

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Katedra elektrotechniky a počítačového modelování

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Anizotropní magnetoreologické elastomery

Autor práce: **Bc. Kateřina Jozová**

Vedoucí práce: **Ing. František Mach, Ph.D.**

2022

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2021/2022

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Kateřina JOZOVÁ**
Osobní číslo: **E20N0009P**
Studijní program: **N0713A060011 Materiály a technologie pro elektrotechniku**
Téma práce: **Anizotropní magnetoreologické elastomery**
Zadávající katedra: **Katedra materiálů a technologií**

Zásady pro vypracování

1. Zpracujte rešerši zaměřenou na téma magneticky aktivních kompozitních materiálů. Zaměřte se především na magnetoreologické elastomery.
2. Syntetizujte laboratorní vzorky izotropních a anizotropních magnetoreologických elastomerů. Vzorky následně charakterizujte na základě jejich magnetických a mechanických vlastností.
3. Navrhněte koncepci zařízení umožňující výrobu anizotropních magnetoreologických elastomerů metodou tlakové lití v řízeném externím magnetickém poli.
4. S využitím počítačového modelu navrhněte a zkonstruuje laboratorní prototyp zařízení.
5. Proveďte experimentální ověření funkce navržené koncepce.



Rozsah diplomové práce: **40 – 60**
Rozsah grafických prací: **dle doporučení vedoucího**
Forma zpracování diplomové práce: **elektronická**

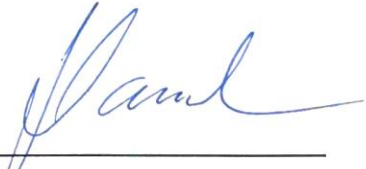
Seznam doporučené literatury:

- KIM, Yoonho, et al. *Printing ferromagnetic domains for untethered fast-transforming soft materials*. Nature, 2018, 558.7709.
- XU, Tianqi, et al. *Millimeter-scale flexible robots with programmable three-dimensional magnetization and motions*. Science Robotics, 2019, 4.29.
- CHUNG, HyunJoong; PARSONS, Andrew M.; ZHENG, Lelin. *Magnetically Controlled Soft Robotics Utilizing Elastomers and Gels in Actuation: A Review*. Advanced Intelligent Systems, 2020.
- I, Meng, et al. *Cutting the Cord: Progress in Untethered Soft Robotics and Actuators*. MRS Advances, 2019, 4.51.
- SODOMKA, Ondřej; SKŘIVAN, Vojtěch; MACH, František. *Magnetic forces behind hyperelastic behavior of magnetorheological elastomers*. IEEE Transactions on Magnetics, 2020, 56.7.
- SKŘIVAN, Vojtěch; SODOMKA, Ondřej; MACH, František. *Magnetically guided soft robotic grippers*. RoboSoft 2019.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. František Mach, Ph.D.**
Katedra elektrotechniky a počítačového modelování

Datum zadání diplomové práce: **8. října 2021**
Termín odevzdání diplomové práce: **26. května 2022**



Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.
děkan


Doc. Ing. Aleš Hamáček, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 8. října 2021

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá tématem anizotropních magnetoreologických elastomerů (MRE). V úvodní části práce jsou obecně popsány magneticky aktivní kompozitní materiály, do kterých se MRE řadí a následně je tento materiál samostatně podrobněji rozebrán. Dále je popsán způsob výroby MRE ve formě tzv. voxelů. Nadefinovány jsou základní pojmy pro měřené vlastnosti MRE a popsány jsou i metody pro měření parametrů vzorků MRE. V praktické části je uveden přehled připravených vzorků MRE a popsán model magnetického obvodu, ve kterém byly připraveny anizotropní vzorky MRE. U vzorků bylo provedeno měření permeability, mechanických parametrů a byly pořízeny i mikroskopické snímky těchto vzorků. V závěru práce byl navržen postup výroby anizotropního MRE formou voxelů, ze kterých byl pro demonstraci vlastností a chování MRE vytvořen transformátor, jehož využití by bylo vhodné pro senzoriku.

Klíčová slova

Magnetoreologické elastomery, MRE, izotropní MRE, anizotropní MRE, magnetické materiály, permeabilita, hystereze, MR efekt, funkční materiály, soft-robotika

Abstract

This diploma thesis is focused on Magnetorheological elastomers (MRE). The introduction provides a general description of magneto-active composites which include MRE materials. MRE is then described in more detail separately. The method of MRE voxels fabrication is then explained. There are also necessary parameters defined and description of the used measuring methods is provided. In the experimental part, there is an overview of prepared MRE samples and the model of used magnetic circuit is provided. This circuit was used for anisotropic MRE fabrication. Permeability and mechanical properties were measured for all of the MRE samples, also microscopic pictures were taken. In the conclusion of this thesis there is suggested a method for anisotropic MRE fabrication. Due to this method, MRE voxels were fabricated and then used to make MRE transformer which could be used as a sensor.

Key Words

Magnetorheological elastomers, MRE, isotropic MRE, anisotropic MRE, magnetic materials, permeability, hysteresis, MR effect, functional materials, soft-robotics

Poděkování

Chtěla bych poděkovat Ing. Františku Machovi, Ph.D. za vedení mé diplomové práce, odborné rady a připomínky, trpělivost, ale především za poskytnutí velmi zajímavého tématu. Dále bych ráda poděkovala i Ing. Ondřeji Sodomkovi za pomoc a rady při práci na praktické části.

Obsah

Úvod.....	- 1 -
1 Magneticky aktivní kompozitní materiály	- 3 -
1.1 Magnetoreologické kapaliny (MRF)	- 3 -
1.2 Magnetoreologické gely (MRG)	- 4 -
2 Magnetoreologické elastomery (MRE).....	- 6 -
2.1 Izotropní a anizotropní MRE	- 7 -
2.2 Materiály pro MRE	- 8 -
2.3 Vlastnosti MRE	- 8 -
2.4 Aplikační oblasti MRE	- 9 -
3 Voxely	- 11 -
4 Magnetické materiály – definice základních pojmů	- 13 -
5 Teorie k měření parametrů MRE	- 15 -
5.1 Měření magnetických vlastností	- 15 -
5.1.1 Měření na hystereziografu.....	- 15 -
5.2 Měření síly (tahová zkouška).....	- 16 -
5.2.1 Použitý přístroj.....	- 17 -
5.3 Indukované napětí transformátoru.....	- 18 -
5.4 Fluorescenční mikroskopie.....	- 19 -
6 Příprava vzorků MRE	- 21 -
6.1 Použité materiály	- 21 -
6.2 Postup přípravy MRE.....	- 22 -
6.3 Připravené vzorky MRE	- 24 -
7 Magnetický obvod pro výrobu anizotropních vzorků	- 26 -
7.1 Model magnetického obvodu	- 27 -
8 Příprava forem.....	- 30 -
9 Měření magnetických vlastností MRE	- 33 -
9.1 J-H charakteristiky vzorků	- 34 -

9.2	Relativní permeabilita vzorků	- 36 -
9.3	Porovnání relativní permeability vzorků	- 39 -
10	Měření mechanických vlastností MRE	- 40 -
10.1	Naměřená data	- 41 -
10.2	Porovnání vzorků	- 41 -
10.2.1	Vliv orientace částic na mechanické vlastnosti MRE	- 44 -
11	Mikroskopie	- 45 -
11.1	Mikroskopie vzorků	- 45 -
11.1.1	MRE iso + aniso (Fe85Si15 56 %).....	- 46 -
11.1.2	HeavyM iso + aniso (Fe85Si15 80 %).....	- 46 -
11.1.3	Nd iso + aniso (NdFeB 56 %).....	- 47 -
11.1.4	Nd zmag. iso + aniso (FNdFeB zmagnetované 56 %)	- 47 -
11.2	Mikroskopie částic	- 48 -
11.3	Porovnání vzorků	- 49 -
12	Vyhodnocení vlastností vzorků MRE.....	- 50 -
13	Koncepce výroby anizotropního MRE – VOXELY	- 51 -
13.1	Výroba MRE voxelů.....	- 51 -
14	Aplikační příklad – Elastický transformátor	- 53 -
14.1	Výroba MRE transformátorů	- 53 -
14.2	Měření indukovaného napětí	- 56 -
14.3	Porovnání MRE transformátorů	- 59 -
14.4	Možné využití MRE transformátorů – Sensorika.....	- 60 -
	Zhodnocení a závěr	- 62 -
	Literatura	- 64 -
	Přílohy	I

Seznam symbolů

Symbol	Popisek	Jednotka
μ_r	relativní permeabilita	(-)
μ_0	permeabilita vakua	(H·m ⁻¹)
R_m	magnetický odpor	(H ⁻¹)
l	délka cívky	(m)
S	průřez cívky	(m ²)
L	indukčnost	(H)
R	elektrický odpor	(Ω)
C	kapacita	(F)
N	počet závitů	(-)
H	intenzity magnetického pole	(A·m ⁻¹)
B	magnetická indukce	(T)
J	magnetická polarizace	(T)
B_r	remanentní indukce	(T)
H_c	koercitivní síla	(A·m ⁻¹)
ε	poměrné prodloužení	(-)
σ	normálové napětí	(N·m ⁻²)
σ_0	normálové smluvní (Kirchhoffovo) napětí	(N·m ⁻²)
A	deformovaná plocha	(m ²)
A_0	nedeformovaná plocha	(m ²)
F_N	síla na normálovou plochu	(N)
u_i	indukované napětí	(V)
ϕ	magnetický indukční tok	(Wb)

(tučně jsou označeny vektory daných veličin)

Seznam zkratk

Zkratka	Popisek
MRE	Magnetoreologické elastomery
MRF	Magnetoreologické kapaliny
MRG	Magnetoreologické gely
MR	Magnetoreologické

Úvod

Diplomová práce se věnuje především anizotropním magnetoreologickým elastomerům (MRE). Tyto materiály se řadí do skupiny tzv. „functional materials“ (funkčních materiálů), díky svým vlastnostem, které lze navíc řídit externím magnetickým polem. Tento kompozitní materiál se skládá z nemagnetické elastomerní matrice a plniva ve formě magnetických mikročástic nebo nanočástic. Obecně jsou ve výzkumech popisovány izotropní MRE, tedy s neorientovanou mikrostrukturou (rovnoměrná distribuce částic plniva v objemu MRE). Tato práce se zabývá charakterizací anizotropní varianty MRE, jejíž struktura je orientovaná (částice plniva jsou uspořádány do orientovaných řetězců), což má za následek celkové zlepšení vlastností MRE i bez působení externího magnetického pole.

