno podílu  $F/A$  a má jednotku Pa.

### 3.3.2 Reologické vlastnosti MR tekutin

Při absenci vnějšího magnetického pole vykazují MR suspenze téměř Newtonské chování:

$$\tau = \dot{\gamma} * \eta \quad (3)$$

Smykové napětí  $\tau$  je lineárně úměrné rychlosti smykové deformace  $\dot{\gamma}$  a viskozita  $\eta$  je závislá pouze na objemovém zlomku částic v suspenzi.

Jedním z použitelných modelů pro závislost  $\tau$  na  $\dot{\gamma}$  v magnetickém poli je Binghamův model (rovnice 4), který zohledňuje přítomnost prahového napětí  $\tau_0$ . Zjednodušeně lze říci, když je na látku působeno napětí menší než prahové, chová se jako pevná látka. V momentě, kdy je prahové napětí překonáno, smykové napětí je přímo úměrné rychlosti deformace.

$$\tau = \dot{\gamma} * \eta + \tau_0 \quad (4)$$

Prahové napětí může být použito k porovnání "tuhosti" vnitřních struktur vytvořených za přítomnosti vnějšího magnetického pole. Jedním z možných pohledů na  $\tau_0$  je síla potřebná k destrukci vnitřních struktur. [2]

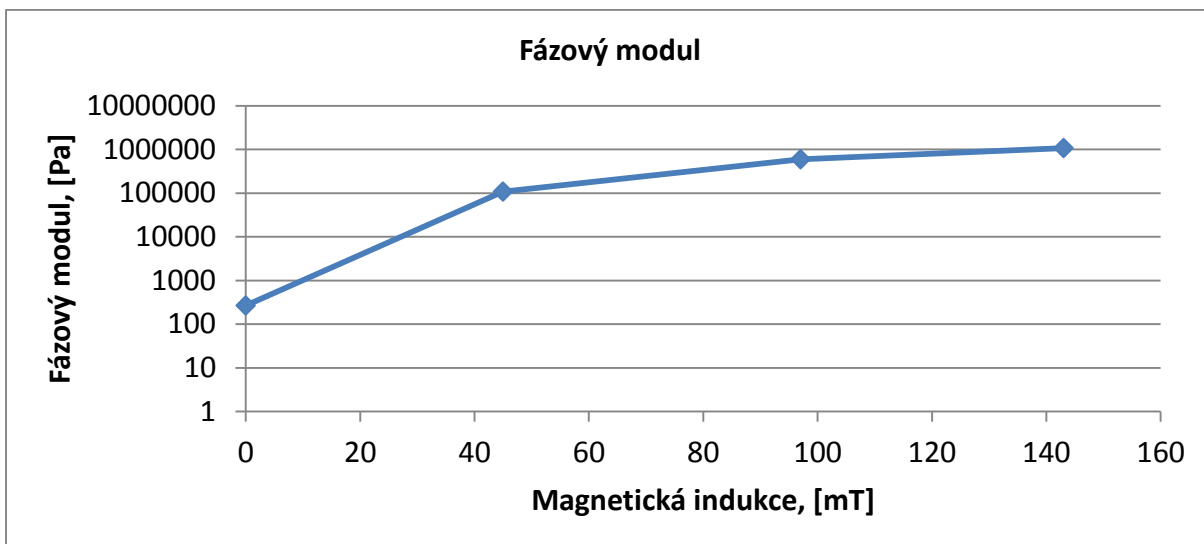
### 3.3.3 Viskoelastické vlastnosti

MR suspenze se v přítomnosti vnějšího magnetického pole chovají jako Binghamovy plastické látky a tím pádem taky jako viskoelastické materiály, neboť vykazují viskózní (tekuté) a elastické (pružné) vlastnosti. Viskoelastická se měří pomocí oscilačních experimentů. Zde se na vzorek působí sinusoidním napětím nebo deformací. Moderní viskozimetry umožňují dosáhnout velmi nízkých amplitud deformací (0,0001 – 0,1 %), a tak nezpůsobují destrukci vnitřních struktur, pouze je deformují. Viskoelasticitu je možné měřit pomocí komplexního dynamického modulu,  $G^*$ . Komplexní modul představuje celkovou odolnost materiálu vůči deformaci. Jelikož  $G^*$  je obecně komplexní číslo, můžeme jej rozložit na reálnou a imaginární složku a platí:

$$G^* = G' + iG'' \quad (5)$$

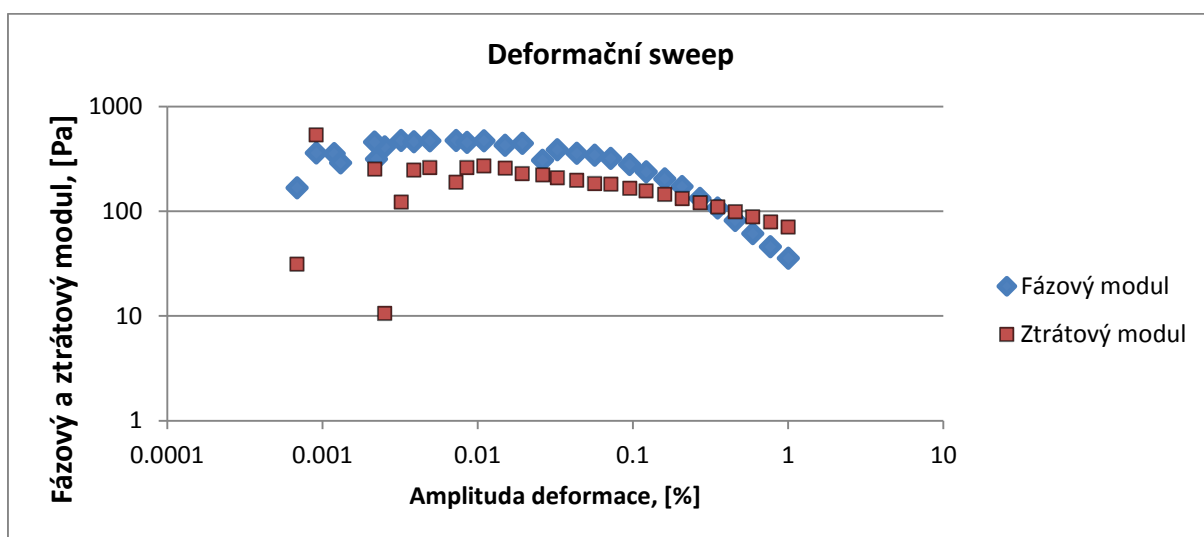
V rovnici  $G'$  představuje reálnou část, označuje se jako fázový modul (storage modulus), a reprezentuje elastické vlastnosti materiálu (tuhost) a také jeho schopnost uchovávat potenciální energii (podobně jako pružina). Imaginární složka  $G''$  se nazývá ztrátový modul (loss modulus) a naopak představuje viskózní chování materiálu. V nepřítomnosti pole a při nízkých koncentracích je zpravidla  $G''$  větší než  $G'$  (látka dobře teče). Při vysokých koncentracích se jejich hodnoty přibližně rovnají. Oproti tomu při zapnutí vnějšího pole se vytvoří vnitřní struktury (látka ztuhne) a  $G'$  se zvýší až o několik řádů. Při oscilačních experimentech platí vztah mezi napětím  $\tau$  amplitudou deformace  $\varepsilon_0$  a časem:

$$\tau(\omega) = \varepsilon_0 G' \sin(\omega t) + \varepsilon_0 G'' \cos(\omega t) \quad (6)$$



Graf 1: Graf závislosti fázového modulu,  $G'$ , na hustotě magnetického pole,  $B$ . Z důvodu tvorby řetězkových struktur v systému a tuhnutí suspenze se  $G'$  zvyšuje se zvyšující se  $B$ .

Aby se daly zmíněné moduly aplikovat, je třeba znát jejich závislost na úhlové rychlosti v oblasti lineární viskoelasticity (LVR). Oblast lineární viskoelasticity se zjistí ze závislosti dynamických modulů na amplitudě deformace (Obr. 4). Jedná se v podstatě o deformace, při kterých nedochází k destrukci vnitřních struktur, a tím pádem jsou dynamické moduly nezávislé na úhlové frekvenci (v grafu se jeví jako konstantní).



Graf 2: Graf závislosti fázového,  $G'$ , a ztrátového modulu,  $G''$ , na amplitudě úhlové deformace.

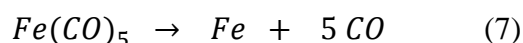
### 3.4 Materiály

MR suspenze bývají zpravidla dvoufázové systémy složené z disperzní tekutiny a dispergovaných částic. Jako dispergované částice se používají ferromagnetické částice o velikosti v řádech mikrometrů nebo ferrimagnetické vícedoménové částice. Podmínkou je, aby částice měly magnetické domény. Značný rozdíl mezi hustotou jednotlivých fází (železo  $7,81 \text{ g/cm}^3$ , silikonový olej  $\approx 1 \text{ g/cm}^3$ ) způsobuje, že dochází k sedimentaci částic v suspenzi. Sedimentaci je možné silně zredukovat přidáním vhodné povrchově aktivní látky.

#### 3.4.1 Dispergované částice

V MR tekutině zastávají nejdůležitější roli samotné částice vzhledem k jejich magnetickým vlastnostem. Ideální částice by měli mít vysokou magnetickou saturaci a nízkou koercivní sílu. Magnetická saturace je jev, kdy jsou v látce natočeny všechny magnetické momenty ve směru vnějšího pole a tím pádem látka nemůže již být více magnetizována. Koercivní síla,  $H_c$ , je síla potřebná k překonání remanentní (zbytkové) magnetizace při odmagnetizování. Vysoká magnetická saturace zabezpečuje větší tuhost při vystavení vnějšímu poli a nízká  $H_c$  umožňuje použití nižšího pole k dosažení vyšší magnetizace a navíc usnadňuje následné odmagnetizování. [3] Nízká magnetická remanence, která je typická pro měkké ferromagnetické látky, je dalším důležitým faktorem částic pro MR suspenze. Kdyby byla remanence vysoká, tak by se po odstranění pole nemuselo dosáhnout požadovaného snížení prahového napětí a v reálném použití by se snižovala účinnost MR systému.

