

Magnetoreologická suspenze pro magnetoreologické leštění

Matěj Surma

Bakalářská práce
2023



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická
Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2022/2023

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	Matěj Surma
Osobní číslo:	T19742
Studijní program:	B3909 Procesní inženýrství
Studijní obor:	Technologická zařízení
Forma studia:	Prezenční
Téma práce:	Magnetoreologická suspenze pro magnetoreologické leštění

Zásady pro vypracování

1. Vypracování literární rešerše na zadané téma
2. Příprava magnetoreologické suspenze dle zadání
3. Charakterizace tokových vlastností připraveného systému při účincích vnějšího magnetického pole
4. Aplikace studované magnetoreologické suspenze v procesu magnetoreologického leštění
5. Vyhodnocení a diskuze získaných výsledků

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

Seznam doporučené literatury:

1. KORDONSKI, W.I., JACOBS, S.D. Magnetorheological Finishing. Int. J. Mod. Phys. B 1996, vol. 10, no. 23-24, p. 2837-2848.
2. Xu, J.J., Li, J.Y., Cao, J.G. Effects of fumed silica weight fraction on rheological properties of magnetorheological polishing fluids. Colloid Polym. Sci 2018, vol. 296, no. 7, p. 1145-1156.
3. PARK, B.J., FANG, F.F., CHOI, H.J. Magnetorheology: Materials and application. 2010, Soft Matter, vol. 6, no. 21, p. 5246-5253.

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Michal Sedláčik, Ph.D.**
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání bakalářské práce: **2. ledna 2023**
Termín odevzdání bakalářské práce: **19. května 2023**

prof. Ing. Roman Čermák, Ph.D. v.r.
děkan

L.S.

Ing. Martin Bednařík, Ph.D. v.r.
ředitel ústavu

Ve Zlíně dne 22. února 2023

PROHLÁŠENÍ AUTORA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že:

- bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému a dostupná k nahlédnutí;
- na moji 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;
- podle § 60 odst. 1 autorského zákona má Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užít své dílo – 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);
- pokud bylo k vypracování bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tj. k nekomerčnímu využití), nelze výsledky bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- pokud je výstupem 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.

Prohlašuji,

- že jsem na bakalářské práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- Že odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou obsahově totožné.

Ve Zlíně, dne:

Jméno a příjmení studenta: Matěj Surma

.....
podpis studenta

ABSTRAKT

Bakalářská práce je zaměřena na obeznámení se s magnetoreologickým efektem a jeho využití v oblasti magnetoreologického leštění. Cílem praktické části byla příprava magnetoreologické suspenze, charakterizace tokových vlastností naší suspenze, a její následné otestování v procesu leštění.

Klíčová slova: magnetoreologická suspenze, reologie, leštění

ABSTRACT

Bachelor thesis is focused on learning about magnetorheological effect and its usage in the area of magnetorheological polishing. Goal of the practical part was the preparation of magnetorheological suspension, characterization of the flow properties of the suspension and subsequent testing in the polishing process.

Keywords: magnetorheological suspension, rheology, polishing

Rád bych touto cestou poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce doc. Ing. Michalovi Sedláčkovi, Ph.D. za odborné rady, čas a vedení při psaní a kompletaci této práce. Také bych rád poděkoval rodině, za veškerou podporu během studia.

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

OBSAH

ÚVOD	9
I TEORETICKÁ ČÁST	10
1 REOLOGIE	11
1.1 NEWTONŮV ZÁKON VISKOZITY	11
1.2 NENEWTONSKÉ KAPALINY	12
1.2.1 Dilatantní kapaliny	13
1.2.2 Pseudoplastické kapaliny	13
1.2.3 Binghamské kapaliny	13
1.2.4 Látky tixotropní.....	14
1.2.5 Látky reopektické.....	14
2 MAGNETOREOLOGICKÝ EFEKT	15
2.1 MAGNETOREOLOGICKÝ EFEKT V PRAXI	15
2.2 FAKTORY MAGNETOREOLOGICKÉHO EFEKTU.....	16
2.2.1 Velikost a tvar částic	16
2.2.2 Intenzita vnějšího magnetického pole.....	16
2.2.3 Koncentrace částic	16
2.2.4 Typ a množství disperzního média	16
2.2.5 Teplota.....	16
2.2.6 Historie magnetického pole, čas expozice	17
3 MAGNETOREOLOGICKÁ SUSPENZE	18
3.1 SLOŽKY MAGNETOREOLOGICKÉ SUSPENZE	18
3.1.1 Dispergovaná látka – magnetické částice	18
3.1.2 Disperzní prostředí – nosná kapalina	19
3.1.3 Aditiva.....	19
3.2 PRACOVNÍ MÓDY MAGNETOREOLOGICKÉ SUSPENZE	20
3.2.1 Ventilový mód.....	20
3.2.2 Smykový mód	20
3.2.3 Tlakový mód	21
4 JAKOST POVRCHU	22
4.1 METODY MĚŘENÍ DRSNOSTI POVRCHU	22
5 TYPY A VYUŽITÍ POVRCHOVÝCH ÚPRAV	23
5.1 POVRCHOVÉ PŘEDÚPRAVY MATERIÁLU.....	23
5.1.1 Chemické předúpravy materiálu	23
5.1.2 Mechanické předúpravy materiálu.....	23
6 MAGNETOREOLOGICKÉ LEŠTĚNÍ POVRCHU	24
6.1 POSTUP MAGNETOREOLOGICKÉHO LEŠTĚNÍ.....	24
6.2 VÝHODY MAGNETOREOLOGICKÉHO LEŠTĚNÍ	24
7 SHRUTÍ TEORETICKÉ ČÁSTI	26

II PRAKTICKÁ ČÁST.....	27
8 CÍLE PRAKTICKÉ ČÁSTI PRÁCE	28
9 SLOŽENÍ MAGNETOREOLOGICKÉ PASTY	29
9.1 VZOREK PRO LEŠTĚNÍ.....	30
9.2 STUDIUM MAGNETOREOLOGICKÉ PASTY	30
9.3 PROCES MAGNETOREOLOGICKÉHO LEŠTĚNÍ.....	31
10 MAGNETOREOLOGICKÉ VLASTNOSTI	32
10.1 MAGNETICKÉ VLASTNOSTI.....	33
11 MAGNETOREOLOGICKÉ LEŠTĚNÍ.....	34
12 ZÁVĚR.....	36
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	37
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	40
SEZNAM OBRÁZKŮ	41
SEZNAM TABULEK.....	42

ÚVOD

Magnetoreologické suspenze řadíme do třídy inteligentních materiálů. Do třídy inteligentních materiálů obecně můžeme zařadit materiály, které jsou schopny reagovat na různé vnější podněty, jako je například vlhkost, teplota, elektrické pole a v našem případě hlavně magnetické pole. Reakcí materiálu potom může být změna skupenství, tvaru či velikosti. U inteligentních materiálů nenastává trvalá deformace, jejich schopnost vrátit se do původního stavu je velmi důležitým aspektem při jejich používání.

Magnetoreologické suspenze mají náhodně rozmístěné částice s magnetickými dipóly, kdy tyto částice jsou uspořádány do řetízkovitých struktur rovnoběžně ke vnějšímu statickému magnetickému poli. To znamená, že za pomoci homogenního magnetického pole můžeme měnit její skupenství mezi kapalným a pevným.

Samotnou suspenzi dělíme na 2 hlavní části, disperzní prostředí a dispergovanou látku.

Disperzním prostředím bývají velmi často různé druhy olejů a dispergovanou látkou jsou feromagnetické částice (velmi malé částice v řádech jednotek mikrometrů).

V praktické části se věnujeme právě přípravě magnetoreologické suspenze a jejímu použití u magnetoreologického leštění, které můžeme využít například v optice.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 REOLOGIE

Reologie je věda, která se zabývá tokem a deformací látek. Název reologie – anglicky rheology byl odvozen z řeckých slov rheo(tok) a logos(věda), tudíž doslovný překlad by byl věda o toku. Reologie se zabývá tokem kapalin, ale také deformací pevných látek, u kterých se dá říct, že taktéž tečou v průběhu času.