Jelikož je výzkum a vývoj MRE ve větším měřítku otázkou především posledních let, je zde stále mnoho otázek ohledně vlastností a chování tohoto materiálu. Existují již matematické modely [1], které dokáží simulovat chování MRE za různých podmínek či pro různé aplikace. Vždy se ovšem jedná o použití určité kombinace materiálu matrice a plniva. Obecně jsou zatím charakteristiky MRE zjišťovány především experimentálně. Díky jedinečným a kontrolovatelným vlastnostem MRE je jejich využití aktuálně směřováno do oblasti soft-robotiky a sensoriky [2]. Byly například vytvořeny soft roboti [3] o rozměrech v řádu jednotek milimetrů (až mikrometrů), jejichž pohyb je možné řídit magnetickým polem. Tito roboti mohou provádět různé druhy pohybu – chodit, plavat, šplhat, plazit se v úzkých tunelech, nebo mohou sloužit k transportu (například léčiva). Zmínění roboti jsou převážně planární, lze ale vytvářet i 3D struktury, které umožňují víceosé ohýbání či řízení pohybu více „nožiček“ robota v různém směru najednou [4]. Probíhají výzkumy zaměřené právě na výrobu takovýchto robotů [5], které by umožnily vytvářet trojrozměrné struktury s daným chováním v magnetickém poli, a které by bylo možné využívat pro budování inteligentních mikrosystémů ve zdravotnictví nebo zmíněné robotice.

Cílem práce bylo popsat magnetické a mechanické vlastnosti anizotropního MRE. Pro tyto účely byly vytvořeny vzorky anizotropních MRE s použitím různých materiálů plniva (mikročástice Fe₈₅Si₁₅, NdFeB a zmagnetované NdFeB) a jeho obsahem (56 % a 80 %). Pro porovnání byly vytvořeny i izotropní varianty těchto vzorků. Pro hledání daných vlastností MRE byla provedena měření na hysterezigrafu a tahová zkouška. Pro pochopení chování MRE je ovšem velmi důležitá i jeho mikrostruktura, a proto byly pořízeny snímky vzorků fluorescenčním mikroskopem. Dále bylo třeba navrhnout způsob výroby anizotropního MRE a vytvořit počítačový model příslušného výrobního zařízení. Pro tyto účely byl upraven magnetický obvod, ve kterém byla provedena syntéza anizotropních vzorků MRE za působení homogenního magnetického pole.

V závěru práce je uveden i příklad využití MRE, konkrétně se jedná o elastický transformátor s MRE jádrem, na kterém jsou demonstrovány vlastnosti izotropního a anizotropního MRE.

TEORETICKÁ ČÁST

1 Magneticky aktivní kompozitní materiály

Kompozitní materiály, které lze považovat za magneticky aktivní, se obecně nazývají magnetoreologické (MR – z ang. Magnetorheological). Řadí se do skupiny tzv. „functional materials“ (funkčních materiálů), které se připravují kombinací mikročástic nebo nanočástic feromagnetického materiálu, které tvoří plnivo kompozitu, a jsou rozptýleny v matrici. Vlastnosti magnetoreologických kompozitů mohou být řízeny působením externího magnetického pole, a proto mají velký aplikační potenciál v oblastech automobilového průmyslu, konstrukci, sensorice nebo robotice [6].

Funkční materiál je takový materiál, který reaguje na vnější podněty (mechanické, tepelné, elektrické, akustické, magnetické, chemické atd.) tím, že mění své vlastnosti. U homogenních materiálů je obtížné, aby reagovali na více podnětů nebo u nich naopak nastalo více různých změn, a pro tyto účely se vytvářejí kompozity [1].

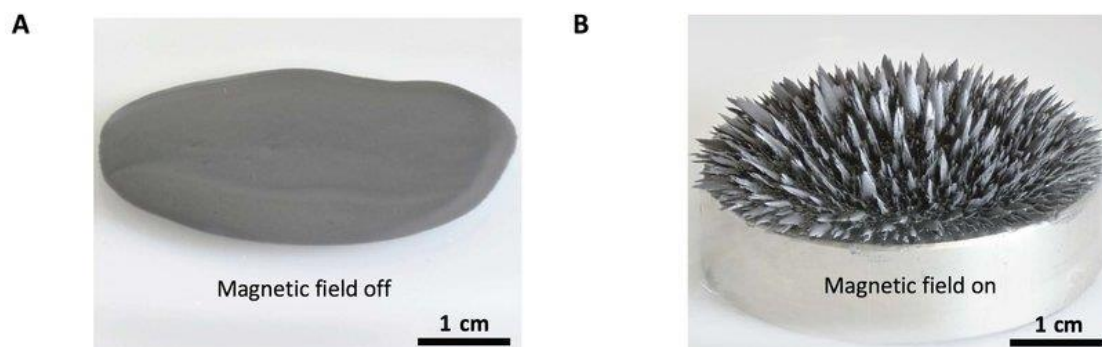
Magnetoreologické (MR) kompozitní materiály je dle [1] možné rozdělit na MR kapaliny, MR gely a MR elastomery, a to v závislosti na typu použité matrice a skupenském stavu bez působení externího magnetického pole.

1.1 Magnetoreologické kapaliny (MRF)

Magnetoreologické kapaliny (MRF – z angl. Magnetorheological fluids), někdy také označovány jako fero kapaliny, jsou jedním z prvních „magneto-senzitivních“ chytrých materiálů [1]. Připravují se smísením dvou základních složek, a to mikroskopických částic feromagnetika (plnivo) a nemagnetického pojiva (matrice), přičemž pro dosažení potřebných vlastností jsou používána i další aditiva. Při působení externího magnetického pole se MR kapaliny velmi rychle mění z kapalného stavu na polotuhou strukturu, stále si ale zachovávají vlastnosti kapaliny (i při působení silných magnetických polí) [7]. Tento jev je způsoben vytvářením řetězců magnetickými mikročásticemi ve směru působícího pole a je také závislý na síle tohoto pole.

Problémem u MR kapalin je sedimentace mikročástic z důvodu rozdílných hustot matrice a plniva, což brání jejich dalšímu vývoji [1]. Jednoduchým řešením je použití částic, které nemají tak dobré magnetické vlastnosti, ale vykazují výrazně nižší sedimentaci, což vede ke zlepšení vlastností MR kapaliny. Dalším způsobem omezení sedimentace je

dle výzkumu [8] zmenšení velikosti částic plniva, kdy nanočásticová plniva způsobují mnohem vyšší stabilitu MRF než mikroskopické částice.



Obr. 1: MRF bez působení vnějšího magnetického pole (A), s působením mag. pole (B) [5]

Další výzvou v oblasti MRF vyžadující další výzkum je problém s agregací (shlukováním) nanočástic po zrušení působení externího magnetického pole. Jednou z metod řešící tento problém je využití částic ve tvaru „tyčinek“ či krátkých vláken [9]. Oxidace kovových částic je omezována obalením těchto částic vrstvou polymeru [1].

Kvůli výše zmíněným problémům magnetoreologických kapalin, tedy sedimentaci a agregaci, byla hledána alternativa s polymerní maticí, která by nahradila používanou kapalnou maticí, a u které by se tyto jevy výrazně omezily [1]. Z tohoto důvodu začal vývoj nového materiálu, a to magnetoreologických elastomerů (MRE).

1.2 Magnetoreologické gely (MRG)

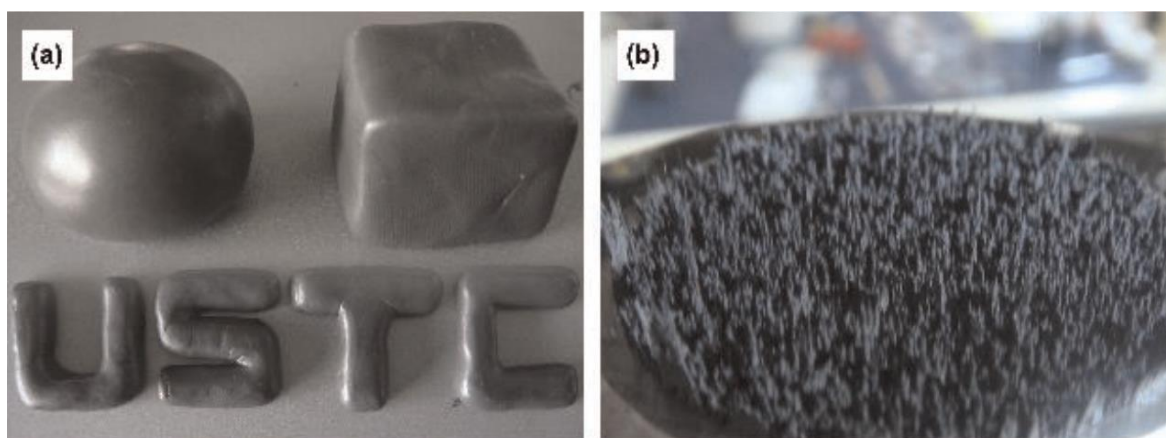
Další skupinou spadající pod MR kompozity jsou magnetoreologické gely [1]. Tento materiál vykazuje díky své matici viskoelastické vlastnosti i bez aplikace vnějšího magnetického pole. Maticí MRG tvoří částečně zesítěný polymerní gel. První vzorky magnetoreologických gelů byly vytvořeny již v roce 1995 [10], kdy byly zkoumány změny vlastností vzorků a mikrostruktury v závislosti na působení či nepůsobení vnějšího magnetického pole.