Nejčastěji se jako ferromagnetické částice používá karbonylové železo (CI), které vzniká tepelným rozkladem pentakarbonylu železa:



Tyto částice mohou mít velikost od 1 do 10 mikrometrů a vykazují prahové napětí v suspenzi  $\tau_0 = 50 \text{ kPa}$  pro objemový zlomek  $\phi = 30 \%$  a pro sílu vnějšího magnetického pole  $H = 320 \text{ kAm}^{-1}$ . Pokrok při zvyšování prahového napětí byl pozorován u slitiny železa a kobaltu (50 % Fe, 50 % Co), jejichž  $\tau_0 = 70 \text{ kPa}$  bylo dosaženo za stejných podmínek. Důvodem je pravděpodobně vyšší magnetická saturace.

V poslední době se věnuje větší pozornost tzv. dimorfním suspenzím, tj. suspenze, jejichž dispergovanou část tvoří dvě tvarově odlišné částice. Ukázalo se, že reologické vlastnosti MR

tekutin ve vnějším poli je možné zlepšit přidáním určitého procenta např. tyčovitých částic železa [4]. Zlepšení MR efektu u dimorfních suspenzí může kompenzovat snížení tohoto efektu potažením částic polymery, které naopak zlepšují tepelnou a sedimentační stabilitu. Problémem u dimorfních částic by mohla být složitost jejich přípravy a tím i horší cenová dostupnost, která je i tak relativně vysoká.

Potahování částic polymery je dalším trendem, kterému se dostává značné pozornosti. Kvůli velkým rozdílům hustot mezi částicemi a disperzní fází dochází často k sedimentaci. Z tohoto důvodu byly navrženy způsoby přípravy potažených MR částic s mikrostrukturou "core-shell" (jádro-obal). Výsledky experimentů ukazují, že potažením materiálu je možné efektivně zvýšit sedimentační stabilitu a zlepšit stabilitu částic proti oxidaci jak tepelné tak chemické [4, 5]. Nevýhodou potahování částic je zhoršení jejich magnetických vlastností, a tím pádem i MR efektu.

Teoreticky by měl být MR efekt pozorován u všech ferromagnetických látek. Z tohoto důvodu bylo navrženo několik dalších materiálů, jako jsou například oxid kobaltnato-železitý  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$  nebo magnetit  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ . Nanočástice  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$  mají nižší magnetickou saturaci ( $54 - 80 \text{ Am}^2\text{g}^{-1}$ ) [6], než karbonylové železo ( $170 \text{ Am}^2\text{g}^{-1}$ ) a tím pádem budou vykazovat nižší MR efektivitu. Obecně je největší výhodou  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$  jejich středně velká magnetická saturace. Nevýhodou se naopak jeví vysoká koercivita, nicméně tato vlastnost jej činí vhodným kandidátem pro magnetickou hypertermii při léčbě nádorových onemocnění [7]

### 3.4.2 Disperzní tekutina

Disperzní tekutina v MR systémech slouží jako kapalné médium pro magnetické částice. Tekutina se vybírá na základě jejich reologických vlastností, tepelné a chemické stability a samozřejmě cenové dostupnosti. Nejčastěji se můžeme setkat s glykolem, silikonovými a minerálními oleji, a dokonce i s vodou. Jak již bylo zmíněno, velkým problémem zůstává sedimentace částic v tekutině. Jedním z možných řešení je přidání vhodných aditiv, jako např. kyselina stearová, sepiolite [8], nebo Polysorbate 80. U všech těchto aditiv byla pozorována zvýšená sedimentační stabilita, ovšem je důležité podotknout, že zvýšení stability je doprovázené snížením MR efektu.

### 3.5 Faktory ovlivňující MR efekt

U MR suspenzí lze nalézt několik faktorů ovlivňujících jejich magnetické nebo mechanické vlastnosti. Nejdůležitější jsou teplota, koncentrace suspenze, velikost a tvar částic a síla vnějšího magnetického pole.

#### 3.5.1 Teplota

Změna teploty má vliv jak na reologické tak i na magnetické vlastnosti suspenzí. Viskozita se zvyšující se teplotou snižuje (látka teče lépe). Pro pochopení tohoto jevu je dobré uplatnit molekulový pohled na kapaliny. Se zvyšující se teplotou se čas potřebný k interakci snižuje z důvodu zvýšené střední rychlosti molekul. V makroskopickém měřítku to znamená, že bude potřeba nižší síla pro zajištění toku. V případě MR suspenzí se dá uplatnit exponenciální empirický vztah:

$$\eta = \eta_0 * \exp(-bT) \quad (8)$$

kde  $\eta_0$  a  $b$  jsou empirické konstanty. Přítomnost teploty v exponentu znamená, že i menší změna teploty může výrazně ovlivnit výsledek testu. Z tohoto důvodu je kladen velký důraz na udržování konstantní teploty při experimentech. Jako vhodný empirický model lze aplikovat rovnici (9), která je použitelná pro rozsah teplot asi 50 K. [9]

#### 3.5.2 Magnetizace

U para- a ferromagnetických látek dochází ke vzniku magnetizace díky natáčení magnetických momentů ve směru vnějšího magnetického pole. Pokud se všechny magnetické momenty natočí ve směru magnetického pole, dojde k magnetické saturaci a magnetizace se dále již nezvyšuje. Teplota má také vliv na magnetizaci. Z Langevinovy rovnice vyplývá, že magnetizace se snižuje s teplotou. Je tomu tak z důvodu růstu Brownova pohybu se členem  $k*T$ .

$$M = M_s * \left( \frac{1}{\tanh(m\mu_0 HkT)} - \frac{1}{m\mu_0 HkT} \right) \quad (9)$$

V rovnici je  $M_s$  magnetická saturace,  $\mu_0$  permeabilita vakua,  $H$  intenzita magnetického pole,  $k$  Boltzmanova konstanta a  $T$  termodynamická teplota. [3]



### 3.5.3 Koncentrace suspenze

MR efekt je silně ovlivněn koncentrací magnetických částic, jejich velikostí a tvarem. Se zvyšující se koncentrací částic v suspenzi se zvyšuje i počet indukovaných struktur v magnetickém poli a výsledná reologie (ve smyslu nárůstu viskozity, prahového napětí a viskoelastických modulů) se bude také zvyšovat. Ovšem existuje určitá mez v koncentraci, pod kterou je MR efekt příliš malý, neboť se vytvoří pouze slabé struktury. Firma LORD v praxi používá objemové koncentrace v rozmezí 20 – 40 obj.% [10]. Nicméně při překročení maximální koncentrace se snižuje pohyblivost částic a v nepřítomnosti magnetického pole se zvyšuje i viskozita, což snižuje konečnou MR účinnost systému.

### 3.5.4 Tvar částic

Vliv tvaru částic je znatelný především při nižších koncentracích a malých vnějších polích. Při vysokých koncentracích jsou rozdíly v MR efektu zanedbatelné. Nejčastěji se setkáváme se sférickými, tyčovitými a deskovými tvary. Obecně platí, že částice, jejichž hlavní osa je natočena ve směru pole, tj. tyčovité, mají větší indukovaný magnetický moment a tím pádem i pevnější strukturu (3).

### 3.5.5 Síla vnějšího pole

Při nízkých intenzitách magnetického pole je prahové napětí úměrné druhé mocnině vnějšího pole. Se zvyšováním intenzity pole dochází k saturaci magnetizace, a prahové napětí se zvyšuje subkvadraticky s vnějším polem [11]. Pro prahové napětí v závislosti na vnějším poli platí:

$$t_y(H_o) = aH_o^2 \left( \frac{\tan \sqrt{\frac{H_o}{H_c}}}{\sqrt{\frac{H_o}{H_c}}} \right) \quad (10)$$

Kde  $a$  je konstanta závislá na objemovém zlomku, susceptibilitě suspenze a teplotě.  $H_o$  značí intenzitu vnějšího pole a  $H_c$  je tzv. kritická síla pole. Pro nízké intenzity pole, tedy  $H_o \ll H_c$ , platí:

$$t_y(H_o) = aH_o^2 \quad (11)$$

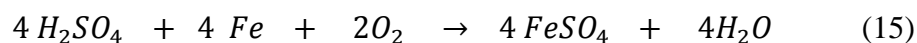
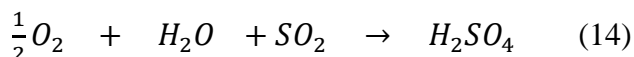
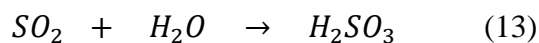
Naopak pro  $H_o \gg H_c$  platí:

$$t_y(H_o) = a\sqrt{H_c}H_o^{3/2} \quad (12)$$

### 3.6 Chemická oxidace

Oxidace železa je nejčastěji způsobena působením kyselin a kyslíku na jeho povrchu. V reálných podmínkách se lze setkat s kyselinou sírovou a dusičnou nejčastěji ve formě kyselých dešťů, které jsou produkty znečištění atmosféry.

Oxid siřičitý je jedním z důvodů tvorby kyselých dešťů. Rovnice (13) popisuje vznik kyselého prostředí a rovnice (14) pak samotnou oxidaci železa [12]. Ve znečištěných oblastech se pH dešťů pohybuje na relativně nízkých hodnotách 3 – 4. Na povrchu kovu je pH vyšší, a to z důvodu eliminace kyseliny v reakci (15)



Dalším důvodem vzniku kyselých dešťů jsou oxid dusnatý a dusičitý (NO a NO<sub>2</sub>). Běžně se v přírodě vytvářejí reakcí dusíku a kyslíku, nejčastěji vlivem blesků (za normálních podmínek nereagují). Nejvíce NO<sub>2</sub> produkuje automobilový průmysl, a to ve spalovacích motorech automobilů. V atmosféře probíhá několik reakcí, jejichž celkový výsledek je disproportionace NO<sub>2</sub> na kyselinu dusičnou a dusitou [13]



Následná reakce kyseliny dusičné s železem produkuje dusičnan železnatý.