Za základní veličinu reologie můžeme považovat viskozitu – ta nám určuje odpor proti tečení. Samotnou viskozitu můžeme dělit podle způsobu měření na dynamickou a kinematickou nebo podle druhu vnějšího zatížení na smykovou a elongační. [1, 2]

Materiály můžeme dělit na viskózní, elastické a ty nejběžnější, viskoelastické. Viskózní materiály reagují na napětí jako píst, deformují se se zpožděním a nevratně. Elastické materiály jsou naopak schopny reagovat okamžitě a jejich deformace je dokonale vratná.

Nejběžnější materiály jsou potom viskoelastické, ty současně zastupují chování viskózních a elastických materiálů. [1]

Pokud chceme posuzovat deformační chování u materiálů, nejprve musíme rozhodnout, jestli materiál budeme brát jako tekutinu nebo pevnou látku. S tímto rozhodnutím nám pomůže Debořino číslo.

Debořino číslo značíme De

$$De = \lambda/\theta \quad (1)$$

λ – charakteristický čas materiálu (relaxační čas)

θ – čas procesu (doba pozorování)

Pokud chceme, aby se materiál jevil jako tekutina, $De \rightarrow 0$

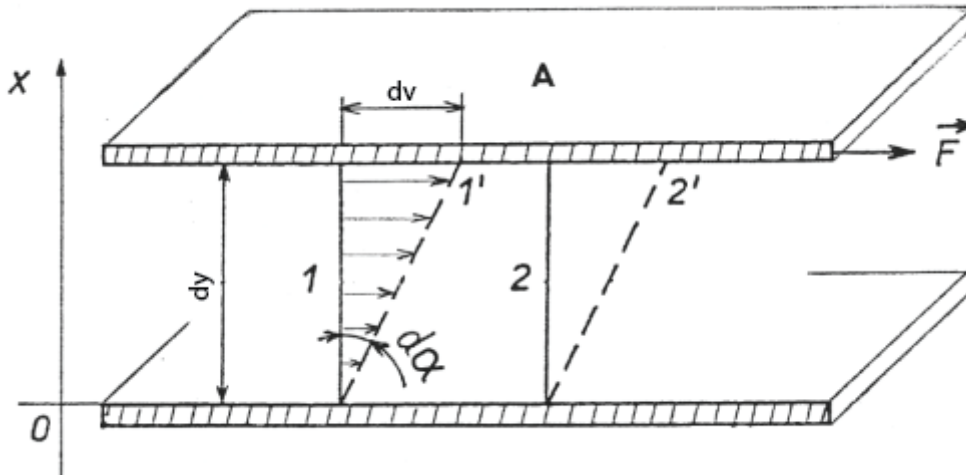
Naopak pokud chceme, aby se materiál jevil jako pevná látka $De \rightarrow \infty$ [3]

1.1 Newtonův zákon viskozity

Newtonův zákon viskozity nám stanovuje vztah mezi napětím a rychlostí deformace jako přímou úměru. Konstantou úměrnosti je dynamická viskozita, což je viskozita kapaliny vystavené smyku mezi dvěma rovnoběžnými deskami. [1]

$$\tau = \eta \cdot \frac{dv}{dy} = \eta \cdot j \quad (2)$$

Newtonův zákon nám vyjadřuje, že smykové napětí je úměrné dynamické viskozitě a gradientu rychlosti. Dynamická viskozita η nám vyjadřuje vnitřní tření newtonských kapalin a její hodnota je závislá na teplotě a tlaku, gradient rychlosti vyjadřuje tvarové změny v kapalinách.



Obrázek č.1 - Rychlostní profil toku v kapalině mezi nepohyblivou a pohybující se deskou.[5]

Kromě dynamické viskozity se můžeme setkat také s viskozitou kinematickou. Kinematickou viskozitu ν získáme podílem viskozity dynamické a hustoty tekutiny.

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad (3)$$

Kinematickou viskozitu je možné využít například u hydrodynamiky kapalin a v dalších dějích, které závisí na hodnotách hustoty a dynamické viskozity.

Kapaliny, které se řídí podle tohoto zákona nazýváme newtonské. Naopak kapaliny, pro které zákon neplatí jsou neneutronské. [4, 5]

1.2 Neneutronské kapaliny

Neneutronské kapaliny jsou kapaliny, ve kterých rychlost deformace není úměrná napětí. Viskozita těchto kapalin se může v průběhu času měnit, tudíž nemůžeme určit konstantní koeficient viskozity. Příkladem neneutronských kapalin mohou být roztoky, taveniny polymerů, suspenze nebo různé pasty.

Platí pro ně
$$\tau = \eta \cdot j \quad (4)$$

V tomto případě je η viskozita zdánlivá, která závisí na tečném napětí a rychlosti deformace.

Nenewtonské kapaliny můžeme dělit do několika základních skupin.

1.2.1 Dilatantní kapaliny

U těchto kapalin se zdánlivá viskozita zvyšuje se zvyšujícím se stresem (gradientem rychlosti). Dilatantní chování u kapalin se snažíme co nejvíce potlačit, je nežádoucí a vytváří komplikace u technologických procesů. K potlačení může dojít změnou složení kapaliny.

Typickým příkladem dilatantních kapalin jsou husté suspenze částic v kapalině.

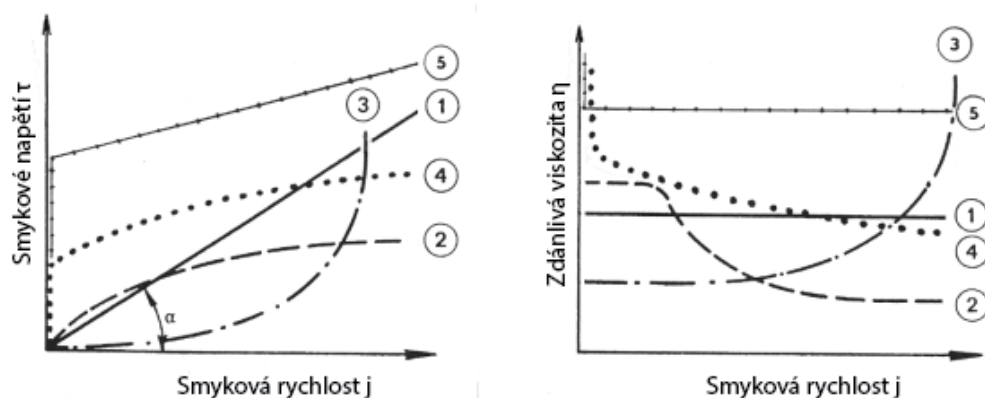
1.2.2 Pseudoplastické kapaliny

U pseudoplastických kapalin se zdánlivá viskozita snižuje se zvyšujícím se stresem (gradientem rychlosti). Pseudoplasticita je vítaným jevem, jelikož nám snižuje energetickou náročnost u technických procesů.

Pseudoplastické kapaliny jsou například taveniny polymerů a různé roztoky. Můžeme je rozdělit do dvou skupin. Právě pseudoplastické kapaliny a strukturně viskózní kapaliny.

1.2.3 Binghamské kapaliny

Jsou to kapaliny s plastickou složkou deformace. Aby došlo k toku, musí dojít k překročení prahového smykového napětí – meze kluzu τ_k .



Obrázek č.2 - Tokové a viskozitní charakteristiky nenewtonských kapalin.

- 1- Newtonská kapalina 2 -Strukturně středěná kapalina 3 - Dilatantní kapalina
4 - plastická kapalina 5 - Binghamská kapalina [5]

Dále máme kapaliny, které mají časově závislou složku deformace. Průběhy tokových křivek při zvyšování napětí a při snižování napětí jsou odlišné, tokové křivky jsou hysterézní.

1.2.4 Látky tixotropní

Jejich viskozita se snižuje s prodlužující se dobou působení napětí. Tohle chování je typické pro nátěrové hmoty – během delšího působení štětce se snadno roztírají a po skončení roztírání dále nestékají.