MR gely lze dále dělit podle jejich fyzického stavu (stupně zesílení matrice) na „spíše tekuté“ či „spíše pevné“ [11]. Tekutější MR gely se dají považovat za speciální typ MR kapalin s polymerním aditivem, které vytváří jen lehce síťovanou strukturu, která v jisté míře omezuje sedimentaci částic plniva. Přídavkem polymeru lze navíc ovlivnit i výslednou

viskozitu a tuhost MR gelu. Nevýhodou oproti MR kapalinám je však omezený pohyb částic plniva, kvůli kterému je reakce MR gelů na vnější magnetické pole značně menší.

Pevnější MR gely se svou strukturou podobají MR elastomerům, jejich matrice ale není tak elastická (podobná gumě) jako právě u MRE. U obou těchto materiálů je problém se sedimentací částic plniva vyřešen [1].

V poslední době je v oblasti výzkumu MR gelům věnováno více pozornosti. Byl vytvořen tzv. „MR Plastomer“ [12], který má vlastnosti modelovací hmoty (plastelíny), lze ho tedy různě formovat se zachováním tvaru. Pro matrici tohoto materiálu byl využit speciální polyuretan. V externím magnetickém poli se deformuje ve směru jeho působení a částice plniva se přemisťují a vytváří v mikrostruktuře orientované řetězce, které jsou zachovány i po vyjmutí materiálu z pole [13].



Obr. 2: MR Plastomer a) bez působení, b) s působením externího magnetického pole [9]

MR gely mají tedy jedinečnou vlastnost, která vlastně kombinuje znaky MR kapalin a MR elastomerů – mikročástice plniva se při aplikaci magnetického pole mohou, díky ne zcela zesítné matrici, poměrně volně pohybovat a tvořit orientované řetězce, které v této poloze po vyjmutí materiálu z magnetického pole v této pozici zůstávají [13].

2 Magnetoreologické elastomery (MRE)

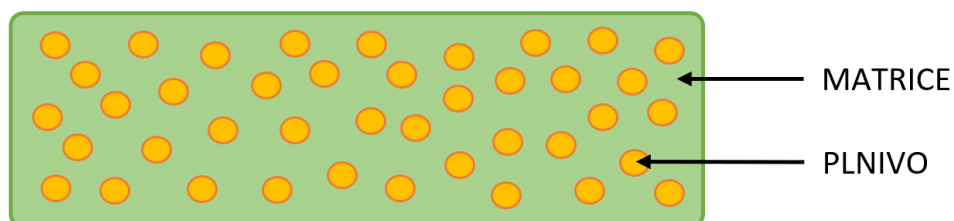
Magnetoreologické elastomery (často označované pouze zkratkou „MRE“ – z angl. Magnetorheological elastomers) jsou kompozitním materiálem, který se skládá typicky z mikročástic magnetického materiálu, které jsou rozptýleny v nemagnetické elastomerní (polymerní) matici [14]. Na rozdíl od MR kapalin jsou tyto částice v matici pevně vázané a nemohou se v rámci materiálu volně pohybovat ani za působení externího magnetického pole, při kterém navíc nejsou pozorovány žádné změny skupenství materiálu [1].



Obr. 3: Příklady vzorků připravených z MRE [13]

Podle [14] jako první ve své práci MRE zmínili vědci Rigbi a Jilkén již v roce 1983, zmínky o tomto materiálu se však ve větším měřítku začaly objevovat až po roce 2001, přičemž zájem o tento materiál postupně rostl. V současné době v rámci MRE probíhá mnoho výzkumů, a to především díky jeho dynamickým mechanickým a reologickým vlastnostem, které mohou být kontrolovány vystavením vnějšímu magnetickému poli [15]. Tento jev se označuje jako tzv. „MR efekt“ (magnetoreologický efekt), při kterém mezi sebou jednotlivé magnetické částice v elastické matici interagují, což vede právě k vratným změnám elastických vlastností MRE, které je možné řídit [14]. Tímto způsobem lze měnit tuhost, která se zvětšuje po vystavení MRE magnetickému poli. Právě díky možnosti dynamických změn vlastností MRE (především zmíněné tuhosti) je tento materiál vhodný pro různá potenciální využití, jako například vibrační absorbéry nebo izolátory, snímače nebo například aktuátory pro řízení průtoku [1]. Aktuálně probíhají výzkumy, které

se zaměřují na využití MRE pro elastické mikro-roboty (oblast tzv. „soft robotiky“) [2]. Tyto roboty je možné ovládat pomocí magnetického pole – lze tak řídit jejich pohyb.

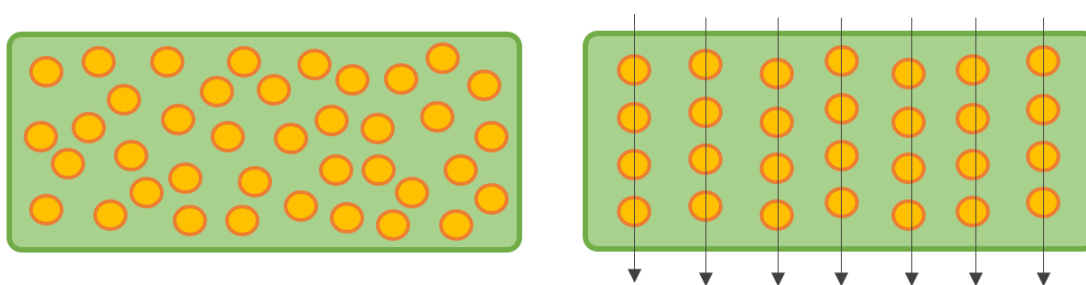


Obr. 4: Zjednodušené znázornění struktury MRE

2.1 Izotropní a anizotropní MRE

Z hlediska struktury lze magnetoreologické elastomery dělit na izotropní, tedy s neorientovanou strukturou, a anizotropní (s orientovanou strukturou) [14].

Při syntéze izotropního MRE bez dalších vnějších vlivů vzniká mikrostruktura s náhodně rozprostřenými částicemi plniva v celém objemu materiálu. Před dovytvrzením MRE lze pomocí externího magnetického pole zorientovat feromagnetické mikročástice (případně nanočástice) právě ve směru působení tohoto pole. V tomto případě se jedná o anizotropní magnetoreologické elastomery. Částice se ve směru magnetické indukce natočí a seskupí, což ve výsledné struktuře vytvoří řetězce. Na orientaci částic má vliv i síla magnetického pole, kdy u silnějšího pole dochází k většímu shlukování částic a tvorba řetězců je výraznější. Po vytvrzení si anizotropní MRE tuto strukturu zachovává i bez působení vnějšího pole.



Obr. 5: Struktura izotropního MRE (vlevo) a anizotropního MRE (vpravo) s naznačeným směrem působení externího magnetického pole při jeho tuhnutí

Orientovaná struktura MR elastomerů může mít zásadní vliv na výsledné vlastnosti MRE, v závislosti na použitém materiálu matrice a částic plniva [1].

2.2 Materiály pro MRE

Magnetoreologické elastomery se připravují ze dvou hlavních složek – nemagnetické elastomerní (polymerní) matrice a magnetického plniva ve formě kovových částic. Tyto částice musejí být magnetické, aby výsledný materiál reagoval na externí magnetické pole, případně aby ho šlo polem ovlivňovat. Pro dosažení požadovaných parametrů MRE jsou také přidávána i různá aditiva (jen malý podíl celkového objemu MRE). Výroba MRE je poměrně jednoduchá – do elastomerní matrice (v tekutém nevytvrzeném stavu) jsou přidány magnetické částice, obě fáze se promíchají a výsledná směs následně ztuhne (proces polymerace = zesítnění elastomeru).

Mezi materiály používané pro nosnou elastickou složku MRE, tedy jejich matrici, patří především polymery jako například [16][17]: přírodní kaučuk, silikony, polyuretan, polybutadien (syntetický kaučuk), NBR kaučuk (butadien-akrylonitrilový kaučuk), či termoplastické elastomery (např. SEBS = Styren-ethylen-butylen-styren). Nejčastěji se však v článcích zmiňuje využití silikonu.

Magnetické částice, plnící v MRE funkci plniva, mají nejčastěji rozměry v řádu mikrometrů, ale v některých případech jsou využívány i nanočástice. Pro výrobu MRE se využívají například železné (jedny z nejpoužívanějších), karbonylové (karbonyl železa), niklové, neodymové, či kobaltové částice nebo slitiny těchto kovů [18].

Obecně jsou MRE považovány za nevodivé. Při výrobě do nich ale lze přidat třeba grafitový prášek, který MRE učiní vodivými [19]. Takové MRE kompozity pak lze řadit mezi vodivé polymerní kompozity.