### 3.7 Tepelná oxidace

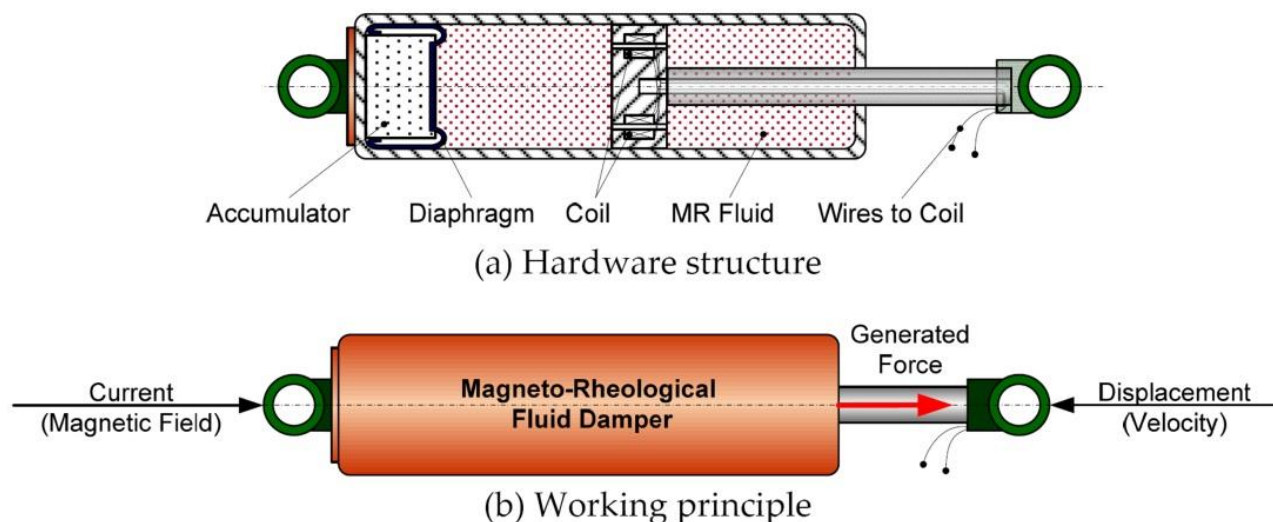
Tepelná oxidace kovů je v podstatě reakce kovu s kyslíkem, přičemž teplota ovlivňuje mechanismus a rychlost reakce. Při oxidaci železa kyslíkem při vysokých teplotách vznikají tři oxidy. Na povrchu se nachází hematit Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, který dává rezavému železu oranžovou barvu. Uprostřed leží vrstva magnetitu Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> a pod ním wustit FeO.

### 3.8 Využití MR tekutin

Již bylo zmíněno, že MR suspenze mají nejrozsáhlejší využití zejména v automobilovém průmyslu. Výhodou MR technologie je rychlá odezva (v řádech milisekund), jednoduchost designu a zvýšená účinnost. Nevýhodou zůstává relativně vysoká cena (např. kilogram karbonylového železa se pohybuje v cenách 13 – 15 dolarů) a opotřebení suspenzí (sedimentace, oxidace) [14]. Komerčně dostupné MR suspenze od firmy LORD rozšířily svoji oblast působení, např. na tlumiče v automobilech, brzdy v posilovacích strojích, odpružení sedadel, leštící technologie, nebo na biomedicínální aplikace. Zejména semi-aktivní tlumiče (tj. můžou měnit svoji tuhost v závislosti na podmínkách) ukázaly dobrou účinnost v automobilech, kde je potřeba zajistit pohodlné ovládání (např. armádní vozy).

#### 3.8.1 MR tlumiče

V tlumičích naplněných běžnou tekutinou se píst posunuje válcem, přičemž vytlačí tekutinu skrz jeden nebo více kanálek. Viskozita suspenze potom disipuje energii nárazu, což způsobuje jeho utlumení. Problémem klasických tlumičů je jejich nevšestrannost, což znamená, že tlumič má pořád stejnou tuhost. Naopak v MR tlumičích je možné viskozitu systému a následně tuhost tlumiče upravovat pomocí intenzity vnějšího magnetického pole podle potřeby, což zpravidla zpříjemňuje jízdu v proměnném terénu. MR tlumič funguje na podobném principu jako obyčejný tlumič, avšak s tím rozdílem, že místo běžné tlumící kapaliny je použita MR tekutina. V přítomnosti magnetického pole se částice uspořádají a brání průtoku kanálky, čímž se zvyšuje tuhost tlumiče.



Obrázek 3: Schéma MR tlumiče [18]

V automobilovém průmyslu se nejčastěji používá systém MagneRide vyvinutý společností Delphi Automotive. MagneRide, na rozdíl od běžných tlumičů, nemá pohyblivé součástky. Skládá se ze čtyř mono-trubicových tlumičů na každém rohu vozidla, sady senzorů a elektronické kontrolní jednotky (ECU). MagneRide využívají například automobilky Audi, Ferrari nebo Cadillac [15].

### **3.8.2 MR leštící technologie**

Jedna z nejvíce inovativních aplikací MR tekutin je leštění optických čoček. Oproti klasickým leštícím metodám se metody s MR tekutinou mohou kontrolovat v reálném čase díky ovladatelnému tvaru a tuhosti. Finální tvar povrchu čočky a výsledky leštění jsou přesně předpovězeny díky použití počítačových algoritmů, které mapují a současně kontrolují odstraňování materiálu [16].

## 4 Experimentální část

### 4.1 Metodika

#### 4.1.1 Oxidace

Chemická oxidace částic byla prováděna v prostředí nejčastěji se vyskytujících kyselin: chlorovodíkové, dusičné a sírové.

Vzorky o hmotnosti 4 g byly vystaveny působení kyselin o látkové koncentraci 0,05 M po dobu 30 min. Během experimentu bylo měřeno pH roztoku. Po uplynutí 30 min byly vzorky odděleny od kyseliny pomocí magnetu, který držel v nádobě magnetické železo, a následně vysušeny v sušárně po dobu 20 hod při teplotě 50 °C.

#### 4.1.2 Klasifikace magnetických vlastností

Magnetizační křivky vzorků byly určeny na VSM (Vibration Sample Magnetometer, EG&G PARC 704, Lake Shore, USA, (obr. 4)). Získány byly magnetické saturace a koercivní síla. Před experimentem se zvýšilo vnější pole na  $800 \text{ kA}\cdot\text{m}^{-1}$  a vzorek se umístil do středu magnetického pole pro zajištění maximální hodnoty magnetizace během posunování po osách vzorku.



Obrázek 4: Vibrační magnetometr.

#### 4.1.3 Určení morfologie vzorků

Morfologie čistých a zoxidovaných částic CI byla zkoumána pomocí skenovacího elektronového mikroskopu (Tescan s.r.o., Česká republika).

#### 4.1.4 Klasifikace reologických vlastností MR tekutin

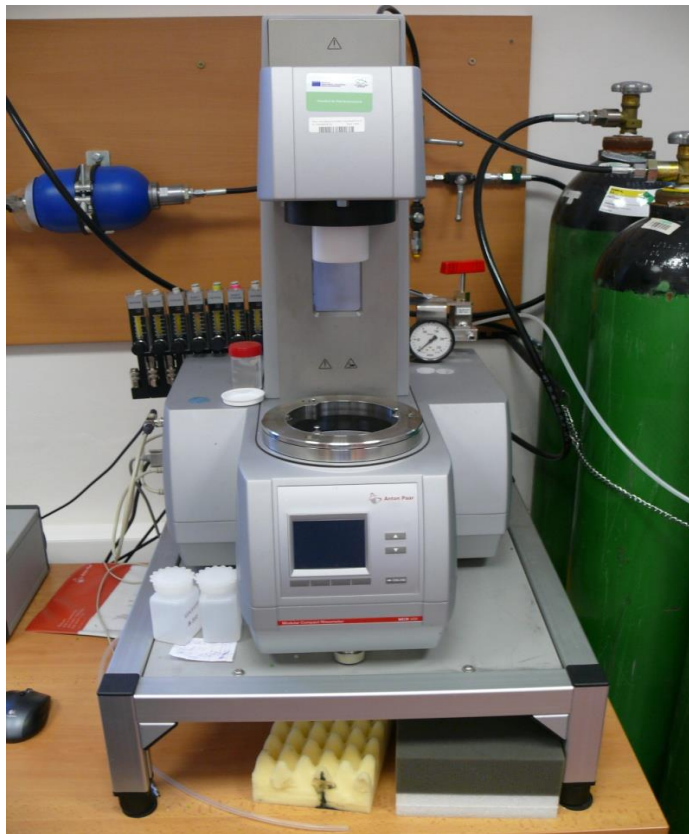
Byly připraveny MR suspenze obsahující CI částice (třída ES) a jejich zoxidované analogy o koncentraci 60 hm.%. Jako disperzní medium byl použit silikonový olej (Lukosiol M200, Chemické závody Kolín, Česká republika, viskozita 194 mPa·s, hustota 0,965 g/cm<sup>3</sup>). Před každým měřením byly suspenze zamíchány na sonikátoru po dobu 1 min. Měření reologických vlastností byla provedena na rotačním viskozimetru Physica MCR501 (Anton Paar GmbH, Rakousko) pomocí Physica MRD 180/1T magneto-cely při 25 °C. Skutečná hodnota hustoty magnetického pole byla měřena pomocí Hallovy sondy. Teplota byla nastavena použitím Anton Paar cirkulátoru Viscotherm VT2 s teplotní stabilitou  $\pm 0,02$  °C. K samotnému měření byla použita geometrie paralelních desek o průměru 20 mm. Mezera mezi deskami byla nastavena na 0,5 mm a do této mezery byl vložen vzorek vždy o objemu 0,3 cm<sup>3</sup>. Testy byly prováděny okamžitě po rozmíchání a vložení vzorku, aby nedošlo k sedimentaci magnetických částic v systému.

Na přístroji byly provedeny 3 série testů pro všechny vzorky MR tekutin. Prvním experimentem vždy bylo měření ustáleného smykového toku, díky kterému byla zjištěna závislost smykového napětí a viskozity na rychlosti smykové deformace. Rychlost smykové deformace byla exponenciálně zvyšována z hodnoty 0,1 s<sup>-1</sup> až na 100 s<sup>-1</sup>. Celkem byl test pro každý vzorek opakován čtyřikrát, přičemž při každém dalším testu se zvýšil proud o 0,5 A začínající na 0 A. Před každým testem byl vzorek zamíchán (kvůli zabránění usazování dispergované části suspenze a případné destrukce residuálních indukovaných struktur) po dobu 60 s při rychlosti smykové deformace 100 s<sup>-1</sup>. Při testech v přítomnosti vnějšího magnetického pole se na vzorek nechalo navíc působit odpovídající magnetické pole po dobu 60 s a to z důvodu zajištění dostatečného času pro vytvoření rovnovážných vnitřních struktur.