1.2.5 Látky reopektické

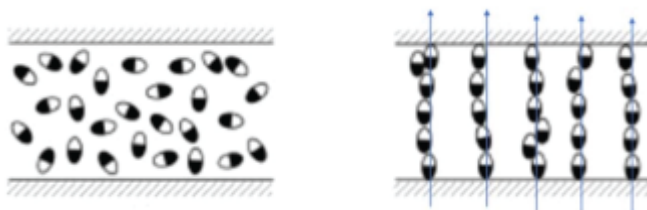
Naopak od látek tixotropních se jejich viskozita s prodlužující se dobou působení napětí zvyšuje. Tento jev není u látek běžný, můžeme se s ním setkat například u suspenzí bentonitu. [5, 6, 7]

2 MAGNETOREOLOGICKÝ EFEKT

Magnetoreologický efekt je velmi rychlý proces, který se odehrává v řádu milisekund. Může k němu docházet v magnetoreologických suspenzích. Ty obsahují částice s magnetickými vlastnostmi, které jsou ovlivnitelné magnetickým polem. Pokud na suspenzi žádné vnější magnetické pole nepůsobí, její částice se pohybují náhodně, dipólové momenty částic mají náhodnou orientaci.

Pokud je suspenze vystavena magnetickému poli, její částice začnou magnetizovat a v závislosti na intenzitě se uspořádají do rovnoběžných sloupců ve směru působení pole. Díky uspořádaným částicím dochází ke změně reologických vlastností suspenze. Reologické vlastnosti suspenze určují její chování pod vlivem vnějšího napětí nebo deformace.

Jakmile je magnetické pole odstraněno, částice se opět začínají náhodně pohybovat a vlastnosti suspenze se vrací do původního stavu. [11]



Obrázek č.3 - Volně se pohybující magnetické částice a uspořádané částice do řetězců po aktivaci magnetického pole [22]

2.1 MAGNETOREOLOGICKÝ EFEKT V PRAXI

Magnetoreologický efekt má v průmyslu mnoho možných využití.

Podstatné uplatnění je například ve výrobě tlumičů. Reologické tlumiče se používají v automobilovém průmyslu ale také ke tlumení kmitání a vibrací různých konstrukcí.

Magnetoreologické brzdy a spojky můžeme najít u automobilů ale také u letadel, vlaků a dalších dopravních prostředků. Mění se reologické vlastnosti suspenze umožňují velmi přesnou regulaci brzdného momentu. [12]

Další uplatnění je v robotice – přesné ovládání pohybů robota, dále se můžeme setkat s magnetoreologickými uzamykacími systémy, ty se používají v trezorech.

Magnetoreologický efekt je možné využít i pro leštění, které se využívá pro velmi přesné úpravy povrchu.

Nevýhodou při některých typech použití magnetoreologického efektu může být kratší životnost způsobená oxidací magnetických částic a jelikož jsou to poměrně nové technologie, musíme počítat s vyšší cenou. [8, 10]

2.2 FAKTORY MAGNETOREOLOGICKÉHO EFEKTU

Magnetoreologický efekt může být ovlivněn mnoho faktory, které ovlivňují reologické charakteristiky.

2.2.1 Velikost a tvar částic

Velikost a tvar magnetických částic uvnitř suspenze ovlivňují jejich magnetické vlastnosti a schopnost reagovat na vnější magnetické pole. Optimální velikost je v jednotkách mikrometrů. Zbytečně velké částice mohou zapříčinit rychlejší sedimentaci, naopak pokud bychom měli částice moc malé, bylo by složitější je zmagnetizovat. Z hlediska tvaru máme částice tyčové, deskové a kulové. Nejvhodnější jsou částice tyčové, kvůli vysokému magnetickému momentu a pevné struktuře.

2.2.2 Intenzita vnějšího magnetického pole

Má vliv na magnetizaci částic a jejich schopnost řetězovat se. Aby došlo k vytvoření řetězců musíme překonat kritickou hodnotu zvyšováním intenzity magnetického pole. Částice se shlukují ve směru siločar, čím silnější je magnetické pole, tím vyšší je prahové napětí. Kritická hodnota se liší podle složení suspenze.

2.2.3 Koncentrace částic

Koncentrace magnetických částic nám ovlivňuje počet částic, které se mohou stát součástí řetězce. Pokud by byla koncentrace nízká, vzniklé řetězce by nebyly dostatečně pevné, naopak u vysoké koncentrace by došlo k nežádoucímu nárůstu viskozity. Ideální hodnota koncentrace je v rozmezí 20-40 obj.%.

2.2.4 Typ a množství disperzního média

Disperzní médium ovlivňuje interakce mezi částicemi a magnetickým polem.

2.2.5 Teplota

Teplota ovlivňuje kinetickou energii částic, což znamená, že i jejich schopnost reagovat na magnetické pole. Pokud se teplota mění bez působení vnějšího magnetického pole, částice

jsou náchylnější k sedimentaci, jelikož u zahřáté kapaliny klesá viskozita. I malé výkyvy teplot mohou negativně ovlivnit magnetoreologický efekt, proto se doporučuje dodržovat teplotu na konstantní úrovni.

2.2.6 Historie magnetického pole, čas expozice

Historie nám ovlivňuje uspořádání částic uvnitř suspenze, čas expozice může ovlivnit velikost změny viskozity. [8, 9]

3 MAGNETOREOLOGICKÁ SUSPENZE

Magnetoreologické suspenze jsou druhem inteligentních materiálů, jejichž vlastnosti mohou být ovládány externím homogenním magnetickým polem. Jsou složeny ze dvou hlavních složek a těmi jsou feromagnetické částice a disperzní prostředí, ve kterém se samotné částice pohybují.

Disperzní prostředí je kapalina, nejčastěji jsou používány různé druhy olejů ale například také i samotná voda.

Dispergovanou látkou jsou feromagnetické částice velmi malých rozměrů (řádově v jednotkách mikrometru). Mohou být různých tvarů, nejčastěji však používáme kulovité částice.

Magnetoreologické suspenze byly poprvé zkoumány ve 40. letech 20. století v USA, kde je objevil a začal se nimi zabývat vědec John Rabinow. Nejvýznamnější vlastností byla již od začátku možná změna skupenství těchto látek. Více se nimi začali zabývat vědci až v 21. století, díky jejich vysokému potenciálu pro využití nejen v průmyslu. Mezi její vynikající a žádané vlastnosti patří rychlá odezva a ovladatelnost. Budoucí vývoj by měl zahrnovat zvýšení životnosti těchto systémů a vývoj kapalin s vyššími režimy smykového napětí. [9,10]

3.1 SLOŽKY MAGNETOREOLOGICKÉ SUSPENZE

Magnetoreologické suspenze můžeme rozdělit na 3 hlavní složky, těmi jsou disperzní prostředí, dispergovaná látka a aditiva.

3.1.1 Dispergovaná látka – magnetické částice

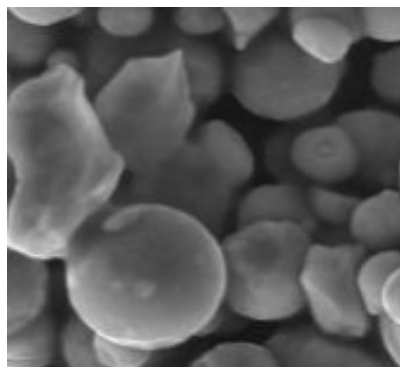
Jsou to částice náhodně pohybující se v nosné kapalině, kdy právě tyto částice zapříčiňují reakci suspenze na působení magnetického pole. Běžně se můžeme setkat s částicemi z feromagnetických materiálů jako je železo, kobalt, nikl a jejich slitiny. Běžně tvoří 20-40 % objemu suspenze.

Magnetické částice musejí mít vhodnou reakci na působení magnetického pole a zároveň nízkou remanentní magnetizaci – částici po působení magnetického pole zůstane určitá část magnetizace, pro správnou funkčnost nesmí být vysoká.

Dále u částic řešíme chemickou stabilitu částic, která nám ovlivňuje reaktivnost na námi zvolená aditiva a případnou oxidaci systému. [9, 10, 13]

Běžně se setkáváme s částicemi ze železa, karbidu železa, karbonylu železa, kobaltu, niklu a jejich slitin. Nejčastěji jsou kulovitého tvaru o velikosti v řádech jednotek mikrometru.

U částic z těchto materiálů se setkáváme také s řadou problémů jako jsou nízká oxidační a sedimentační stabilita, kdy tyto problémy by v budoucnu mohly vyřešit částice s kompozitní strukturou. [13]



Obrázek č.4 - Částice práškového železa [13]

3.1.2 Disperzní prostředí – nosná kapalina

Disperzní prostředí plní funkci nosiče pro dispergované částice. Kapalina musí splňovat určité reologické vlastnosti. Pro nejvyšší účinek magnetoreologického efektu musí mít nosná kapalina nízkou viskozitu, důležitou roli hraje také teplotní a chemická stabilita kapaliny.