2.3 Vlastnosti MRE

Vlastnosti MR elastomerů (a obecně magnetoreologických materiálů) jsou zjišťovány především experimentálně [1]. Tímto způsobem jsou hledány základní parametry MRE a je charakterizováno i jejich chování, a to především pro účely jejich dalšího výzkumu a vývoje. Na výsledné vlastnosti MRE mají vliv materiály matrice i plniva, u kterého hraje roli i plnění a tvar částic, a případně použitá aditiva.

Ze samotného názvu MRE vyplývají jeho hlavní rysy:

- „magneto-“ = změna vlastností materiálu je vyvolaná vnějším magnetickým polem
- „-reologické“ = dochází ke změnám mechanických (reologických) vlastností materiálu
- „elastomery“ = materiál je elastický (s vysokou viskozitou)

Magnetoreologické elastomery se vyznačují tzv. „hyperelasticitou“, což znamená, že po deformaci a následném odlehčení, se tento materiál vrátí do svého původního stavu, přičemž se v něm při mechanickém namáhání negeneruje teplo (během deformace materiálu dochází k přírůstku hustoty vnitřní energie – lze popsat) [20].

Změna vlastností MRE v závislosti na působení externího magnetického pole (a jeho velikosti) se označuje jako tzv. „MR efekt“ (někdy také MR mechanismus), který se výrazněji projevuje u anizotropních MRE [16]. Stejně jako u samotného materiálu je výzkum MR efektu stále aktuální. Materiály, u kterých se projevuje tento efekt jsou obvykle označovány právě jako magnetoreologické. Pro simulaci tohoto chování MRE byl vytvořen model [21], který zohledňuje nejen působení externího magnetického pole na materiál, ale i působení zmagnetovaných částic plniva mezi sebou, platnost modelu je ovšem omezena na MRE s nízkou koncentrací magnetických částic. Aktuálně se provádějí simulace, vycházející z uvedeného modelu, které zahrnují i interakce mezi částicemi plniva a polymerní matricí [22]. Tyto modely dokáží predikovat reakci MRE na působení magnetického pole pro různé koncentrace plniva a různé materiály matrice.

Mezi hlavní zkoumané reologické vlastnosti patří schopnost MRE měnit svou tuhost v závislosti na působení vnějšího magnetického pole [1]. Pomocí experimentů bylo dokázáno, že větší tuhost vykazuje MRE s anizotropní strukturou (oproti izotropní struktuře), přičemž má na tuto skutečnost vliv i plnění částic, kdy je vyšší tuhosti materiálu dosaženo s vyšším plněním [23]. Toto platí obecně bez působení vnějšího magnetického pole, změna tuhosti je tedy v tomto případě ovlivněna jen orientací částic plniva. Při aplikaci magnetického pole na MRE dojde k ovlivnění samotné vnitřní mikrostruktury, což má také za následek změnu tuhosti materiálu, která je v tomto případě vratná a říditelná silou působícího pole [23].

Jak již bylo zmíněno, v současné době probíhají různé výzkumy s cílem charakterizovat MR elastomery. Tyto poznatky pak pomáhají pochopit chování MRE a umožňují objevování nových možných aplikací tohoto materiálu.

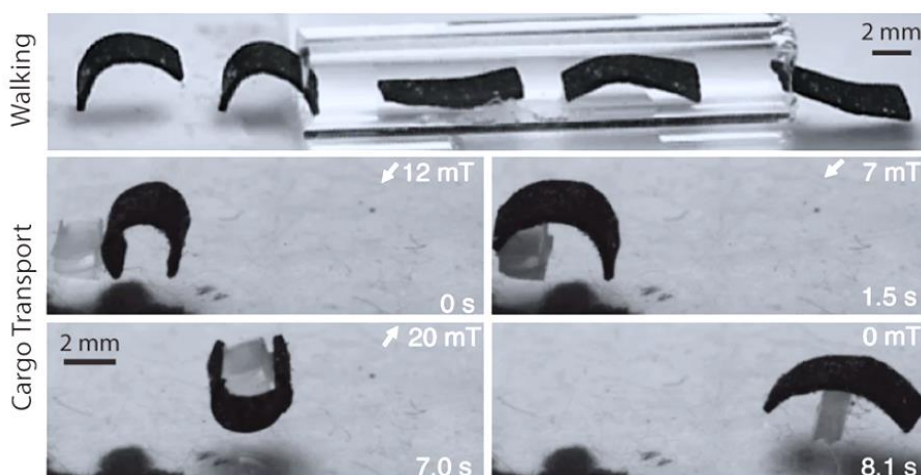
2.4 Aplikační oblasti MRE

Magnetoreologické elastomery vykazují jedinečné vlastnosti, které mohou být řízeny externím magnetickým polem. Navíc řeší problémy MR kapalin, které značně omezují jejich použití – problémy spojené s nutností utěsnění prostorů s MR kapalinou, či sedimentací

částic. Díky tomu lze MRE použít v různých inženýrských odvětvích, přičemž byla v minulosti věnována velká pozornost oblasti absorpce, izolace a redukce vibrací [14]. Navrženy byly například dynamické tlumiče vibrací a izolátory vibrací [24].

V současné době roste zájem o senzitivní vlastnosti MRE, tedy schopnost reagovat na určitý podnět. Výzkumy se proto věnují jeho využití v sensorice, například pro snímání mechanických a magnetických podnětů [14]. Navržen byl třeba magneto-rezistivní MRE senzor, který funguje jako aktivní prvek v elektrickém obvodu – působení magnetického pole deformuje MRE a způsobuje tak změnu napětí, které je měřeno na jeho vývodech [19]. Z hlediska mechanického zatížení se výzkumy věnují piezo-rezistivním sensorům tlaku, u kterých je princip funkce podobný jako u magneto-rezistivních sensorů, MR elastomer je zde ale fyzicky deformován mechanickou silou [25]. Ke změně rezistivity dochází jen s určitým plněním kovových částic, experimentálně zjištěná hodnota minimálního nutného obsahu částic je 75 %.

Dále je možné pomocí MRE sestavovat magnetické aktuátory [18]. Elasticita MRE umožňuje také využití ve flexibilní elektronice, která je velmi aktuálním tématem. Velkou roli mají MRE i v oblasti „soft robotiky“ [26]. Soft robotika je obor, který zahrnuje různé mechanismy, řídicí schémata a materiály k realizaci robotů, schopných plnit úkoly, které jsou tradičním robotům nedostupné. Konvenční způsoby řízení „soft“ (měkkých) robotů zahrnují například pneumatické či hydraulické zdroje tlaku, pro dosažení změny tvaru robota. Nejaktuálnější výzkumy se zabývají využitím magnetismu pro ovládání těchto soft robotů, přičemž používaným materiálem je právě i MRE [27]. Využití soft robotů je ve velké míře řešeno také pro různá medicínská použití.



Obr. 6: Příklad soft robota ovládaného magnetickým polem, který může chodit, či transportovat drobné objekty [26]

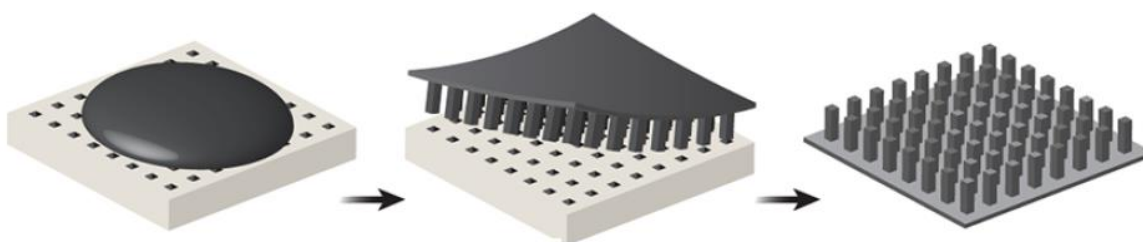
3 Voxely

Jedním ze způsobů vytváření magneto-senzitivních struktur, například pro zmíněnou oblast soft robotiky, je spojování předpřipravených „stavebních jednotek“ (3D bloků) jednoduchých geometrických tvarů, nejčastěji krychlového tvaru [2]. Toto je podobné u pixelů, jakožto „stavebních jednotek“ digitálního obrazu (pixel = nejmenší obrazový bod, ve 2D), a z této skutečnosti také vyplývá název uvedených 3D bloků „voxely“ (zkráceno z „volumetric pixel“ = objemový pixel) [28].



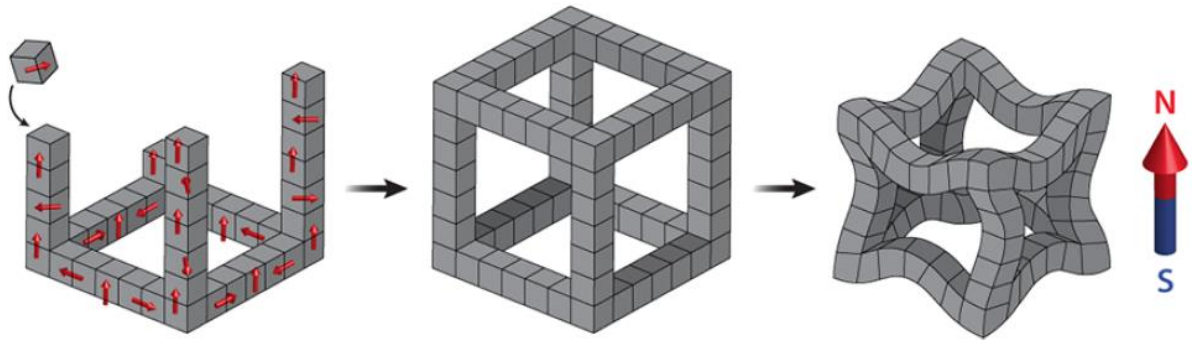
Obr. 7: Voxely s různou orientací magnetických částic [14]

Nejčastější způsob výroby voxelů zatím spočívá v odlití MRE do připravené formy (matice s krychlovými dutinami pro odlití velkého počtu voxelů najednou), ve které vzorky tuhnou za působení vnějšího magnetického pole [2]. Touto metodou jsou získány voxely s orientovanou strukturou. Na rozdíl od jiných aditivních metod, které často vyžadují určité vlastnosti materiálu (například pro využití 3D tisku), je odlití do forem použitelné pro širokou škálu elastomerních materiálů. Tato metoda je využívána i pro vytváření voxelů a z nich vytvořených prvků v mikroskopickém měřítku.