Druhou sérií provedených testů byl deformační sweep. Měřeny byly viskoelastické moduly v závislosti na amplitudě deformace, přičemž úhlová rychlost zůstávala konstantní. Použité rozmezí amplitud deformace se lišilo v závislosti na aplikovaném elektrickém proudu generujícím odpovídající magnetické pole v cívce. Nejvyšší amplituda deformace byla 0,5 % a nejnižší

0,0005 %. Úhlová rychlost byla zvolena 6,28 rad/s. Z výsledných grafů byla poté odečtena hodnota amplitudy deformace, která odpovídá LVR.

Poslední experiment byl prováděn opět v oscilačním módu. Byly zde měřeny viscoelastické moduly, ale oproti předchozímu experimentu byla amplituda deformace konstantní (v rozsahu LVR) a úhlová rychlost stoupala z hodnoty 0,628 rad/s na hodnotu 62,8 rad/s.



Obrázek 5: Rotační viskozimetr Physica MCR501.

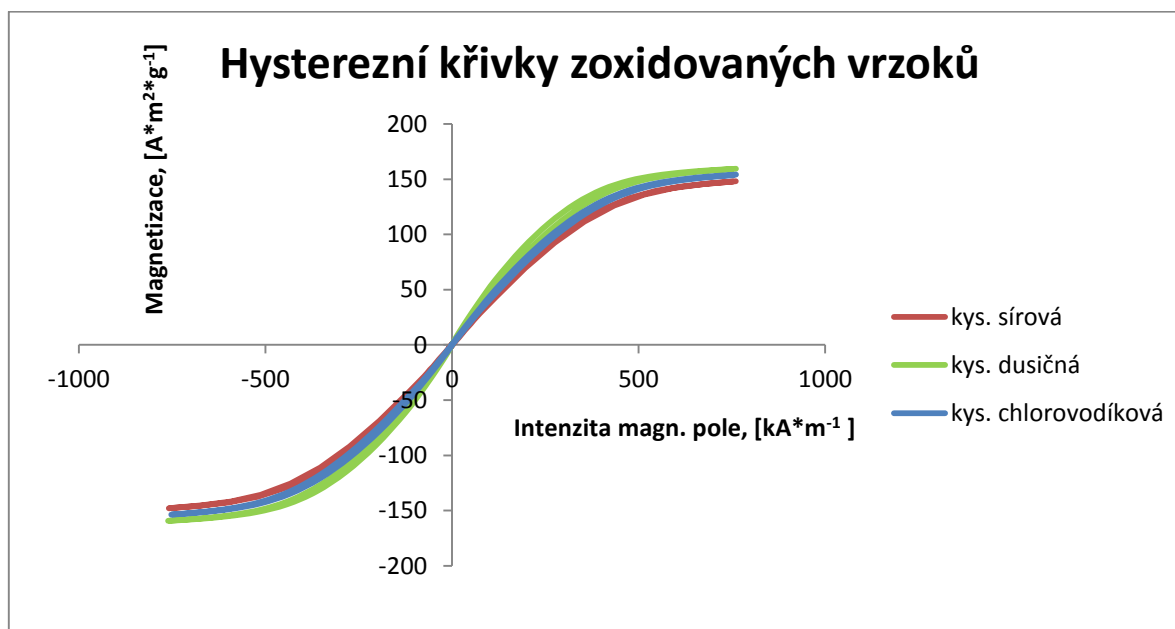
## 4.2 Cíle práce

1. Chemická oxidace mikročástic karbonylového železa vystavením různým typům kyselin
2. Určení magnetických vlastností zoxidovaných vzorků pomocí vibračního magnetometru
3. Charakterizace morfologie vzorků pomocí skenovací elektronové mikroskopie (SEM)
4. Příprava odpovídajících suspenzí
5. Měření reologických vlastností suspenzí na viskozimetru umožňujícím aplikaci vnějšího magnetického pole

## 4.3 Výsledky

### 4.3.1 Magnetické vlastnosti

Za účelem určení magnetických vlastností vzorků byly naměřeny jejich magnetizační křivky (Graf 3). Z nich byly následně vybrány hodnoty  $M_s$  (Tabulka 1). Nejvyšší hodnota  $M_s$  byla podle očekávání naměřena u nezoxidovaného vzorku CI částic. U vzorku vystavenému působení  $H_2SO_4$  byla  $M_s$  nejnižší, a to právě z důvodu dvojsytnosti této kyseliny způsobující nejvýraznější oxidaci částic CI. U všech vzorků je možné ztotožnit reologická data (kapitoly 4.2.3 a 4.2.4) s velikostí  $M_s$ .



Graf 3: Hysterezní křivky vzorků CI částic exponovaných účinkům různých druhů kyselin.

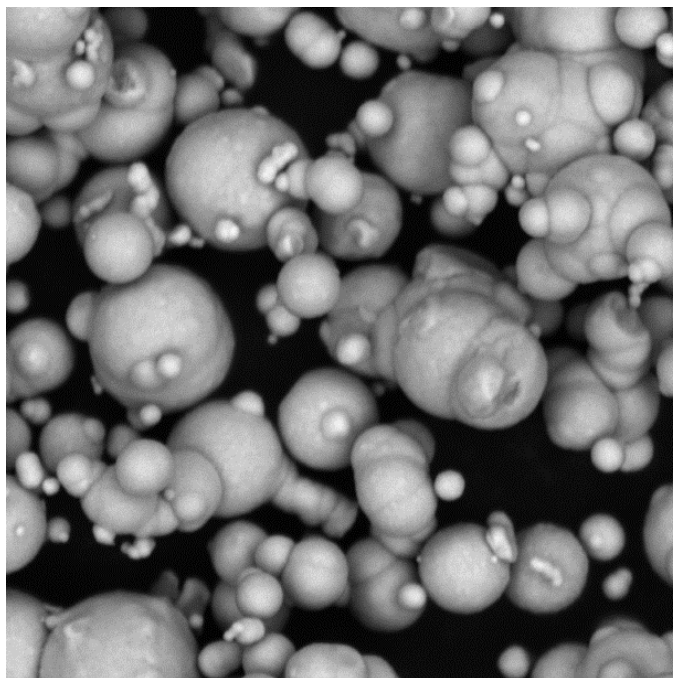


Tabulka č. 1: Hodnoty magnetické saturace,  $M_s$ , pro CI částice exponované účinkům různých druhů kyselin.

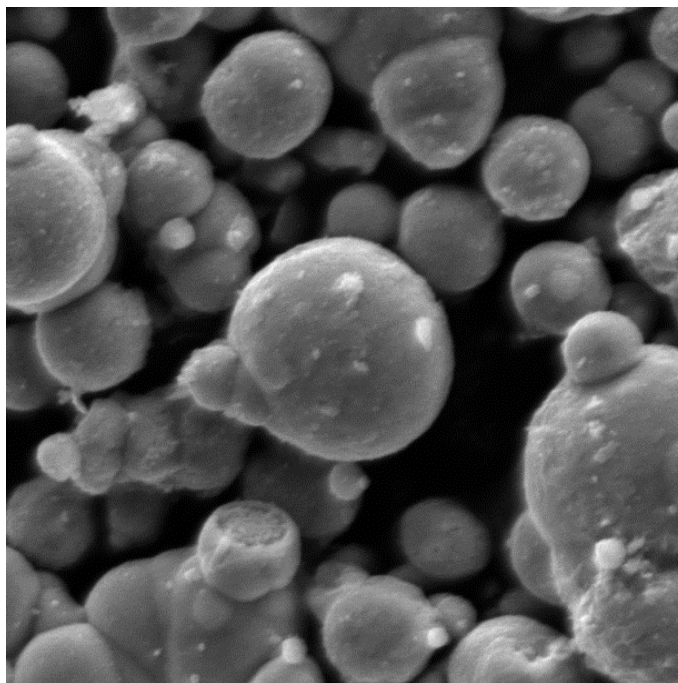
	Výchozí vzorek	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	HNO <sub>3</sub>	HCl
$M_s/(A \cdot m^2 \cdot g^{-1})$	175	148	159	155

#### 4.3.2 Morfologie magnetických částic

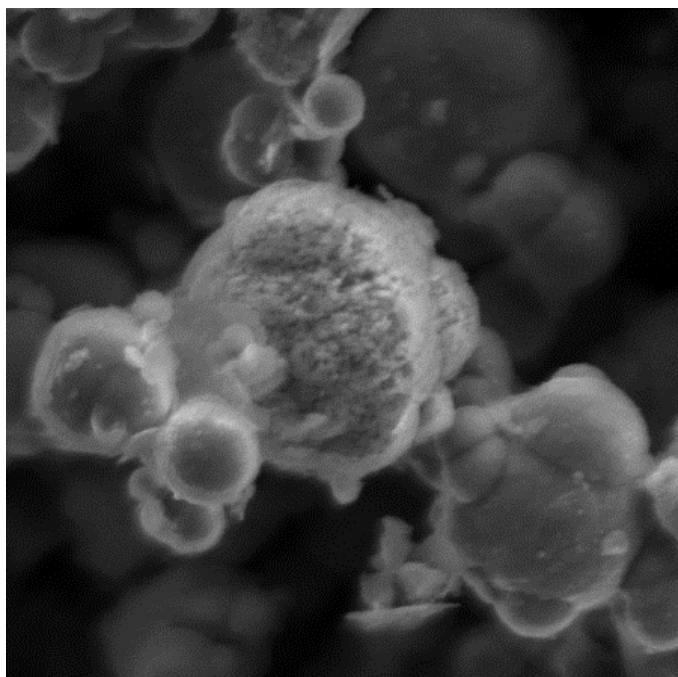
Morfologie vzorků byla zkoumána pomocí skenovací elektronové mikroskopie. Na obr. 6 jsou vidět částice neoxidovaného CI. Obr. 7 ukazuje částice CI vystavené účinkům HCl. Na první pohled je snímek dost podobný prvnímu (tvar i rozměry částic zůstaly zachovány), nicméně částice je jemně zvrásněná vlivem kyseliny. Obr. 8 zobrazuje částice CI oxidované v prostředí H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. Již na první pohled si lze všimnout výrazné vrstvy soli. Snímek je v souladu s nejnižšími hodnotami MR efektu (kapitoly 4.2.3 a 4.2.4) a také nejnižší hodnotou  $M_s$  (kapitola 4.2.1). Na posledním snímku (Obr. 9) jsou částice CI oxidované HNO<sub>3</sub>. Snímek může působit trochu sporně, vzhledem k velikosti vrstvy soli na povrchu částic. Nicméně hodnota magnetické saturace je v souladu s naměřenými reologickými daty, tím pádem konkrétní vrstva nehraje výraznou roli.