Jako nosné kapaliny používáme různé druhy olejů (silikonové, uhlovodíkové, minerální), jako disperzní prostředí může sloužit také voda. Přidáním dispergovaných částic zvyšujeme viskozitu nosné kapaliny závisle na koncentraci částic.

Částice a nosná kapalina mají rozdílné hodnoty hustoty, tudíž můžeme počítat s klesáním částic ke dnu – sedimentací. Se sedimentací a dalšími nevyžádanými jevy nám může pomoci přidání aditiv do suspenze. [10]

3.1.3 Aditiva

Aditiva přidáváme do suspenze za účelem vylepšení vlastností či potlačení nežádoucích jevů. V oblasti magnetoreologických suspenzí máme antioxidanty, detergenty a diverzanty.

Pokud chceme snížit chemickou degradaci kapaliny a tím prodloužit její životnost, zvolíme antioxidanty. Antioxidanty nám pomáhají s likvidací oxidačních činidel a tím potlačují vznik chemických sloučenin, které by mohly zapříčinit degradaci kapaliny.

Disperzanty snižují přitažlivost mezi částicemi a tím nám pomáhají k rovnoměrnému rozprostření částic do objemu nosné kapaliny. Tím se zvyšuje stabilita disperze a snižuje seskupování částic.

Aby nedocházelo k usazování nečistot v suspenzi, používáme detergenty. Detergenty jsou chemické látky, které se používají k čištění povrchů. Skládají se ze dvou částí – hydrofilní část se váže na vodu a lipofilní část se váže na různé druhy nečistot, a díky tomu jsou schopny účinně rozpustit vzniklé nečistoty a zabránit vzniku dalších nečistot. [10, 14]

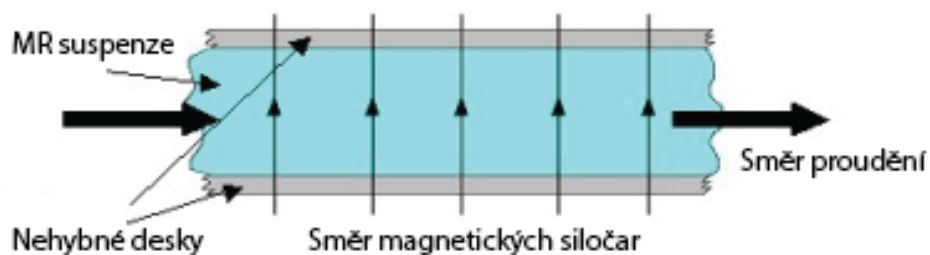
3.2 PRACOVNÍ MÓDY MAGNETOREOLOGICKÉ SUSPENZE

Magnetoreologická suspenze může pracovat ve třech rozdílných módech, které se používají v různých případech v závislosti na průtoku kapaliny a reologickém stresu.

3.2.1 Ventilový mód

Kapalina proudí mezi dvěma nehybnými deskami (póly) ve směru kolmém k magnetickým siločarám. Změnou magnetického pole mezi póly je řízen odpor proudění kapaliny.

Uplatnění ventilového módu najdeme zejména u tlumičů a ventilů. [10, 15]

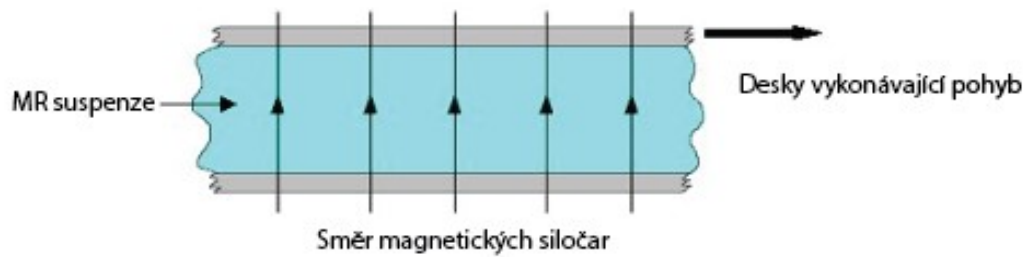


Obrázek č.5 - Znáznornění ventilového módu [23]

3.2.2 Smykový mód

Kapalina je v klidu mezi dvěma deskami (póly), zatímco desky vykonávají vzájemný translační nebo rotační pohyb v kolmém směru k magnetickým siločarám.

Uplatnění smykového módu najdeme u spojek a brzd. [10, 15]

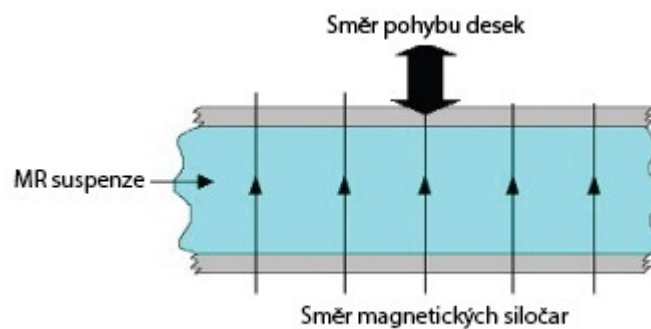


Obrázek č.6 - Znázornění smykového módu [23]

3.2.3 Tlakový mód

Kapalina je v klidu mezi dvěma pohybujícími se deskami (póly). Póly vykonávají pohyb rovnoběžný s magnetickými siločarami. Pomocí magnetického pole můžeme měnit odporovou sílu.

Uplatnění tlakového módu najdeme například v automobilovém průmyslu. [10, 15]



Obrázek č.7 - Znázornění tlakového módu [23]

4 JAKOST POVRCHU

Jakost povrchu popisuje různé charakteristiky povrchu materiálu, jako například tvar, drsnost či odrazivost. Kvalita povrchu je velmi často důležitá, proto máme mnoho metod měření.

Nejznámějším měřidlem jakosti povrchu jsou mikroskopy, dále máme například profilometry a interferometry.

Nevyhovující kvalitu povrchu můžeme dále upravovat pomocí mnoha procesů, jako je leštění, broušení, frézování nebo povlakování. [16, 17]

4.1 METODY MĚŘENÍ DRSNOSTI POVRCHU

Drsnost povrchu jsou části tvarových odchylek od skutečného povrchu. Metody měření můžeme rozdělit na kvalitativní a kvantitativní.

Kvalitativní měření už je poměrně zastaralé a funguje na principu porovnávání povrchu s povrchem etalonu. Porovnává samotný člověk pomocí zraku či hmatu.

U měření kvantitativního také porovnáváme povrch s povrchem etalonu, v tomto případě za pomoci komparačních měřidel. Výsledkem měření je soubor odchylek od nulové hodnoty komparátoru. [18]

5 TYPY A VYUŽITÍ POVRCHOVÝCH ÚPRAV

Povrchové úpravy nám udávají jakost konečného výrobku. Pokud potřebujeme dosáhnout určitého stupně jakosti, tak využijeme právě různých povrchových úprav, které nám dovolí získat námi požadované vlastnosti materiálu – mechanické, chemické i estetické.

Kromě vlivu na funkčnost a vzhled výrobku pomáhá i k ochraně vůči vnějším vlivům. Povrchové úpravy mohou být provedeny odběrem materiálu nebo nanesením povlakové vrstvy.

5.1 POVRCHOVÉ PŘEDÚPRAVY MATERIÁLU

Před aplikací povlaků musí být materiál řádně vyčištěn od veškerých nečistot, k tomu nám slouží chemické a mechanické předúpravy materiálu. [19]

5.1.1 Chemické předúpravy materiálu

Hlavním cílem chemických předúprav je odstranění vlastních i cizích nečistot materiálu chemickým narušením jejich vazby.

Nejznámější chemickou předúpravou je odmašťování, které slouží k odstranění jakékoliv mastnoty z povrchu materiálu, dále máme moření, které slouží k odstranění oxidů.

Odrezování slouží k odstranění rzi ze zkorodovaných povrchů. [19]

5.1.2 Mechanické předúpravy materiálu

Hlavním cílem mechanických předúprav je odstranění vlastních i cizích nečistot materiálu mechanickým narušením jejich vazby.