Obr. 8: Postup výroby voxelů odlitím MRE do formy [14]

Tyto voxely pak lze libovolně skládat a spojovat do různých 3D struktur v závislosti na požadovaných vlastnostech či funkci dané struktury. Natočení voxelů zajišťuje danou deformaci výsledné struktury v určitém směru – voxely se natáčí podle orientace své struktury do směru působícího magnetického pole. Prvky sestavené z voxelů jsou tedy svým způsobem „předprogramované“ pro určité chování.



Obr. 9: 3D struktura z voxelů a její deformace při vložení do magnetického pole [14]

V současné době je výroba mikroskopických 3D struktur sestavených z voxelů (například pro mikroskopické roboty) prováděna ručně pod mikroskopem postupným spojováním jednotlivých voxelů na sebe a zatím neexistuje automatizovaná technika výroby těchto struktur. Jelikož je manuální výroba značně náročná nejen časově, ale i z hlediska nutnosti pracovníků, je nezbytný další výzkum pro nalezení řešení tohoto problému [2].

4 Magnetické materiály – definice základních pojmů

V následujícím textu jsou definovány a stručně vysvětleny základní pojmy (parametry), které jsou v práci využívány pro charakterizaci připravených vzorků MRE.

Materiály lze dělit v závislosti na jejich chování v magnetickém poli na diamagnetika ($\mu_r < 1$, mírně zeslabují magnetické pole), paramagnetika ($\mu_r > 1$ a blízké jedné, mírně zesilují magnetické pole) a feromagnetika ($\mu_r \gg 1$, výrazně zesilují magnetické pole), která se obecně označují jako magnetické materiály [29].

Magnetické materiály tedy lze charakterizovat pomocí jejich relativní permeability, přičemž vyšší hodnota tohoto parametru znamená vybudování větší indukce v materiálu při působení magnetického pole. Hodnota permeability materiálů není konstantní, ale mění se v závislosti na velikosti intenzity působícího magnetického pole [29].

Permeabilita μ ($\text{H} \cdot \text{m}^{-1}$) je definována jako:

$$\mu = \mu_0 \mu_r, \quad (1)$$

kde μ_0 ($\text{H} \cdot \text{m}^{-1}$) je permeabilita vakua, μ_r (–) je relativní permeabilita daného materiálu.

Intenzita magnetického pole \mathbf{H} ($\text{A} \cdot \text{m}^{-1}$) je vektorovou veličinou popisující magnetické pole, která odpovídá silovým účinkům magnetického pole [30]. Při průchodu proudem vodičem kolem něj vzniká magnetické pole, které lze zobrazit pomocí siločar. Podél siločáry se rozkládá magnetické napětí, přičemž intenzita je dána tímto napětím vztaženým na danou délku siločáry. Směr intenzity v daném bodě je tečna k siločáře.

$$\mathbf{H} = \frac{U_m}{l} = \frac{I}{l}, \quad (2)$$

kde U_m je magnetické napětí, I je proud (A) a l (m) je délka siločáry.

Další vektorovou veličinou charakterizující magnetické pole je magnetická indukce \mathbf{B} (T), která je dána magnetickým tokem Φ (Wb) protékajícím danou plochou S (m^2):

$$\mathbf{B} = \frac{\Phi}{S} \quad (3)$$

Podle velikosti a směru magnetické indukce lze definovat homogenní či nehomogenní magnetické pole. U homogenního magnetického pole je magnetická indukce ve všech bodech stejná a indukční čáry jsou rovnoběžné, u nehomogenních polí toto neplatí.

Působením magnetického pole na feromagnetické látky vzniká značná magnetická polarizace, narozdíl od diamagnetik a paramagnetik, u kterých dochází jen k nepatrné polarizaci [31]. Tato polarizace se projevuje vnitřním magnetickým polem u materiálu.

Magnetickou polarizaci \mathbf{J} lze definovat pomocí vztahů:

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H} + \mathbf{J}, \quad (4)$$

$$\mathbf{J} = \chi \mu_0 \mathbf{H}, \quad (5)$$

kde $\chi (-)$ je magnetická susceptibilita.

Magnetický odpor R_m (H^{-1}) je vlastnost materiálu, která popisuje, jak velký odpor klade daný materiál průchodu magnetického toku. Lze jej vypočítat pomocí zjednodušeného vztahu [32]:

$$R_m = \frac{1}{\mu_0 \cdot \mu_r} \cdot \frac{l}{S}. \quad (6)$$

Indukčnost cívky L (H) závisí na jejím fyzickém provedení a na použitém materiálu jádra. S feromagnetickým jádrem je indukčnost cívky větší než s jádrem z neferomagnetického materiálu, má totiž menší magnetický odpor.

Vlastní indukčnost cívky lze vypočítat dle zjednodušeného vztahu pro ideální válcovou cívku [32]:

$$L = \frac{N^2}{R_m} = \mu_0 \cdot \mu_r \frac{N^2 \cdot S}{l}, \quad (7)$$

kde N je počet závitů cívky, R_m (H^{-1}) magnetický odpor, $\mu_r (-)$ je permeabilita materiálu jádra cívky, S (m^2) je obsah průřezu cívky a l (m) je délka cívky.

5 Teorie k měření parametrů MRE

V této části jsou popsány veličiny (parametry) a jejich způsoby měření, které jsou relevantní pro měření provedená v rámci praktické části této práce.

5.1 Měření magnetických vlastností

Pro zjištění kompletních vlastností (parametrů) magnetických materiálů a zachycení jejich charakteristik se provádí měření na hystereziografu. Jelikož jsou hlavní vlastnosti těchto materiálů především intrinzičné (vnitřní → neprojevují se samy o sobě navenek jako třeba hmotnost nebo teplota), musí se měřit v příslušném systému (výše zmíněný hystereziograf) [30]. Zkoumaný vzorek magnetického materiálu během měření ovlivňuje tento měřicí systém, jehož změny pak odpovídají určitým magnetickým parametrům vzorku.

Hystereziograf velmi zjednodušeně odpovídá elektromagnetickému obvodu se vzduchovou mezerou. Do tohoto obvodu je následně vložen měřený vzorek magnetického materiálu. Princip měření pak spočívá v postupném zvyšování či snižování proudu protékajícího cívkou elektromagnetu a zaznamenávání příslušných hodnot magnetického indukčního toku, ze kterého se následně určuje magnetická indukce B . Z těchto měření pak lze získat další důležité parametry charakterizující magnetické materiály (významné body na B-H křivce), mezi které patří remanentní indukce B_r či koercitivita H_c . Měření magnetizačních křivek a parametrů lze provádět za různých teplot, čímž lze zjistit i informace o chování magnetických materiálů v závislosti na změně teploty.

Mezi jednodušší metody pro zjištění základních magnetických parametrů patří například měření magnetické indukce B pomocí teslametru (převážně s využitím Hallovy sondy) [30].

5.1.1 Měření na hystereziografu

Měření magnetických vlastností vzorků MRE byla provedena na hystereziografu MPG 200/HG od společnosti *Brockhaus Measurement*. Dle datasheetu [33] je tento přístroj určen pro měření statických, kvazi-statických a dynamických charakteristik magneticky měkkých nebo magneticky tvrdých materiálů pomocí systému měřících cívek a elektromagnetů. Výsledné charakteristiky jsou vyhodnocovány pomocí měření

následujících parametrů měřených vzorků: koercitivity a celkové energie, magnetické indukce a remanentní indukce, křivky prvotní magnetizace a zobrazení hysterezní smyčky.

Zkoumaný materiál je vystaven definovanému elektromagnetickému poli a následně je měřen magnetický indukční tok. Magnetické parametry materiálu jsou měřeny pomocí sinusové polarizace, které je dosaženo řídicím algoritmem, který kontroluje tvar sekundárního signálu (sinusové napětí) na jehož základě modifikuje primární signál (proud).

Pro měření magnetických vlastností musí být vzorek materiálu vhodně připraven a vystaven předem definovanému magnetickému poli ve vhodném systému cívek.



Obr. 10: Hysterezigraf pro měření magnetických vlastností MRE

5.2 Měření síly (tahová zkouška)

Mezi základní metody pro hodnocení materiálů z hlediska jejich mechanických vlastností patří tahová zkouška. Tahová zkouška spočívá v mechanickém namáhání zkušební tělesa o určitých rozměrech, konkrétně namáhání v tahu, při kterém je zaznamenávána síla, kterou těleso působí proti danému namáhání. Toto namáhání způsobuje deformaci (prodloužení) zkušební tělesa, tedy změnu rozměrů. Zaznamenává se i tato deformace.

Při prodloužení tělesa se změna jeho délky definuje jako poměrné prodloužení ε (–) [34]:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{l - l_0}{l_0}, \quad (8)$$

kde l_0 (mm) je výchozí délka zkušební tělesa a l (mm) je jeho délka po natažení.