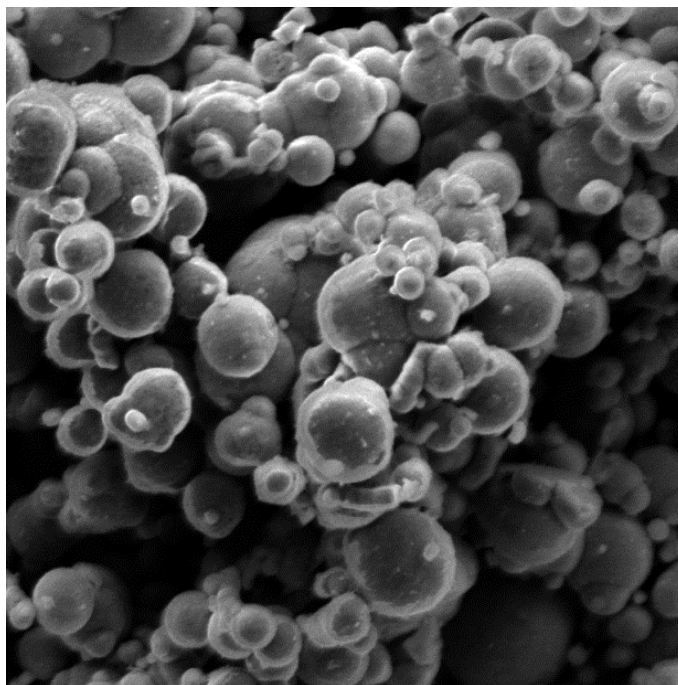
Obrázek 6: SEM snímek neoxidovaného CI.



Obrázek 7: SEM snímek Cl oxidovaného HCl



Obrázek 8: SEM snímek Cl zoxidovaného  $\text{H}_2\text{SO}_4$



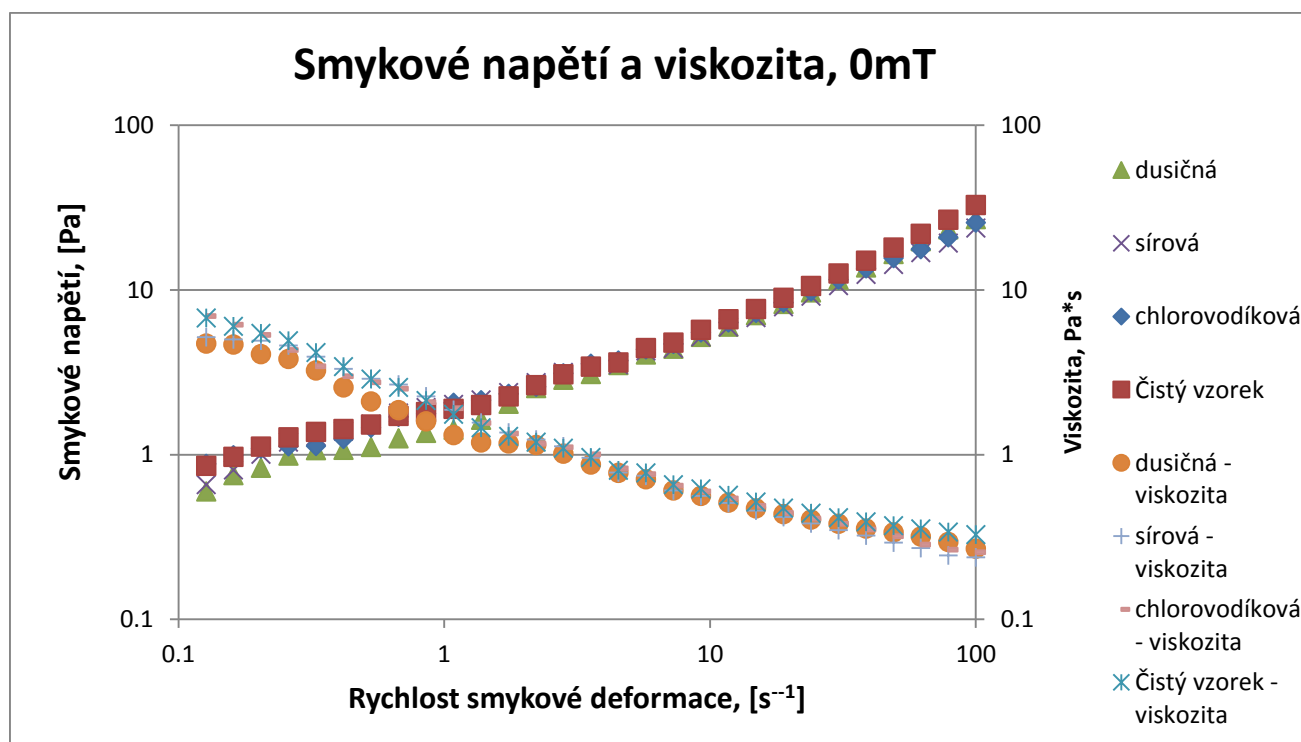
Obrázek 9: SEM snímek Cl oxidovaného  $\text{HNO}_3$

### 4.3.3 Reologické vlastnosti

Při měření reologických vlastností MR tekutin s částečně zoxidovanými částicemi karbonylového železa se dosáhlo očekávaných výsledků. U každého vzorku bylo pozorováno snížení smykového napětí, což znamená zhoršení MR efektu. Výsledky jednotlivých kyselin se lišily důsledkem rozdílu v jejich síle.

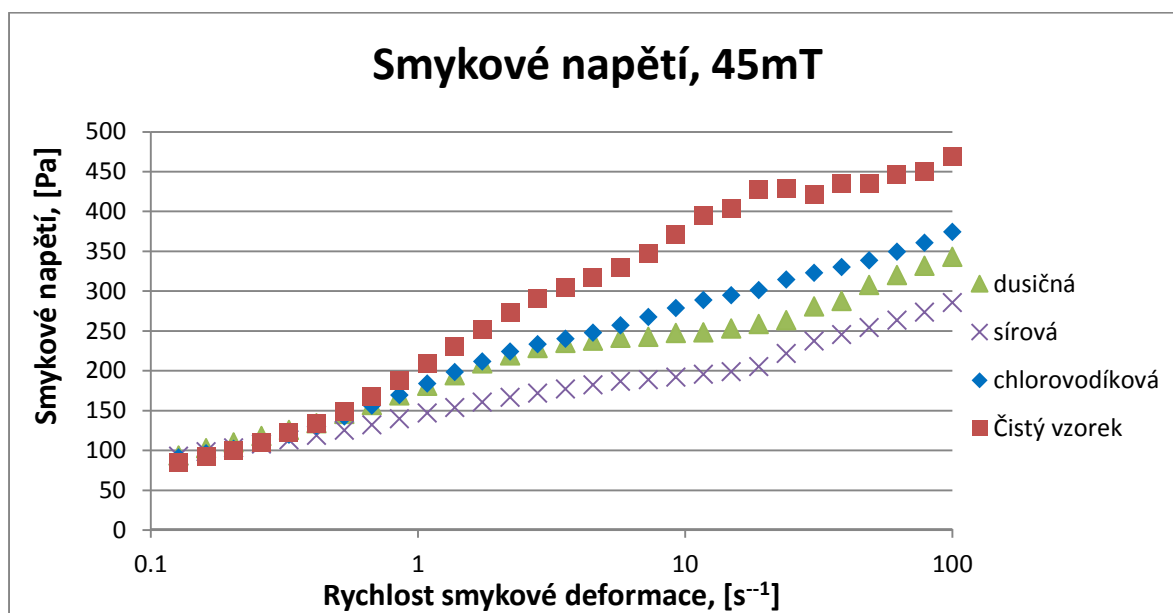
### 4.3.4 Ustálený smykový tok

Ze závislosti smykového napětí a viskozity na rychlosti smykové deformace při absenci vnějšího magnetického pole (Graf 4) vyplývá, že všechny MR suspenze v podstatě obsahovaly stejné koncentrace částic CI. Jemné rozdíly (převážně při nižších rychlostech smykové deformace) mohou být způsobené povrchovými změnami na částicích. V grafu je také možné pozorovat ne-Newtonské chování (snížování viskozity), které je typické pro MR suspenze při nízkých rychlostech smykové deformace a vyšších koncentracích částic [17].

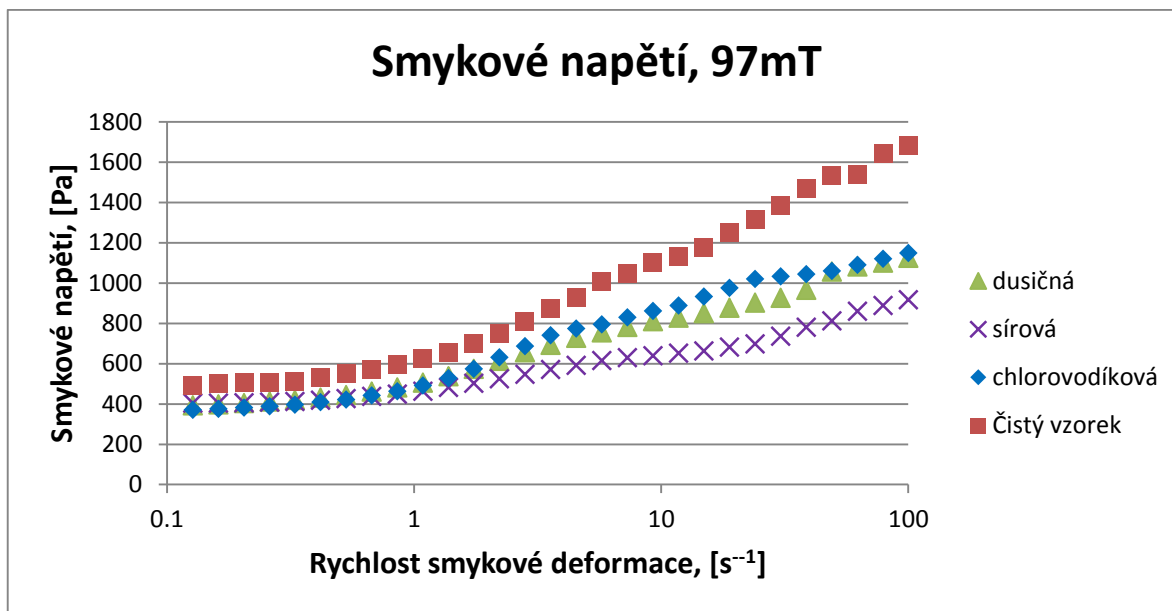


Graf 4: Graf závislosti smykového napětí, a viskozity, na rychlosti smykové deformace při absenci vnějšího magnetického pole. Viskozita se snižuje a smykové napětí se tím pádem nezvyšuje lineárně v důsledku vyšší koncentrace částic v suspenzi.