Tryskání – pískování je nejrozšířenější metoda pro odstraňování starých laků, rzi a dalších nečistot povrchu. Tryskání probíhá pomocí tryskacího prostředku, jeho částice mohou být kulaté nebo hranaté. [20]

Omílání je metoda pro tvorbu lesklých povrchů.

Broušení, leštění, kartáčování jsou nejčastější metody mechanických předúprav. Lze je provádět ručně nebo na strojích. Jako první materiál brousíme a tím odstraňujeme nerovnosti povrchu, po broušení je na řadě leštění, pro lepší drsnost a lesk povrchu.

Kartáčování je nejméně účinné a nelze dosáhnout 100% čistoty povrchu. [19]

6 MAGNETOREOLOGICKÉ LEŠTĚNÍ POVRCHU

Leštění je mechanická dokončovací úprava povrchu, při které získáváme dokonalý vzhled materiálu. Leštění může být ruční i strojní. Strojní leštění probíhá pomocí hadrového kotouče upnutého na brusku, pro leštění používáme leštící pasty. [19]

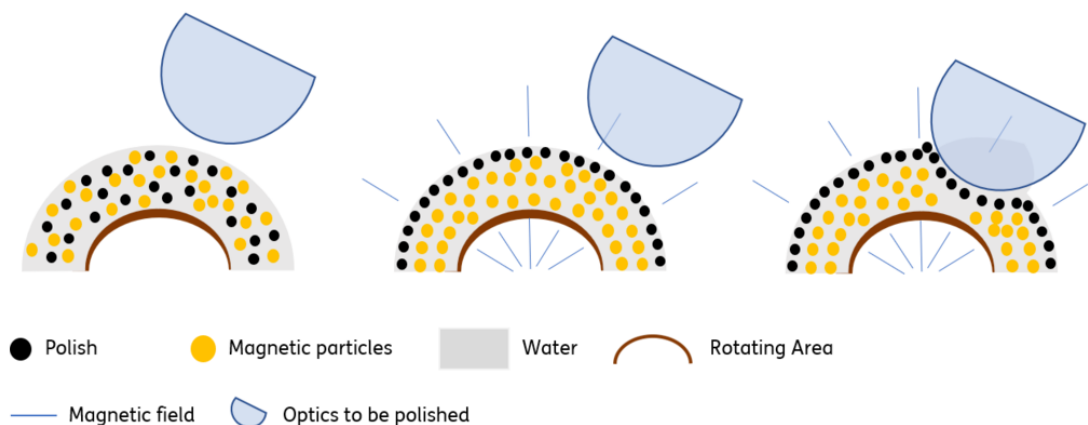
Magnetoreologické leštění povrchu nám umožňuje získat nejnižší hodnoty drsnosti povrchu (v řádech nanometrů).

6.1 POSTUP MAGNETOREOLOGICKÉHO LEŠTĚNÍ

Pro leštění potřebujeme magnetoreologickou pastu, ta se skládá z disperzního prostředí, dispergovaných částic magnetických a abrazivních, a aditiv. Suspenze je pomocí trysky přiváděna na rotující kolo, pod kterým je magnet, díky němuž jsme schopni generovat magnetické pole pro ovlivňování vlastností naší magnetoreologické pasty. [10]

Během toho, co působí magnetické pole se nám mění viskozita suspenze, dispergované částice se uspořádají do struktury objímající rotující kolo. Na povrchu se nám tvoří tenká leštící vrstva, do které se bude ponořovat upnutý obrobek.

Výsledkem magnetoreologického leštění jsou velmi nízké hodnoty drsnosti, metoda je přesná a účinná. [21]



Obrázek č.8 - Postup magnetoreologického leštění optiky [21]

6.2 VÝHODY MAGNETOREOLOGICKÉHO LEŠTĚNÍ

Magnetoreologické leštění je velmi přesný proces, tudíž největší výhodou je přesnost v řádech nanometrů. Tuhle přesnost jsme schopni udržovat konzistentně. Díky těmto kvalitám je proces vhodný pro dokončovací práce v oblasti optiky, elektroniky nebo v letectví. Zároveň je možné leštit mnoho různých materiálů jako jsou kovy, sklo a keramika.

Proces je zároveň poměrně rychlý, lze plně zautomatizovat a k dosažení velmi přesných výsledků mu stačí jednotky minut, to znamená, že je efektivní volbou pro objemnější produkce. [21, 22]

7 SHRNUÍ TEORETICKÉ ČÁSTI

Jako první byly v teoretické části diskutovány samotné základy reologie. Materiály byly rozděleny na elastické, viskózní a viskoelastické. Kapaliny na newtonské a neneutonské.

Druhá část byla zaměřena na magnetoreologický efekt, možnosti jeho využití a popsala faktory, které mohou ovlivňovat jeho reologické charakteristiky.

Třetí část se zaměřuje na magnetoreologickou suspenzi, vysvětluje, jak funguje a popisuje z čeho je a může být složena. Dále rozebírá pracovní módy suspenze a jejich využití.

Čtvrtá část nám nabízí stručné vysvětlení jakosti povrchu a náhled do metod používaných pro měření povrchů.

Pátá část se zaměřuje na druhy předúprav materiálu a vysvětluje k čemu slouží úpravy povrchu materiálu.

Část šestá popisuje proces magnetoreologického leštění povrchu, oblast využití a vysvětluje výhody tohoto typu leštění.

II. PRAKTICKÁ ČÁST

8 CÍLE PRAKTICKÉ ČÁSTI PRÁCE

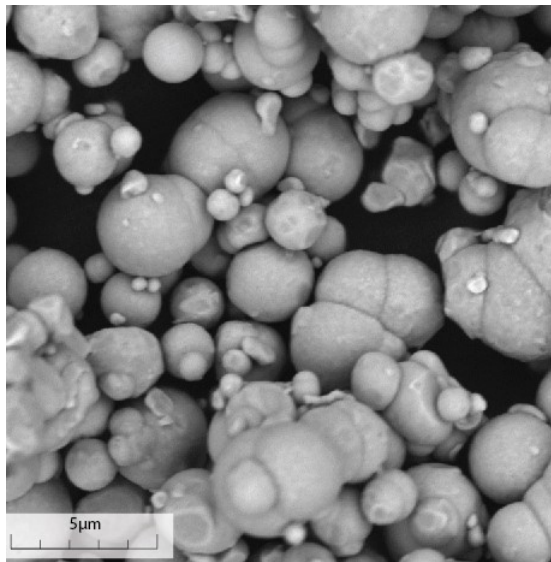
V praktické části byla hlavním úkolem příprava magnetoreologické pasty, která byla následně použita při procesu leštění na vzorcích vstříkovaného polyamidu. Proces vypracování lze rozdělit do několika bodů.

- Příprava magnetoreologické pasty
- Charakterizace tokových vlastností systému při účincích vnějšího magnetického pole
- Aplikace magnetoreologické pasty v procesu leštění
- Vyhodnocení získaných výsledků

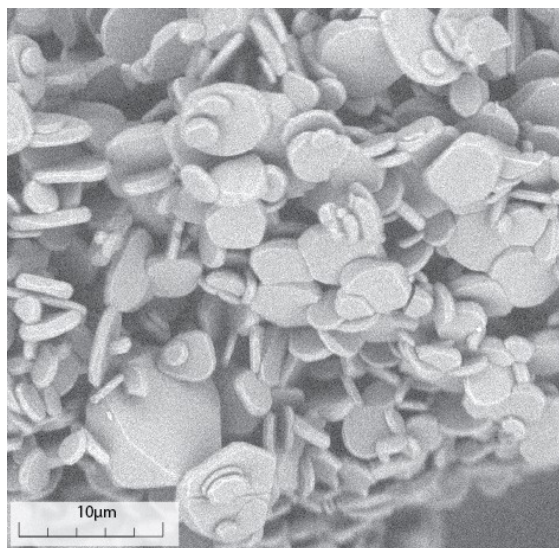
9 SLOŽENÍ MAGNETOREOLOGICKÉ PASTY

Jednou z hlavních složek suspenze je nosná kapalina. Jako nosnou kapalinu jsme zvolili Ferrofluid (společnost Unimagnet s.r.o., Česká republika). Dispergovanými částicemi byly částice železa (BASF CN-grade, Německo) a abrazivní částice z oxidu hlinitého - Al_2O_3 (společnost KeramikCZ s.r.o., Česká republika)

Pokud porovnáme obrázek č. 9 a obrázek č. 10, můžeme pozorovat, že každé z plniv má odlišnou morfologii. Částice železa mají kulovitý tvar o průměru od 0,5 do 5 μm , abrazivní plnivo je ve tvaru destiček o šířce několika mikrometrů a tloušťce přibližně 1 μm . Každá složka zabírá určité obj.% pasty, koncentrace jednotlivých složek lze najít v tabulce č.1.