Parametrem popisujícím mechanické napětí zkušební vzorku je tzv. normálové napětí, které se vztahuje k deformované ploše [35]:

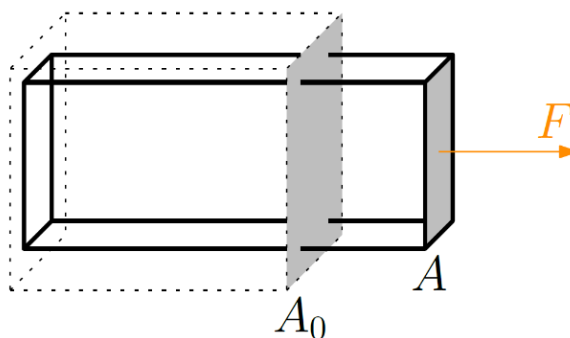
$$\sigma = \frac{F}{A}, \quad (9)$$

kde F (N) je síla na normálovou plochu A (m²).

Dále lze definovat normálové smluvní (Kirchhoffovo) napětí, které je počítáno na nedeformovanou plochu (průřez) zkušební tělesa [35]:

$$\sigma_0 = \frac{F}{A_0}, \quad (10)$$

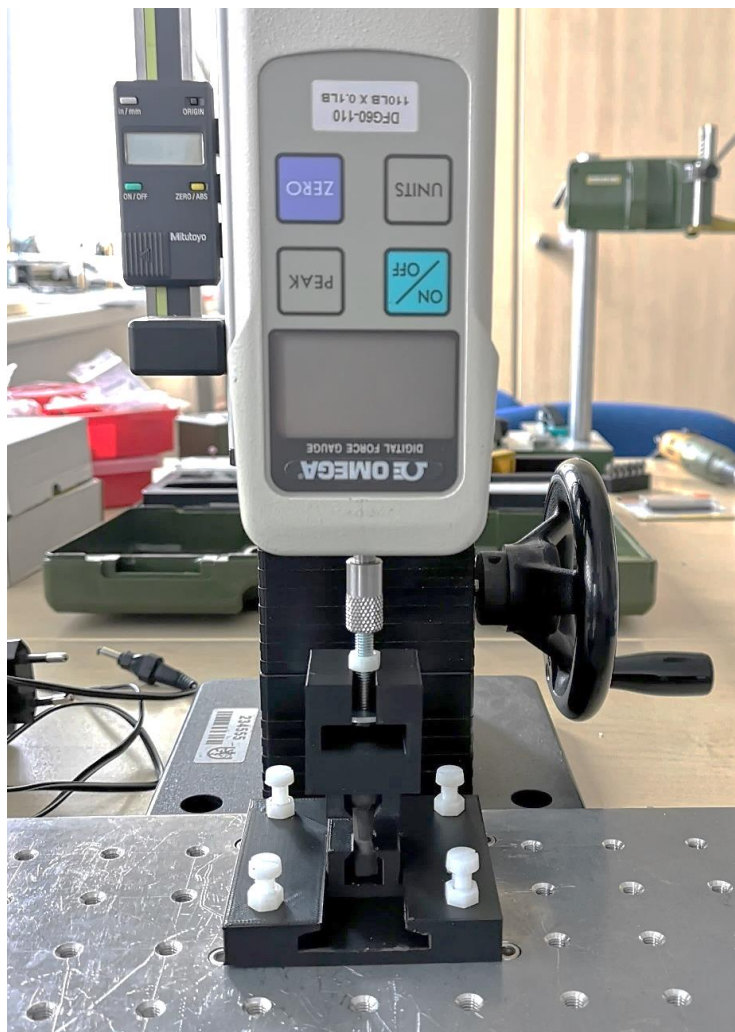
kde A_0 (m²) je původní (nedeformovaná) plocha zkušební tělesa.



Obr. 11: Znárodnění namáhání zkušební tělesa [35]

5.2.1 Použitý přístroj

Pro provedení tahové zkoušky vzorků byl použit digitální siloměr *OMEGA* (rozsah do 5 N) pro záznam odpovídajících sil pro daná prodloužení. Průměry vzorků byly změřeny pomocí digitálního posuvného měřítka.



Obr. 12: Měření vzorku MRE pomocí siloměru (vlevo nahoře je měřič posunutí)

5.3 Indukované napětí transformátoru

Princip transformátoru je založen na Faradayově zákoně elektromagnetické indukce (změna magnetického toku, způsobená primárním vinutím, vytváří indukované napětí na sekundárním vinutí úměrné právě této změně) a jeho funkcí je přeměna střídavého napětí. Faradayův zákon elektromagnetické indukce dle [36] zní:

$$u_i = -\frac{d\phi}{dt}, \quad (11)$$

kde u_i (V) je indukované napětí, ϕ (Wb) je magnetický indukční tok.

Záporné znaménko ve vzorci vysvětluje Lenzův zákon, který říká, že směr proudu, který se indukuje v uzavřeném obvodu, je takový, aby svým magnetickým polem působil proti změně magnetického indukčního toku, která ho vyvolala [36][37].

U transformátoru je přivedeno střídavé napětí na primární vinutí, což vyvolá proměnný magnetický tok jeho jádrem, které tvoří magnetický obvod transformátoru, a následně dochází k indukci napětí na sekundárním vinutí.

Vztahem mezi veličinami primárního a sekundárního vinutí je tzv. převod transformátoru (někdy také převodový poměr) p [37]:

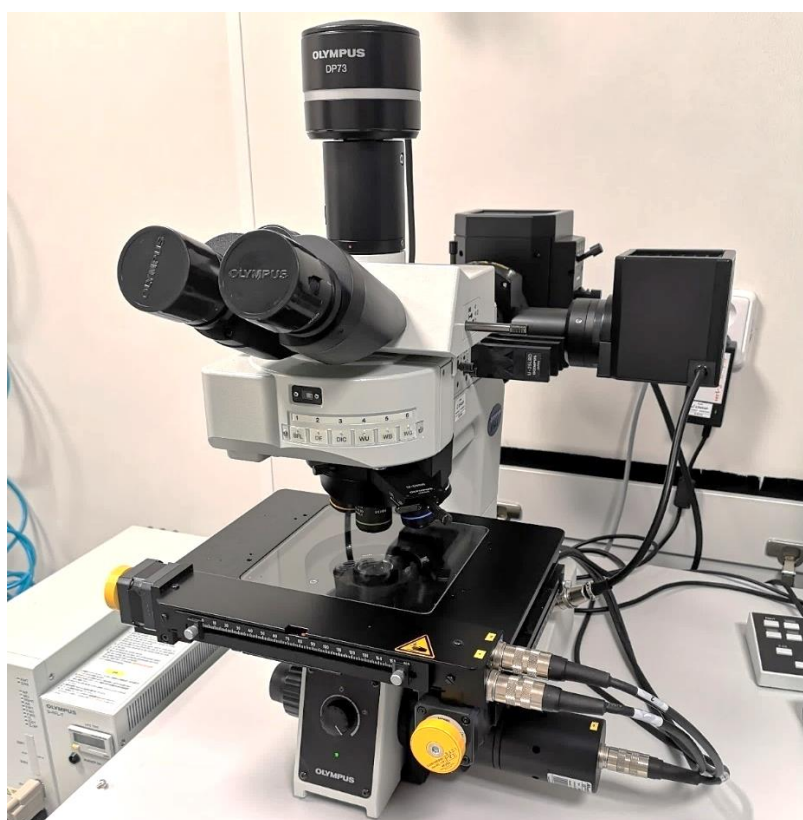
$$p = \frac{N_1}{N_2} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1}, \quad (12)$$

kde N je počet závitů vinutí, U (V) je napětí, I (A) proud; index 1 je pro primární vinutí, index 2 pro sekundární vinutí.

Indukované napětí na sekundárním vinutí je tedy závislé na počtu závitů cívky – vyššího indukovaného napětí dosáhneme větším počtem závitů. [37]

5.4 Fluorescenční mikroskopie

Snímky vzorků byly pořízeny na inspekčním mikroskopu Olympus MX51 s nastaveným pozorovacím módem UV-VIS a zdrojem UV záření.



Obr. 13: inspekční mikroskop Olympus MX51

PRAKTICKÁ ČÁST

6 Příprava vzorků MRE

Pro charakterizaci MRE bylo vytvořeno více vzorků – s rozdílným plnivem, tedy s použitými kovovými částicemi a s různým plněním částic. Z kovových částic byly použité železné (Fe85Si15) a neodymové (NdFeB). U všech vzorků byla vyrobena izotropní i anizotropní varianta. Výsledný tvar vzorků odpovídá jejich následnému použití pro měření a je dán 3D vytištěnými formami pro vzorky na měření magnetických vlastností, mechanických vlastností a voxely.

V následující tabulce jsou zobrazeny všechny vzorky MRE, které byly v rámci této práce měřeny. Pro snazší orientaci a přehlednost byly jednotlivé vzorky pojmenovány a barevně odlišeny (toto označení vzorků je používáno v rámci celé práce u naměřených dat a grafů).

Stejnou barvou jsou označeny vzorky obsahující stejný materiál částic a stejným plněním, odstín barvy (světlá/tmavá) pak rozlišuje izotropní a anizotropní variantu.

Izotropní a anizotropní vzorky jsou označeny zkráceně jako „iso“ a „aniso“, zkratka „zmag.“ u neodymových vzorků značí použití zmagnetovaných částic NdFeB.

Uvedeným procentuálním plněním částic je myšlen hmotnostní podíl z celkové připravené směsi MRE.