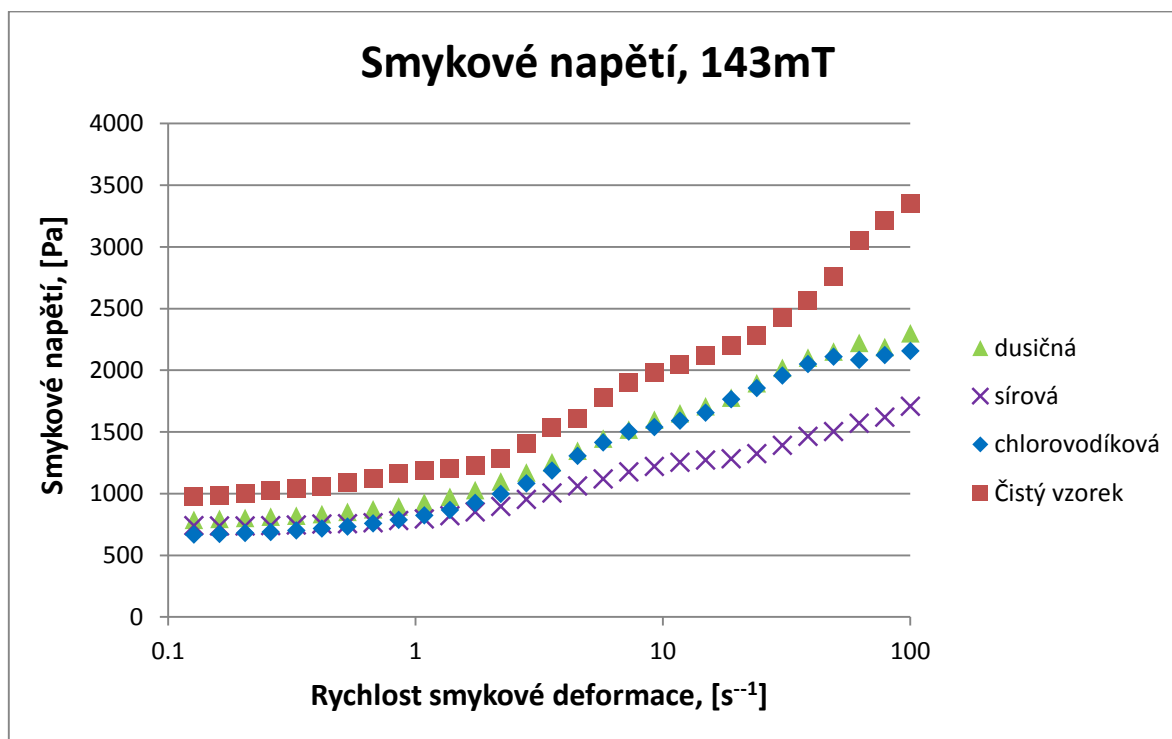
V přítomnosti vnějšího magnetického pole je možné ze získaných závislostí vypočítat nárůst smykového napětí až o 2 řády (Graf 5 – 7). Nejvýraznější pokles MR vlastností je u vzorků vystavených  $H_2SO_4$ . Kromě samotného zvýšení smykového tření je u všech vzorků vystavených vnějšímu magnetickému poli možné pozorovat prahové napětí. Odchytky od linearit v grafech mohou být způsobeny reorganizací řetězkových struktur z důvodu soupeření hydrodynamických a magnetostatických sil.



Graf 5: Graf závislosti smykového napětí na rychlosti smykové deformace při velikosti magnetické indukce 45 mT.



Graf 6: Graf závislosti smykového napětí na rychlosti smykové deformace při velikosti magnetické indukce 97 mT.



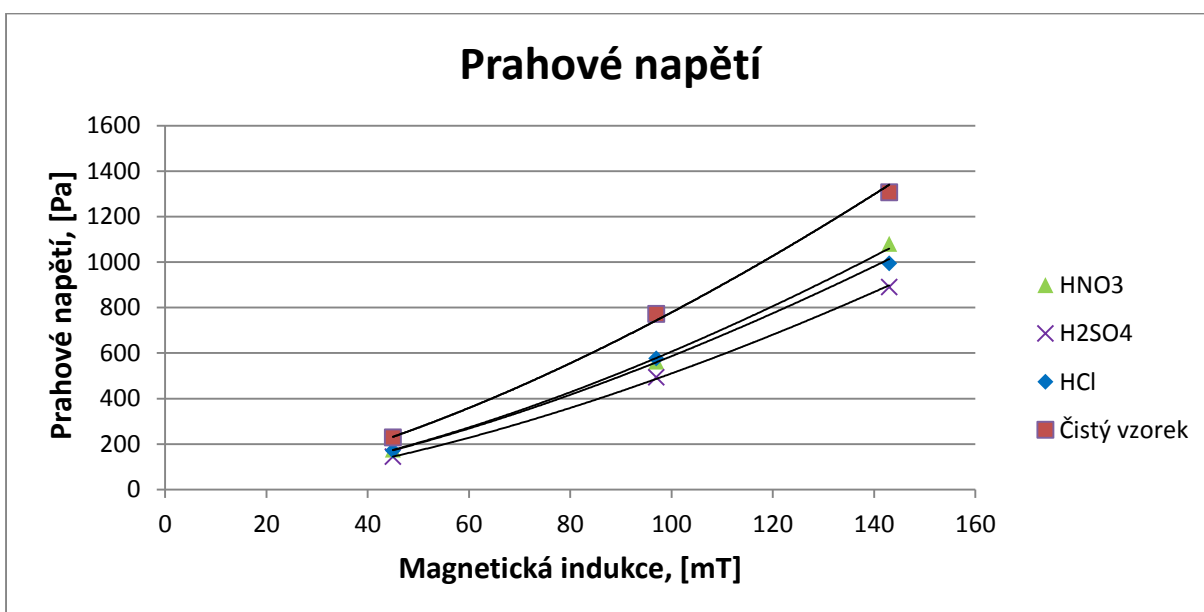
Graf 7: Graf závislosti smykového napětí na rychlosti smykové deformace při velikosti magnetické indukce 143 mT.

Pro kvantifikaci efektu kyselin na MR chování zkoumaných systémů bylo potřeba nalézt hodnoty prahového napětí pro jednotlivé vzorky. Bylo tak provedeno extrapolací rychlosti smykové deformace k nulové hodnotě. K extrapolaci byl použit Binghamův model pro plastické látky. Tabulka 2 uvádí hodnoty prahového napětí pro všechny vzorky stejně jako jejich procento z hodnoty neoxidovaného vzorku.

Tabulka 2: Hodnoty prahového napětí,  $\tau_0$ , při různých hodnotách magnetické indukce pro MR suspenze tvořené částicemi CI oxidovanými v různých typech kyselin včetně jejich %-tuální odchylky od hodnot získaných pro neoxidované částice CI.

	HNO <sub>3</sub>		H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>		HCl		Neoxidován	
45 mT	176 Pa	76,57%	144 Pa	64,28%	171 Pa	76,33%	229 Pa	
97 mT	562 Pa	72,80%	493 Pa	63,86%	576 Pa	74,61%	772 Pa	
143 mT	1080 Pa	82,66%	890 Pa	68,11%	994 Pa	76,06%	1307 Pa	

Z dat v Tabulce 2 vyplývá hned několik poznatků. Prvním je vliv H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, která svým působením snížila prahové napětí nejvíce ze všech kyselin. Trend je možné vysvětlit dvojsytností kyseliny: poskytuje 2x více protonů a tím zvyšuje rychlost oxidace. U všech vzorků platí, že  $\tau_0 \sim B^{3/2}$  (Graf 8).



Graf 8: Závislost prahového napětí na velikosti magnetické indukce.

### 4.3.5 Oscilační vlastnosti

#### 4.3.5.1 Deformační sweep

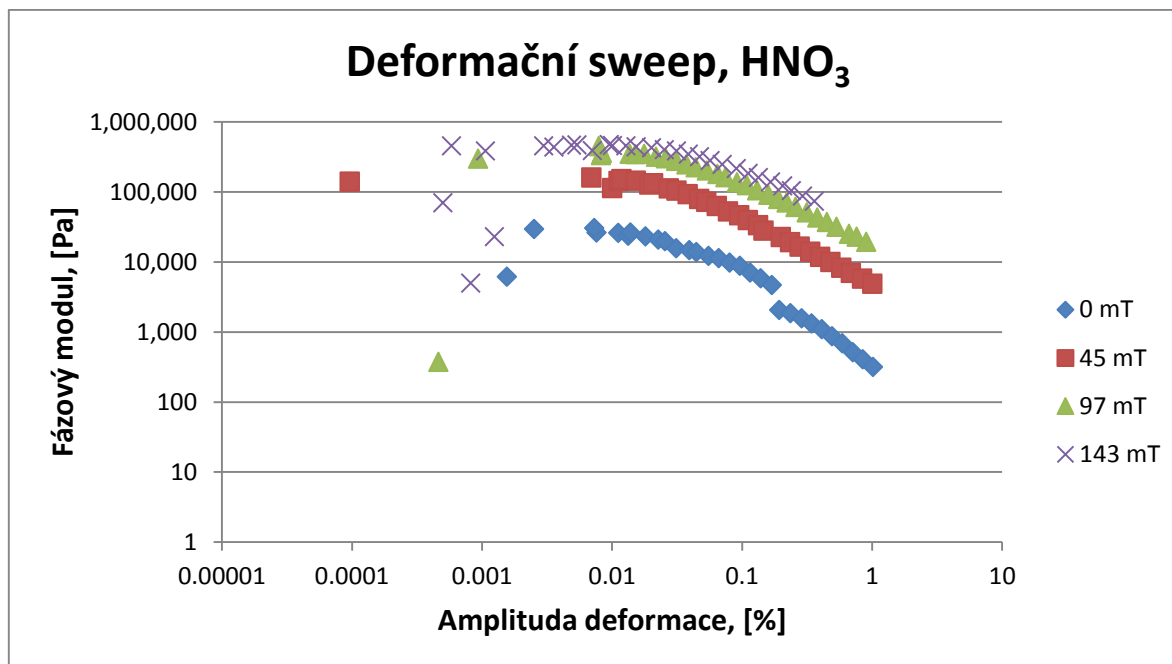
Jako další bylo provedeno měření viskoelastických vlastností suspenzí pomocí oscilačních měření. Znalost těchto vlastností je důležitá především pro reálná použití, neboť zde se setkáváme převážně se zařízeními pracujícím v oscilačním režimu. Testy v oscilačním režimu jsou dále vhodné pro charakteristiku dynamických struktur v MR suspenzích.