Obrázek č. 9 - Částice železa pod mikroskopem SEM



Obrázek č. 10 - Částice Al_2O_3 pod mikroskopem SEM

Tabulka č.1 - Koncentrace jednotlivých složek pasty

Složka	Koncentrace (obj. %)	Funkce
železné částice	60	magnetická část
nosná kapalina	30	kapalný charakter pasty
Al_2O_3	10	abrazivní částice

9.1 VZOREK PRO LEŠTĚNÍ

Vzorek pro leštění byl vybrán z materiálu PA-6. Před zpracováním byl nejprve sušen při teplotě 80 °C po dobu 12 hodin. Po sušení byly připraveny vzorky o rozměrech 20x20x2 mm pomocí vstřikovacího lisu Arburg Allrounder 470E Golden Electric s teplotou trysky 245 °C, tlakem 1200 bar a dobou chlazení 30 sekund.

Před procesem leštění byly vzorky odlity do termosetové pryskyřice pro uchycení do leštícího zařízení.

9.2 STUDIUM MAGNETOREOLOGICKÉ PASTY

Pro pozorování velikosti a morfologie částic suspenze byl použit skenovací elektronový mikroskop (SEM) Nova NanoSEM 450 (FEI, USA).

Magnetické vlastnosti pasty byly stanoveny měřením magnetizační křivky pomocí vibračního magnetometru (LakeShore, USA). Magnetoreologické vlastnosti byly měřeny za stálé teploty 25 °C pomocí rotačního reometru Physica MCR502 (Anton Paar GmbH, Rakousko) vybaveného magnetickou celou Physica MRD 180/1T (Obr. 11).

*Obrázek č.11 – Rotační reometr Anton Paar*

Stabilitu teploty jsme kontrolovali pomocí cirkulátoru Viscotherm VT2 (Anton Paar GmbH, Rakousko). Rozsah smykových rychlostí byl vybírán tak, aby obsahoval nízké i vysoké rychlosti. Nízké pro stanovení dynamického prahového napětí a vysoké odpovídající smykovým rychlostem při procesu leštění.

9.3 PROCES MAGNETOREOLOGICKÉHO LEŠTĚNÍ

Proces leštění byl proveden pomocí zařízení pro leštění nekovových materiálů [24]. Plynulost a rychlost leštění nám určují dva servomotory, velikost mezery mezi materiálem a trvalým magnetem nastavujeme pomocí pohyblivého mechanismu. Mezeru lze nastavit v rozmezí 0–160 mm s přesností 0,1 mm. V tomto zařízení je možné leštit povrchy o maximální velikosti 40x40 mm.

Před měřením povrchu byla vyznačena plocha měření na samotném vzorku, tím byla zajištěna opakovatelnost měření. Po prvním měření hloubky řezu a hrubosti povrchu byl vzorek upevněn do leštícího zařízení, kde došlo k aplikaci navrhnuté magnetoreologické pasty. Objem pasty se lišil na základě velikosti mezery mezi permanentním magnetem a vzorkem. Pro testované mezery (0,5; 1,0; 1,5) bylo použito 0,12–0,36 ml pasty.

Proces leštění trval po dobu 5 minut při 15 otáčkách za sekundu s intenzitou magnetického pole 460–384 kA m^{-1} .

Vzorek byl hodnocen pomocí optického 3D skeneru (Zygo NewView 8000).

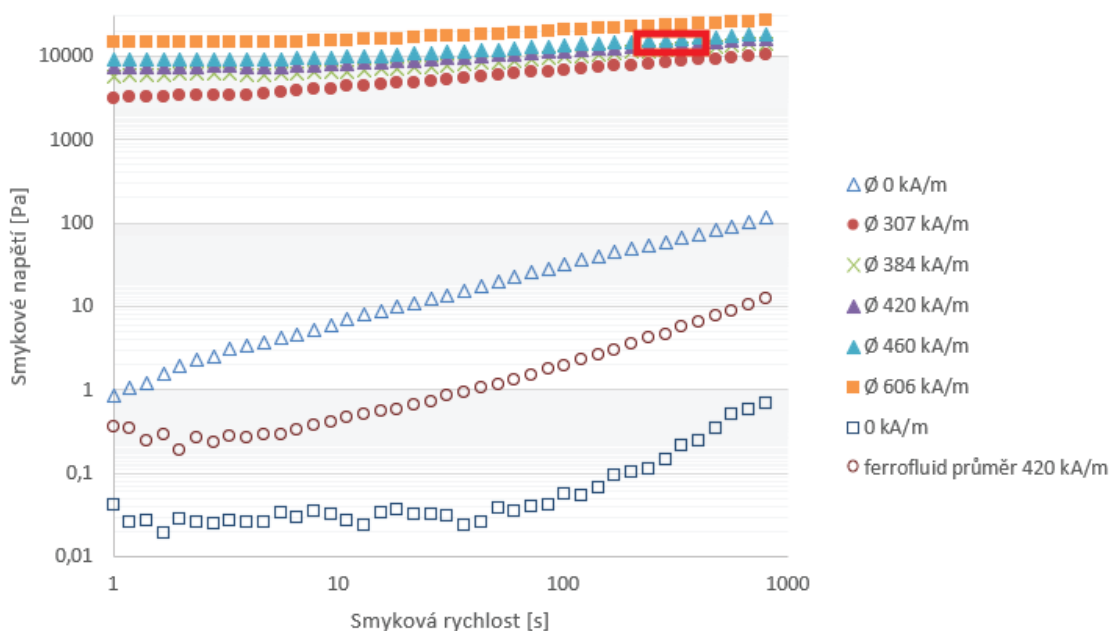
10 MAGNETOREOLOGICKÉ VLASTNOSTI

Magnetoreologická suspenze má téměř newtonský charakter, avšak s působením magnetického pole se změní na pseudoplastické chování. Přítomnost magnetického pole způsobuje vysoký nárůst smykového napětí díky magnetoreologickému efektu. Čím vyšší je intenzita magnetického pole, tím silnější je magnetoreologický efekt.

Magnetoreologické vlastnosti ferokapaliny a suspenze jsou znázorněny v obr. 11. Proudění je ovládáno suspenzí, která má o několik řádů vyšší smykové napětí než samotná ferokapalina. Působení magnetického pole posouvá naměřenou závislost vzhůru, právě kvůli vzniku vnitřních řetězců tvořených z magnetizovaných částic železa, které brání dalšímu proudění. Pro zjištění meze kluzu byly použity nízké hodnoty smykové rychlosti, které by v procesu leštění znamenaly prodloužení doby leštění nebo snížení kvality leštění.

Samotná ferokapalina má nízké smykové napětí, které je úměrné viskozitě v celém rozsahu smykové rychlosti. Smykové napětí se i tak zvyšuje s použitím externího magnetického pole, přesto i při 420 kA m^{-1} stále nedosahuje hodnot jako magnetoreologická suspenze ve vypnutém stavu. To nám dokazuje, že magnetoreologický efekt u suspenze je mnohem silnější než u samotné ferokapaliny.

Ferokapalina nám umožňuje dosáhnout kapalného stavu, ale také přispívá k dlouhodobé stabilitě magnetoreologické suspenze.