Tab. 1: Přehled vytvořených vzorků MRE

Vzorek	MRE iso	MRE aniso	HeavyM iso	HeavyM aniso	Nd iso	Nd aniso	Nd zmag. iso	Nd zmag. aniso
matrice	Silikon Dragon Skin FX Pro		Silikon Psycho Paint		Silikon Dragon Skin FX Pro		Silikon Dragon Skin FX Pro	
částice	Fe85Si15				NdFeB			
obsah částic	56 %	56 %	80 %	80 %	56 %	56 %	56 %	56 %

6.1 Použité materiály

Hlavními složkami, které byly použité na výrobu MRE vzorků jsou silikon pro vytvoření nosné složky kompozitní struktury MRE a kovové (magnetické) částice s funkcí plniva. Dále bylo používáno ředidlo, kterým se výsledná emulze silikonu a částic naředila pro lepší tečení při lití do forem, a rozpouštědlo pro silikon u HeavyM vzorků.

Základem pro vytvoření vzorků MRE byly silikony od výrobce Smooth-On, a to konkrétně produkty:

- *Dragon Skin™ FX-Pro™* – pro vzorky MRE, Nd a Nd zmag.
- *Dragon Skin™ 10 Fast* – pro silikonové voxely
- *Psycho Paint™* – pro vzorky HeavyM

Dragon Skin™ FX-Pro™ je měkký dvousložkový silikon (třída tvrdosti Shore 2A) s nízkou viskozitou. Tuhnutí u něj začíná po 10 až 12 minutách od spojení složek A a B (1A : 1B) s následným rychlým vytvrzením v čase přibližně 40 minut při pokojové teplotě [38].

Dragon Skin™ 10 Fast je oproti *FX-Pro™* pevnější, míchá se opět v poměru složek 1A : 1B (objemovém či hmotnostním) a tuhne přibližně hodinu při pokojové teplotě. Tento silikon navíc nevykazuje téměř žádnou smrštivost po vytvrzení. U tohoto silikonu je po smíchání doporučeno vakuování pro redukci vzduchových bublin [39].

Psycho Paint™ je dvousložkový průhledný silikon s větší viskozitou, pro jeho zředění bylo proto použito rozpouštědlo *NOVOCS™*. Tuhnutí trvá při pokojové teplotě zhruba 2 hodiny, po přidání ředidla tento čas ovšem mnohonásobně narůstá [40].

Plnivem v kompozitní struktuře MRE jsou kovové (magnetické) částice. Pro vzorky byly použité dva typy mikročástic v práškové podobě, a to železné (Fe85Si15) a neodymové (NdFeB). Pro vzorky byly navíc použité i různé hmotnostní podíly těchto částic (56 % a 80 %).

6.2 Postup přípravy MRE

Při přípravě všech vzorků MRE byl dodržován následující postup. Jako první se do kádinky odvážila část A daného silikonu (např. *Dragon Skin™ FX-Pro™*) a k ní se navázil požadovaný obsah částic (pro 56% nebo 80% plnění). Tyto dvě složky se řádně promíchaly a následně byla přidána část B silikonu v poměru 1A : 1B (u vzorků HeavyM poměr 1A :1B : 1NOVOCS), opět se všechny složky důkladně promíchaly. Pro lepší tečení bylo přidáno i ředidlo (*Thinner*). V dalším kroku se výsledná směs „vyvakuovala“ ve vakuové nádobě (při tlaku nižším než -80 kPa) pro redukci vzduchových bublin ve vytvrzeném MRE (tento krok nebyl proveden u vzorků HeavyM a Nd zmag. kvůli sedimentaci částic).

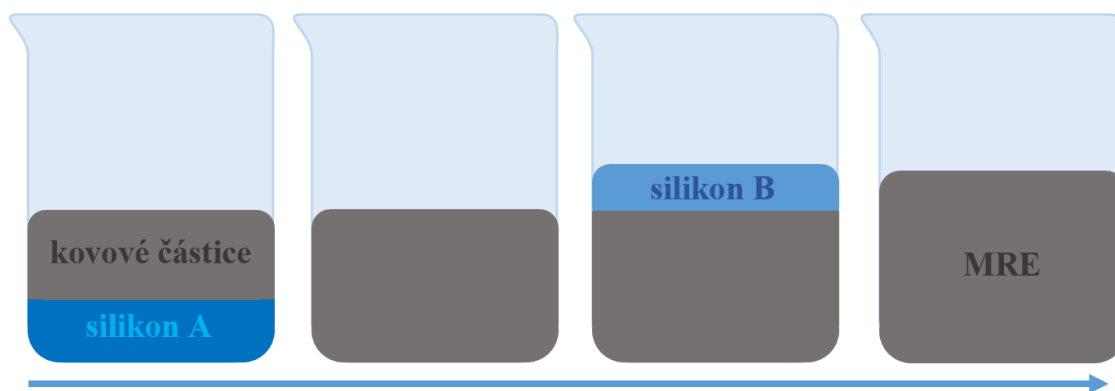
Následně byla tekutá směs MRE odlita do připravených forem tlakovým litím (přes injekční stříkačku připojenou k tlakové nádobě). U forem byl proveden nástřik pomocí silikonového separátoru (Easy-Release 200) pro snadnější vyjmutí vytvrzených vzorků

z forem. Vzorky byly ponechány ve formách po dobu tuhnutí použitého silikonu a následně vyjmuty z forem.



Obr. 14: Příprava před odlitím MRE vzorků v laboratoři (vlevo), tuhnutí vzorku v magnetickém obvodu (vpravo)

Příprava všech izotropních vzorků MRE byla provedena způsobem popsáným výše s volným tuhnutím vzorku ve formě při pokojové teplotě, naznačena je pro přehled na následujícím obrázku.



Obr. 15: Postup přípravy MRE (zleva): navážení části A silikonu a kovových částic, smísení, navážení části B silikonu, smísení (výsledná směs MRE)

U anizotropních vzorků se postup lišil pouze v jednom kroku – forma s odlitým MRE byla vložena do připraveného magnetického obvodu, kde každý vzorek tuhnul přibližně jednu hodinu. Byly naměřeny hodnoty magnetické indukce, při které byly jednotlivé vzorky orientovány (měřeno uprostřed těsně pod vzorkem v připraveném otvoru ve formě).

Tab. 2: Naměřená magnetická indukce v obvodu při tuhnutí anizotropních vzorků (malých a velkých vzorků a voxelů)

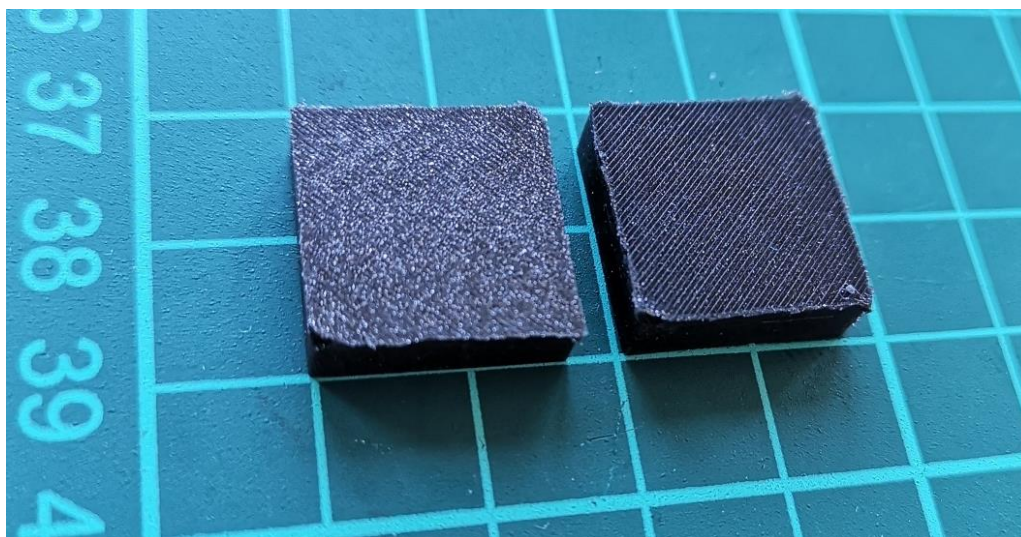
Vzorek	MRE	MRE (velký)	HeavyM	HeavyM (velký)	Nd	Nd (velký)	Nd zmag.	MRE voxelů
B (mT)	129,0	44,0	124,0	45,0	105,0	42,0	105,0	136,9

6.3 Připravené vzorky MRE

Byly připraveny celkem tři typy vzorků MRE na základě jejich dalšího použití v rámci této práce – vzorky pro měření magnetických vlastností (použité i pro mikroskopii), vzorky pro měření mechanických vlastností a voxelů. Tyto vzorky byly foceny pro porovnání na podložce s mřížkou 1 x 1 cm.