Nejprve byl proveden deformační sweep, při kterém byla zjištěna amplituda deformace v LVR. Jak již bylo zmíněno, v LVR nedochází k rozpadu řetězkových struktur, a tím pádem  $G'$  a  $G''$  jsou konstantní (nejsou závislé na úhlové rychlosti,  $\omega$ ). Se zvyšující se amplitudou deformace se vnitřní struktury začínají rozpadat a v závislosti viskoelastických modulů na amplitudě deformace lze pozorovat pokles těchto modulů. Během deformačního sweepu byly sledovány  $G'$  a  $G''$  při nulové intenzitě magnetického pole a následně při 0,5 A, 1 A 1,5 A proudu generujícím v cívice odpovídající hodnoty magnetického pole. Tabulka 3 uvádí hodnoty amplitudy deformace, které byly vybrány pro jednotlivé vzorky a intenzity magnetického pole pro následná měření. Hodnoty byly vybrány tak, že se v grafu našel bod na x-ové souřadnici, kolem kterého jsou oba moduly konstantní. V malých amplitudách deformace se občas vyskytují nepřesné body, které jsou způsobeny nedostatečným časovým intervalem pro měření bodu. Nicméně veškeré stanovené LVR se nenachází poblíž tak nízkých amplitud deformace, takže jimi nebyly ovlivněny výsledky.

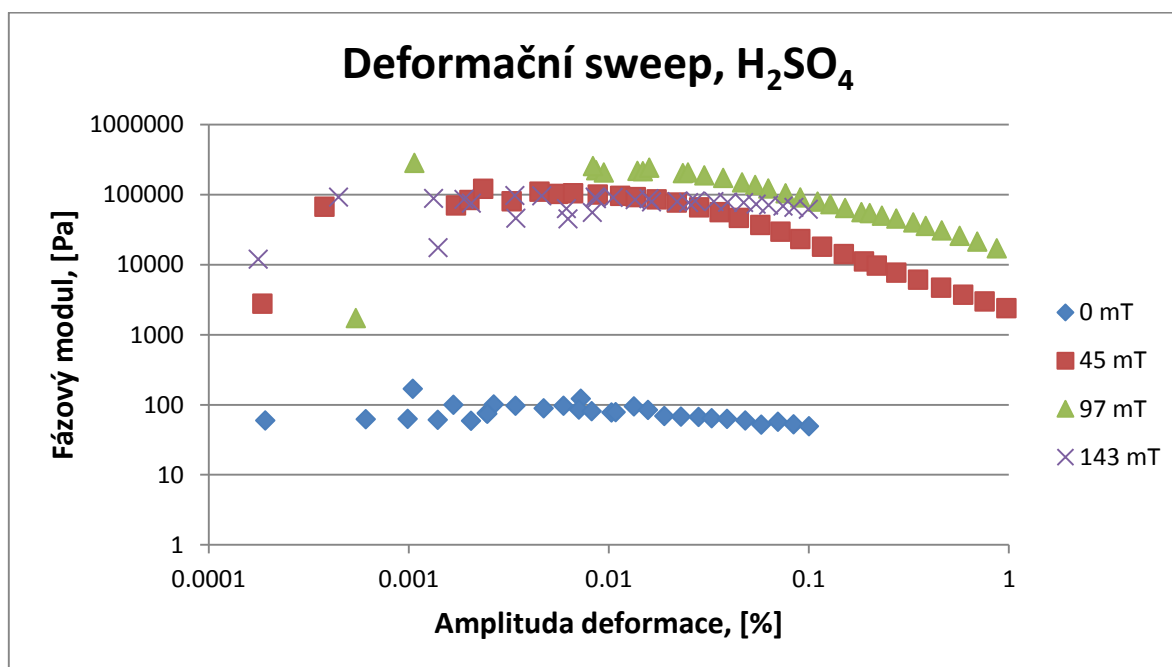
Tabulka 3: Hodnoty amplitud deformací [%] pro jednotlivé MR suspenze a dané hustoty magnetického pole

	HCl	Čistý vzorek	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	HNO <sub>3</sub>
0 mT	0,06	0,0045	0,048	0,018
45 mT	0,031	0,0013	0,037	0,09
97 mT	0,015	0,04	0,062	0,038
143 mT	0,058	0,058	0,09	0,056

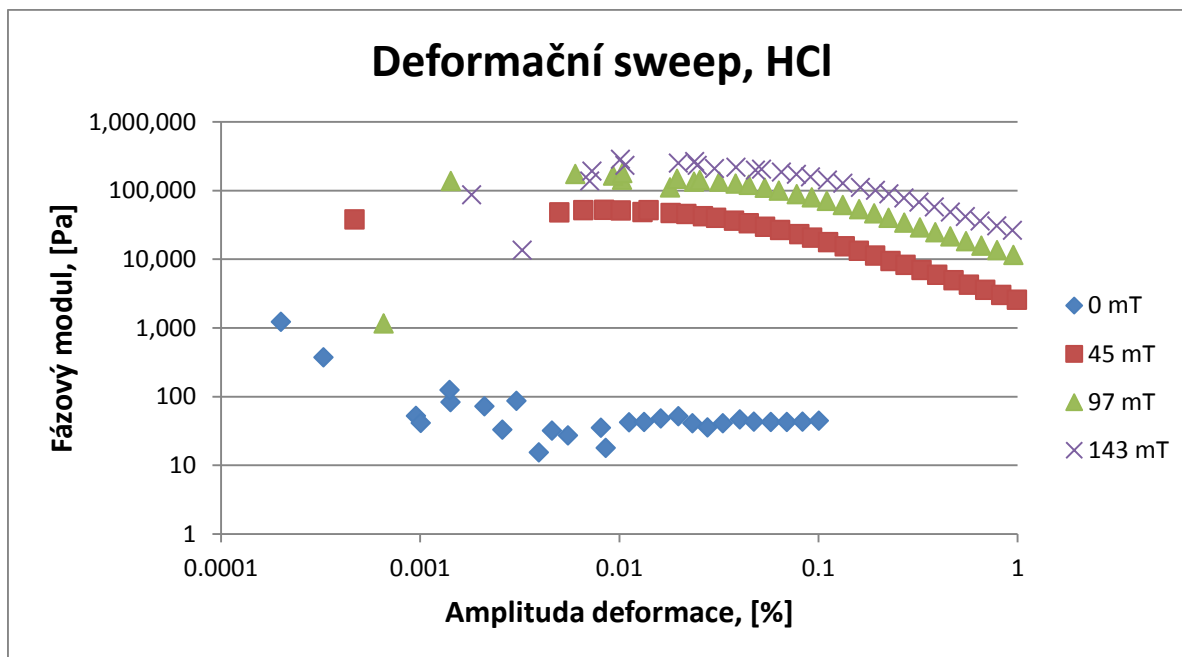




Graf 9: Závislost fázového modulu na amplitudě deformace pro vzorky vystavené účinkům  $\text{HNO}_3$ .



Graf 10: Závislost fázového modulu na amplitudě deformace pro vzorky vystavené účinkům  $\text{H}_2\text{SO}_4$ .

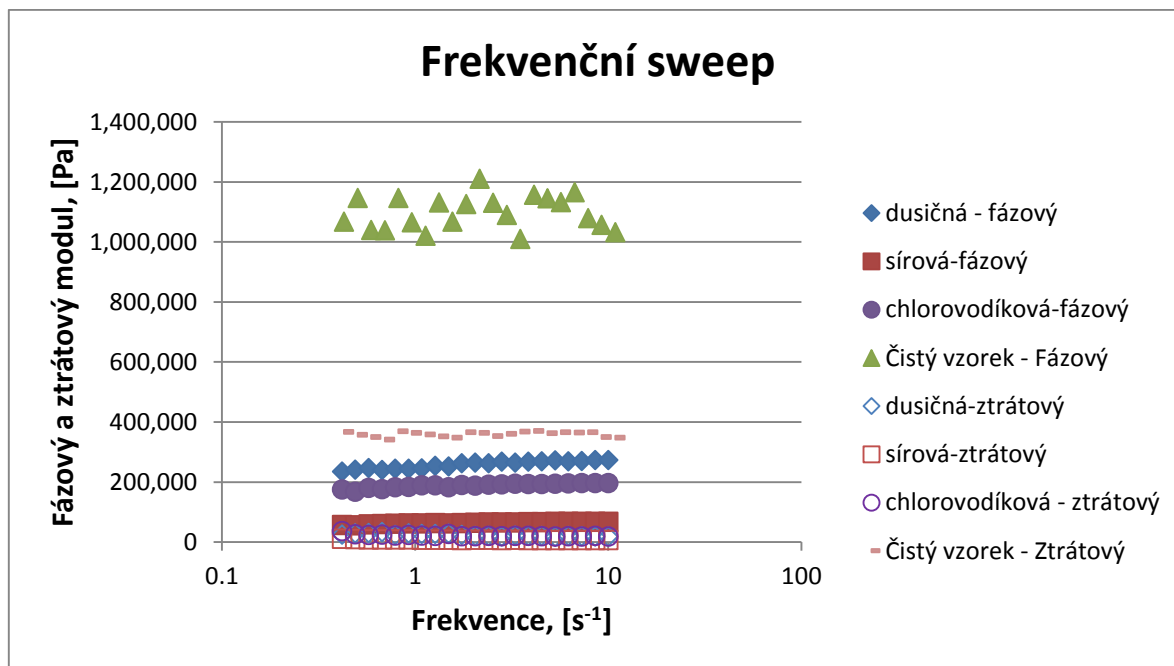


Graf 11: Závislost fázového modulu na amplitudě deformace pro vzorky vystavené účinkům HCl.