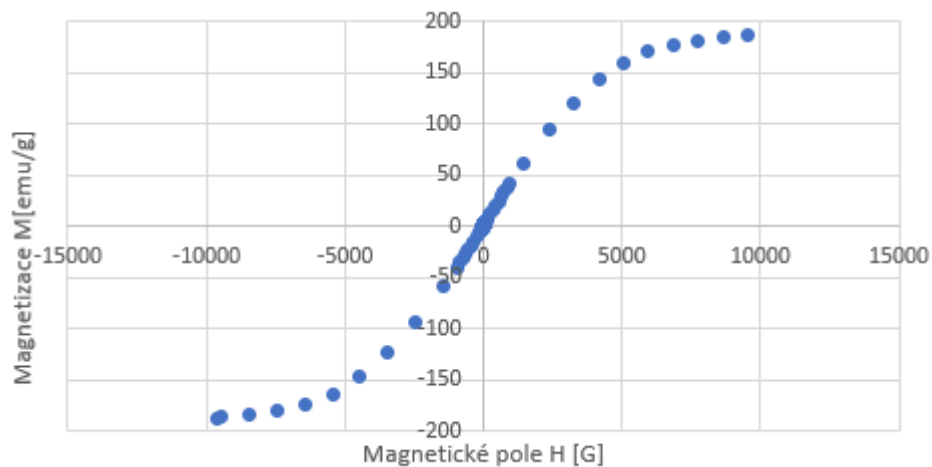


Obrázek č.12 – Graf křivek proudění při různých hodnotách magnetického pole; v červeném rámečku vyznačená oblast leštění. (plné symboly magnetoreologická suspenze, prázdné symboly ferokapalina)

10.1 MAGNETICKÉ VLASTNOSTI

Měření magnetických vlastností suspenze neukazuje prakticky žádnou hysterezi, což znamená, že remanentní magnetizace a koercivita suspenze jsou téměř nulové.

Z porovnání hodnot magnetizační křivky suspenze a hodnot magnetického pole používaných během procesu leštění je zřejmé, že jsme nedosáhli nasycené magnetizace, což potvrzuje i magnetizační křivka toku, která se nedostala do bodu překryvu.



Obrázek č.13 – Magnetizační křivka

11 MAGNETOREOLOGICKÉ LEŠTĚNÍ

Vzorky prošly procesem leštění s využitím studované pasty. Kvalita povrchu byla hodnocena pomocí 3D mikroskopu. Leštění probíhalo po dobu 5 minut za rychlosti 15 ot/s, mezi magnetem a vzorkem vzdálenost 0,5-1,5 mm.

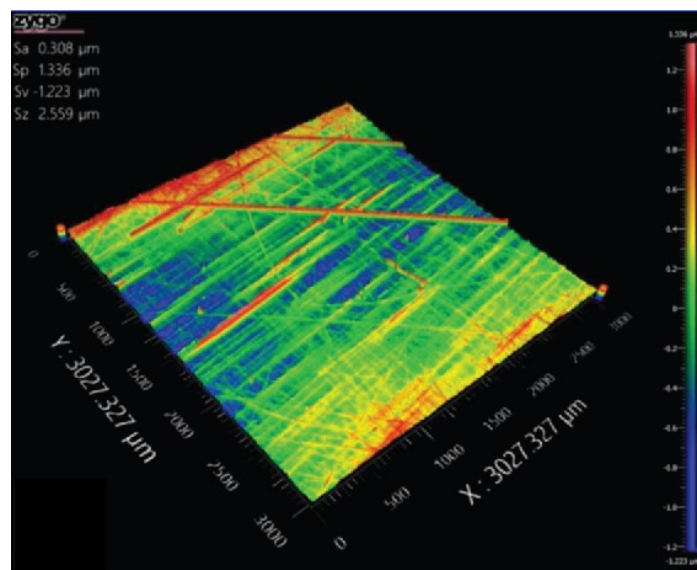
Leštěné vzorky prošly sonikováním, aby došlo k odstranění zbytků suspenze a nedošlo k ovlivnění výsledků stanovení povrchových charakteristik po leštění.

U povrchu jsme zjišťovali:

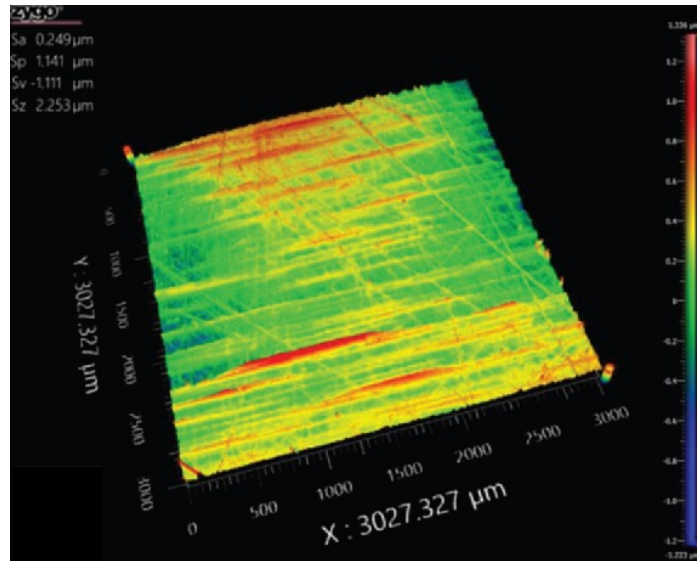
1. R_a – průměrná aritmetická odchylka profilu
2. R_p – maximální výška vrcholu
3. R_v – maximální hloubka dolin
4. R_z – součet maximální výšky a hloubky

Nejdůležitější je pro nás parametr R_p , u něj předpokládáme, že po leštění dojde k jeho snížení. Porovnáním parametru R_p před a po leštění lze pozorovat 15% pokles jeho hodnoty, tudíž můžeme zhodnotit, že došlo ke zlepšení hladkosti povrchu. Zlepšení povrchu je patrné i na 3D skenu vzorku.

Výsledky nám ukazují, že navrhovaná magnetoreologická pasta je vhodná pro proces magnetoreologického leštění nekovových povrchů.



Obrázek č. 14 – 3D sken povrchu vzorku před leštěním

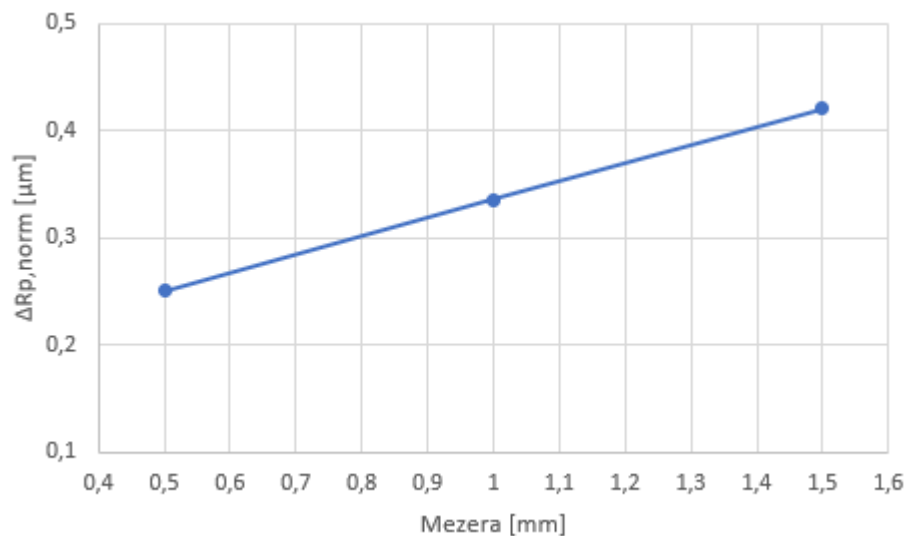


Obrázek č. 15 – 3D sken povrchu vzorku po leštění

Hodnocením jednotlivých parametrů drsnosti (R_a , R_p , R_v , R_z), lze konstatovat, že existují statisticky významné rozdíly mezi parametry počátečními a parametry po leštění. Měření bylo provedeno za stejných podmínek na 10 vzorcích.

Relativní rozdíly v závislosti na velikosti mezery jsou znázorněny v obrázku č. 16. Pro analýzu byl vybrán parametr R_p , jelikož není ovlivňován okolními vlivy, jako tomu může být například u parametru R_v (může dojít k vyplnění dolin pastou).

Z obrázku č. 16 lze vidět, že relativní rozdíl ΔR_p , norm roste lineárně s velikostí mezery. To naznačuje, že v rámci zkoušeného rozsahu mezery (0,5–1,5mm) proces leštění poskytuje lepší výsledky pro menší mezery.



Obrázek č. 16 – Účinnost leštění v závislosti na velikosti mezery

12 ZÁVĚR

Práce se zabývala teoretickým seznámením s magnetoreologickým efektem a jeho využitím u procesu magnetoreologického leštění.

Hlavním úkolem byla návrh a příprava magnetoreologické pasty, která následně byla použita pro proces magnetoreologického leštění. Magnetoreologický efekt naší pasty byl potvrzen reologickými měřeními, která prokázala výrazný nárůst viskozity a prahového napětí během působení vnějšího statického magnetického pole.

Během testování pasty při procesu leštění bylo zjištěno, že mezera mezi magnetem a testovacím vzorkem výrazně ovlivňuje konečnou kvalitu a hrubost ploch leštěných testovacích vzorků z PA-6.

Všechna reologická měření a následný proces leštění nám potvrdili, že je naše magnetoreologická pasta vhodná pro proces magnetoreologického leštění.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] VELURI, Riya. *Rheology* [online]. [cit. 2023-02-09]. Dostupné z: <https://www.tribonet.org/wiki/rheology-the-science-behind-material-flow/>
- [2] Fakulta technologická, UTB ve Zlíně. KZM [online]. [cit. 2023-02-09] Dostupné z: http://ufmi.ft.utb.cz/texty/kzm/KZM_03.pdf
- [3] Fakulta technologická, UTB ve Zlíně. Fyzika I [online]. ©2010 [cit. 2023-02-09] Dostupné z: http://ufmi.ft.utb.cz/texty/fyzika_pol/FP_01.pdf
- [4] HOLUBOVÁ, Renata, 2014. *Základy reologie a reometrie kapalin* [online]. [cit. 2023-02-09] ISBN.978-80-244-4178-8. Dostupné z: http://mofychem.upol.cz/KA6/Zaklady_reologie.pdf
- [5] MUNI. *Základy reologie a reometrie kapalin* [online]. [cit. 2023-02-10]. Dostupné z: https://is.muni.cz/el/1431/podzim2014/C5160/um/2457585/2457594/Reologie_a_reometrie_kapalin.pdf
- [6] CHHABRA, R.P. a J.F. RICHARDSON, 2008. *Non-Newtonian Flow and Applied Rheology* [online]. [cit. 2023-02-10]. ISBN 978-0-7506-8532-0. Dostupné z: https://www.academia.edu/19261498/NON_NEWTONIAN_FLOW_AND_APPLIED_RHEOLOGY
- [7] UNİYAL, Mohit, 2022. *Non-Newtonian Fluid* [online]. [cit. 2023-02-10]. Dostupné z: <https://byjusexamprep.com/non-newtonian-fluids-i>
- [8] LI, W H., X Z. HANG a H DU, 2013. *Magnetorheological elastomers and their applications* [online]. [cit.2023-02-10]. Dostupné z: <https://core.ac.uk/download/pdf/36997692.pdf>. University of Wollongong.
- [9] SALUNKHE, Hanmant P. a Surendra THIKANE, 2017. *Magnetorheological Fluids and Its Applications: Current Scenario and Future Prospects* [online]. Kolhapur [cit. 2023-02-14]. ISSN 2278-8697. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/322077004_Magnetorheological_Fluids_and_Its_Applications_Current_Scenario_and_Future_Prospects
- [10] OLABI, A. G. a A. GRUNWALD. *Design and Application of Magneto-Rheological Fluid “MRF”* [online]. Dublin, Ireland [cit. 2023-02-14]. Dostupné z: <https://core.ac.uk/download/pdf/11309312.pdf>

- [11] *Feromagnetická kapalina* [online]. [cit.2023-02-15]. Dostupné z: <https://fyzmatik.pise.cz/811-feromagneticka-kapalina.html>
- [12] WINGER, J., 2019. *Influence of the particle size on the magnetorheological effect of magnetorheological elastomers* [online]. [cit.2023-02-15]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0304885318339039>
- [13] ROUPEC, Jakub, 2011. https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=44549. Brno. Disertační Práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Doc. Ing. Ivan Mazůrek, CSc.
- [14] ZHANG, J Q, 2009. *Effect of seven different additives on the properties of MR fluids* [online]. [cit.2023-02-15]. Dostupné z: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/149/1/012086/pdf>
- [15] *Magnetorheological fluid* [online]. [cit. 2023-02-15]. Dostupné z: https://www.chemeurope.com/en/encyclopedia/Magnetorheological_fluid.html#Modes_of_operation_and_applications
- [16] ŠŇUPÁREK, Petr a Martin MAREK. *Drsnost povrchu* [online]. [cit. 2023-02-21]. Dostupné z: http://fei1.vsb.cz/kat410/studium/studijni_materialy/td/01-textyVSB/005_Drsnost%20povrchu.pdf
- [17] *Měření struktury povrchu* [online]. [cit. 2023-02-21]. Dostupné z: <https://www.accretech.eu/cs/mereni-struktury-povrchu/>
- [18] KEHLER, Roman, 2014. *Měření drsnosti povrchů*. České Budějovice. Bakalářská práce. Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích. Vedoucí práce RNDr. Pavel Kříž, Ph.D.
- [19] *II PREDÚPRAVA POVRCHU* [online]. [cit. 2023-02-21]. Dostupné z: <https://fcht.upce.cz/sites/default/files/public/luva3059/mater-vstrojar-vyrobe.pdf>
- [20] HAUZR, Jan, 2021. *Tryskání-Pískování* [online]. [cit. 2023-02-21]. Dostupné z: <https://janhauzr.eu/tryskani-piskovani>
- [21] HEGENBART, Dr. Thomas. *Magnetorheological Polishing* [online]. [cit. 2023-02-22]. Dostupné z: <https://www.asphericon.com/en/blog/detail/high-end-finishing-2-magnetorheological-finishing>

[22] PURANDARE, Snehal, Hrishikesh ZAMBARE a Ali RAZBAN. *Analysis of magnetic flux in magneto-rheological damper* [online]. 10 [cit. 2023-02-25]. Dostupné z: <https://core.ac.uk/download/pdf/333957631.pdf>

[23] NOVÁČEK, Vladislav, 2009. *TECHNOLOGIE VÝROBY MAGNETOREOLOGICKÝCH KAPALIN*. Brno. Bakalářská práce. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Vedoucí práce Jakub Roupec.

[24] KOVAŘÍK, Martin, 2018. *Konstrukce zařízení pro magnetoreologické dokončování povrchů*. Zlín. Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Vedoucí práce Ing. Ondřej Bílek, Ph.D.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

De	Debořino číslo
λ	Relaxační čas
τ	Smykové napětí
θ	Čas procesu pozorování
η	Dynamická viskozita
Dv	Rychlost pohybu smykových rovin
dy	Vzdálenost smykových rovin
j	Rychlostní gradient
ν	Kinematická viskozita
ρ	Hustota
τ_k	Mez kluzu
Al_2O_3	Oxid hlinitý

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obrázek č.1 - Rychlostní profil toku v kapalině mezi nepohyblivou a pohybující se deskou. [5]</i>	12
<i>Obrázek č.2 - Tokové a viskozitní charakteristiky nenewtonských kapalin.</i>	13
<i>Obrázek č.3 - Volně se pohybující magnetické částice a uspořádané částice do řetězců po aktivaci magnetického pole [22]</i>	15
<i>Obrázek č.4 - Částice práškového železa [13]</i>	19
<i>Obrázek č.5 - Znáznornění ventilového módu [23]</i>	20
<i>Obrázek č.6 - Znáznornění smykového módu [23]</i>	21
<i>Obrázek č.7 - Znáznornění tlakového módu [23]</i>	21
<i>Obrázek č.8 - Postup magnetoreologického leštění optiky [21]</i>	24
<i>Obrázek č. 9 - Částice železa pod mikroskopem SEM</i>	29
<i>Obrázek č. 10 - Částice Al₂O₃ pod mikroskopem SEM</i>	29
<i>Obrázek č.11 – Rotační reometr Anton Paar</i>	30
<i>Obrázek č.12 – Graf křivek proudění při různých hodnotách magnetického pole; v červeném rámečku vyznačená oblast leštění. (plné symboly magnetoreologická suspenze, prázdné symboly ferokapalina)</i>	32
<i>Obrázek č.13 – Magnetizační křivka</i>	33
<i>Obrázek č. 14 – 3D sken povrchu vzorku před leštěním</i>	34
<i>Obrázek č. 15 – 3D sken povrchu vzorku po leštění</i>	35
<i>Obrázek č. 16 – Účinnost leštění v závislosti na velikosti mezery</i>	35

SEZNAM TABULEK

<i>Tabulka č.1 - Koncentrace jednotlivých složek pasty</i>	<i>30</i>
--	-----------