#### 4.3.5.2 Frekvenční sweep

Jako závěrečná sada experimentů byl proveden frekvenční sweep, kde byly měřeny hodnoty fázového  $G'$  a ztrátového  $G''$  modulu v závislosti na frekvenci. Pro experiment byly použity vybrané amplitudy z deformačního sweepu, aby byla zajištěna náležitost v LVR. Hodnota  $G''$  převládá při absenci magnetického pole, což znamená, že MR tekutina vykazuje vlastnosti suspenze. Naopak v přítomnosti pole je  $G'$  větší než  $G''$  a to až o několik řádů, právě kvůli tvorbě vnitřních struktur a zvýšení elasticity.

U všech vzorků vystavených kyselinám byl zaznamenán velký pokles  $G'$  v přítomnosti pole. Pozorované snížení je v souladu s poklesem magnetických saturací oxidovaných vzorků CI. V rámci jednotlivých kyselin došlo k nejvýraznějšímu poklesu u  $H_2SO_4$ , opět nejspíš z důvodu její dvojsytnosti, tj. poskytuje 2x více protonů než HCl, nebo  $HNO_3$ . Nejmenší vliv měla kyselina dusičná, kvůli její síle ( $K_{HA} = 28$ ). Snížení  $G''$  je důkazem vzniku struktur v suspenzi a snížení viskózních vlastností. U neoxidovaného vzorku jsou oproti ostatním vzorkům poměrně nevyrovnané hodnoty. Důvodem je nevhodný výběr amplitudy deformace, což znamená, že vzorek nebyl měřen v oblasti lineární deformace.



Graf 12: Graf závislosti fázového a ztrátového modulu na frekvenci pro všechny vzorky při velikosti magnetické indukce 143 mT.

## 5 Závěr

Cílem práce bylo zoxidovat částice CI pomocí HCl, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> a HNO<sub>3</sub> a určit vliv dané oxidace na jejich morfologii, magnetické a reologické vlastnosti a porovnat intenzitu vlivu s ohledem na typ použité kyseliny. Kyseliny byly vybrány z důvodu jejich častého výskytu v prostředí praktických aplikací MR systémů.

Výsledky všech měření ukazují, že největší vliv má H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, která může na rozdíl od zbývajících dvou kyselin poskytnout 2 protony na jednu molekulu kyseliny. To způsobuje dvě věci: první je zvýšení rychlosti oxidační reakce a druhou je množství zoxidovaného železa.

Obrázky ze SEM ukazují, že tloušťka vrstvy soli na železe nemusí mít v případě různých kyselin vliv na MR efekt, jak vyplývá z porovnání tloušťky vrstvy dusičnanu a chloridu s reologickými daty. Vzorek vystavený HNO<sub>3</sub> měl přibližně stejné tokové křivky, ale zato mnohem větší vrstvu soli.

Z hysterezních křivek poté vyplývá, že nejvýraznější vliv na MR efekt mají opravdu hodnoty magnetických saturací, neboť velmi dobře korelují s výsledky z MR měření.

V praxi je zatím téměř nevyhnutelná degradace MR tekutin, proto je důležitá znalost všech možných vlivů a velikosti jejich efektů. Výsledky práce budou použity k dalšímu výzkumu v oblasti inteligentních MR systémů, případně budou publikovány ve vědeckém časopise. V budoucnu by bylo možné zkoumat vliv kyselin na částice potažené vrstvami polymerů, nebo na částice s jiným tvarem.

## 6 Reference

1. VICENTE, J., KLINGENBERG, D. J., HIDALGO-ALVAREZ, R., et al. Magnetorheological fluids: a review. *Smart Mater. Struc.*, 2011, vol. 7, p. 3701–3710.
2. BARNES, H. A., HUTTO, J. F. *An introduction to rheology*. 1989. ISBN 0-444-87469-0.
3. BROŽ, J. *Moderní problémy feromagnetismu*. 1965.16.
4. SEDLAČÍK, M., PAVLÍNEK, V., VYROUBAL, R., PEER, P., FILIP, P., et al. Two-layer coating with polymer A dimorphic magnetorheological fluid with improved oxidation and chemical stability under oscillatory shear. *Smart Mater. struct.*, 2013, vol. 22,
5. FANG, F. F., CHOI, H. J., CHOI, W. S., et al. Two-layer coating with polymer and carbon nanotube on magnetic carbonyl iron particle and its magnetorheology effect. *Colloid Polym. Sci.*, 2010, vol. 288, no. 3, p. 259–363.
6. PO-WEN, Y., WANG, L. Y., SYANG-PENG, R., et al. Synthesis and magnetorheology study of iron oxide and iron cobalt oxide suspensions. *Journal of nanomaterials*, 2013, vol. 50,
7. SEDLAČÍK, M., PAVLÍNEK, V., SÁHA, P., et al. The role of particles annealing temperature on magnetorheological effect. *Mod. Phys. Lett. B*, 2012, vol. 26, no. 3,
8. 23. ZHANG, J. Q., ZHANG, J., JING, Q., et al. Effect of seven different additives on the properties of MR fluids. *Journal of Physics: Conference Series*, 2009, vol. 149,
9. MACOSKO, Ch. W. *Rheology, principles, measurements and applications*. 1994. ISBN 1-56081-579-5.
10. www.lord.com
11. Klingenberg, D. J. Magnetorheology: Applications and Challenges. *AIChE* 2001, 47, 246–249
12. LANDOLT, D. *Corrosion et chimie de surfaces des métaux*. 1st ed. 1997. ISBN 2-88074-245-5.
13. [https://science.madison.k12.wi.us/files/science/Material\\_on\\_Ozone%20.pdf](https://science.madison.k12.wi.us/files/science/Material_on_Ozone%20.pdf)
14. Park, B. J.; Fang, F. F.; Choi, H. J. Magnetorheology: materials and application. *Soft matter* 2010, 6, 5246—5253.



15. <http://en.wikipedia.org/wiki/MagneRide>
16. GOLINI, D., HSU, Y., et al. Magnetorheological Finishing-A Deterministic Process for Optics Manufacturing. *LLE Review*, 1998, vol. 63, p. 135–143.
17. ZHANG, X., LI, W., GONG, X. L., et al. Study on magnetorheological shear thickening fluid. *Smart Mater. Struc.*, 2008, vol. 17, p. 1–5.
18. TRUONGAND, D. Q., AHN, K. *MR Fluid Damper and Its Application to Force Sensorless Damping Control System. Recent Advances and Future Challenges*. 2012. ISBN 975-953-51-0798-9.



## 7 Seznam grafů a obrázků

Graf 1: Graf závislosti fázového modulu, $G'$ , na hustotě magnetického pole, $B$ . .....	13
Graf 2: Graf závislosti fázového, $G'$ , a ztrátového modulu, $G''$ , na amplitudě úhlové deformace. ....	13
Graf 3: Hysterezní křivky vzorků CI částic exponovaných účinkům různých druhů kyselin. ....	24
Graf 4: Graf závislosti smykového napětí, $\alpha$ viskozity, na rychlosti smykové deformace při absenci vnějšího magnetického pole. ....	28
Graf 5: Graf závislosti smykového napětí na rychlosti smykové deformace při velikosti magnetické indukce 45 mT. ....	29
Graf 6: Graf závislosti smykového napětí na rychlosti smykové deformace při velikosti magnetické indukce 97 mT. ....	30
Graf 7: Graf závislosti smykového napětí na rychlosti smykové deformace při velikosti magnetické indukce 143 mT. ....	30
Graf 8: Závislost prahového napětí na velikosti magnetické indukce. ....	31
Graf 9: Závislost fázového modulu na amplitudě deformace pro vzorky vystavené účinkům $\text{HNO}_3$ . .....	33
Graf 10: Závislost fázového modulu na amplitudě deformace pro vzorky vystavené účinkům $\text{H}_2\text{SO}_4$ . .....	33
Graf 11: Závislost fázového modulu na amplitudě deformace pro vzorky vystavené účinkům $\text{HCl}$ . ....	34
Graf 12: Graf závislosti fázového a ztrátového modulu na frekvenci pro všechny vzorky při velikosti magnetické indukce 143 mT. ....	35



---

Obrázek 1 Vliv vnějšího magnetického pole na strukturu MR suspenze. ....	9
Obrázek 2: Profil toku kapaliny mezi pohyblivou a nepohyblivou deskou. ....	11
Obrázek 3: Schéma MR tlumiče .....	19
Obrázek 4: Vibrační magnetometr. ....	21
Obrázek 5: Rotační viskozimetr Physica MCR501.....	23
Obrázek 6: SEM snímek neoxidovaného CI. ....	25
Obrázek 7: SEM snímek CI oxidovaného HCl .....	26
Obrázek 8: SEM snímek CI zoxidovaného H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> .....	26
Obrázek 9: SEM snímek CI oxidovaného HNO <sub>3</sub> .....	27





## 8 Seznam zkratek

$\tau$	smykové napětí
$\eta$	dynamická viskozita
$\gamma$	rychlost smykové deformace
$\tau_0$	prahové napětí
$G'$	Fázový modul
$G''$	Ztrátový modul
$f$	frekvence
MR	magnetoreologický
CI	karbonylové železo (carbonyl iron)
M	magnetizace
B	magnetická indukce

## 9 Posudek konzultanta

Student Jakub Smutek k řešení studie v rámci Středoškolské odborné činnosti přistoupil velmi zodpovědně. V rámci vypracování teoretické části využíval aktuální primární literární zdroje převážně ve formě časopisů a knih v anglickém jazyce, což se odráží ve velmi dobré odborné úrovni.

Při vypracování experimentální části prokázal student vysokou míru zručnosti při návrhu experimentů. Po absolvování nezbytných školení zahrnujících teorii a ovládnutí vědeckých zařízení využívaných v této studii pracoval zcela samostatně.

Závěrem mohu konstatovat, že student prokázal schopnost pracovat s odbornými texty v cizím jazyce a zároveň zručnost a pečlivost u prováděných experimentů stejně tak jako schopnost logicky analyzovat dosažené výsledky, čímž bezesporu splnil požadavky na daný typ práce. Za zmínku stojí také skutečnost, že problematika obsažená v popisované práci doposud nebyla v takovém rozsahu v oblasti magnetoreologických suspenzí studována a práce tedy přispěje k rozšíření znalostí v tomto oboru formou vědeckého článku v mezinárodním impaktovaném časopise s impakt faktorem.

Ing. Michal Sedláčik PhD.