Vzorky pro měření magnetických vlastností

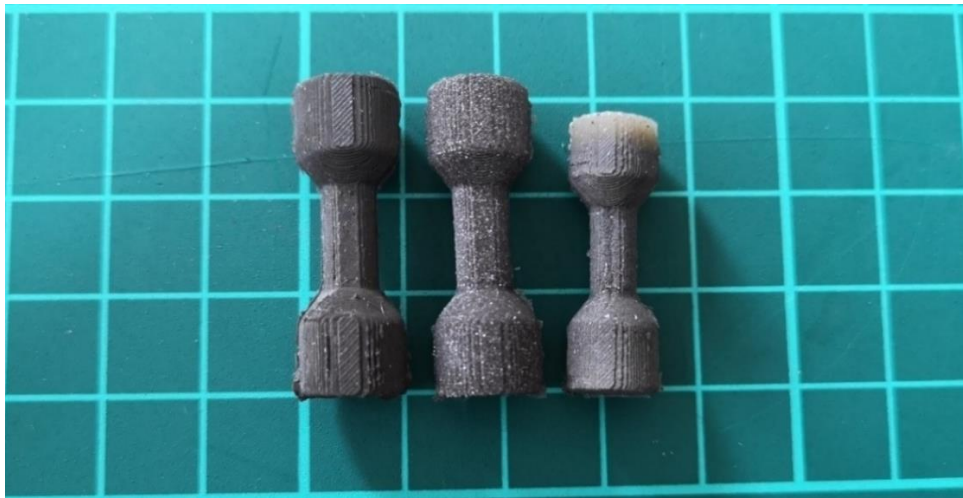
Rozměry vzorků pro měření magnetických vlastností byly uzpůsobeny měření na hysterezigrafu tak, aby bylo možné je vložit do měřicí cívky (17 x 17 x 5 mm). Tvar těchto vzorků je jednoduchý kvádrový.



Obr. 16: Vzorek MRE s neodymovými částicemi (vlevo) a s železnými částicemi (vpravo)

Vzorky pro měření mechanických vlastností

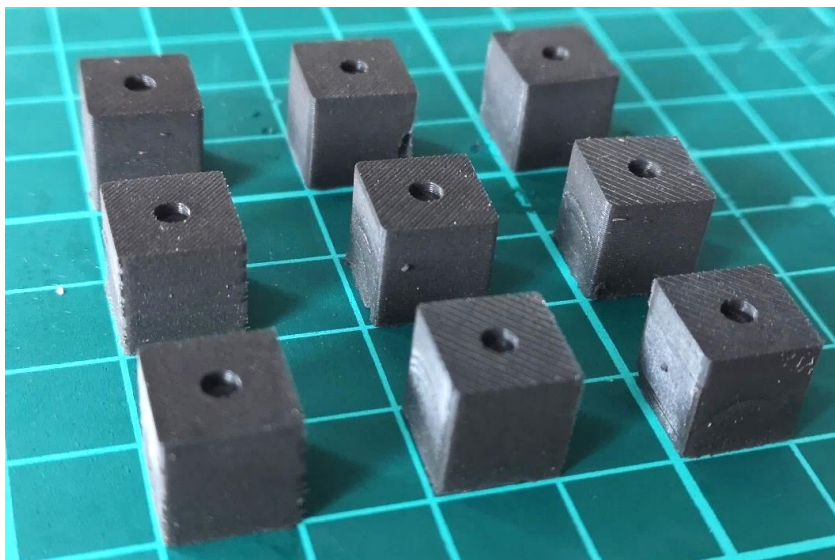
Tvar vzorků pro měření mechanických vlastností MRE byl zvolen válcový se zúženým středem (právě tato část byla deformována). Jelikož tyto vzorky tuhly ve formách „nastojato“ došlo u vzorků HeavyM ke značné sedimentaci, která je patrná na obrázku níže (vrchní část vzorku je oproti zbytku velmi světlá, v této části je téměř pouze silikon). Zjevný je rozdíl v rozměrech u vzorku HeavyM. Při syntéze těchto vzorků bylo zjištěno, že po vytvrzení dochází ke smrštění tohoto materiálu, což je pravděpodobně způsobeno větším podílem použitého ředidla, které se při vytvrzení ze vzorku odpaří.



Obr. 17: Vzorek MRE, Nd a HeavyM (zleva)

Voxely

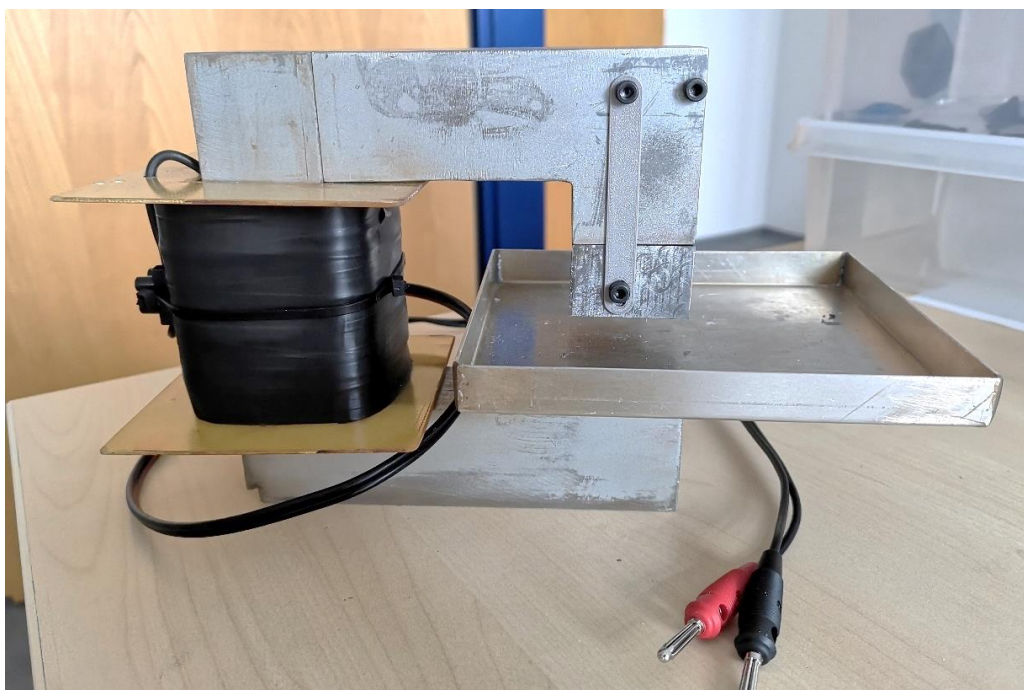
Pro vzorky voxelů byl zvolen rozměr 1 x 1 x 1 cm. Byly odlity celkem tři varianty voxelů, konkrétně silikonové, izotropní MRE a anizotropní MRE.



Obr. 18: Vzorky MRE voxelů

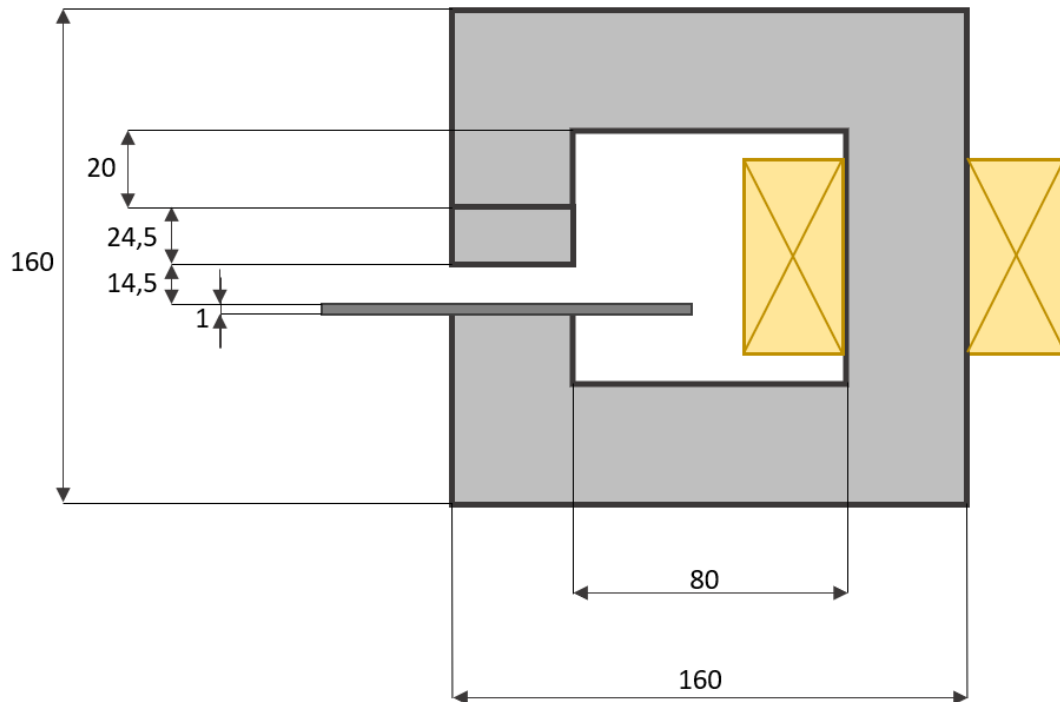
7 Magnetický obvod pro výrobu anizotropních vzorků

Pro syntézu anizotropních vzorků MRE bylo nutné připravit magnetický obvod pro jejich tuhnutí za působení magnetického pole. Zvolen byl jednoduchý magnetický obvod ve tvaru písmena C s vnějšími rozměry jádra 160 x 160 mm a průřezem 40 x 40 mm, vzduchová mezera (39 mm) u něj sloužila pro vložení forem se vzorky. Tento obvod byl vyroben Markem Seltenhoferem právě pro účely výroby MRE. Výroba nového obvodu tedy nebyla nutná, protože zmíněný obvod splňoval požadované podmínky pro výrobu vzorků MRE dle návrhu. Pro výrobu menších vzorků byl upraven (vzorky pro měření magnetických vlastností a voxely) připevněním nástavce k obvodu s rozměry 24,5 x 40 x 40 mm (v x š x h). Velké vzorky (vzorky pro tahovou zkoušku) byly do obvodu vkládány bez tohoto nástavce, jejich tuhnutí totiž probíhalo v poloze „nastojato“ pro orientaci vzorků ve směru jejich následného namáhání při tahové zkoušce.



Obr. 19: Magnetický obvod pro syntézu anizotropních vzorků MRE

Magnetický obvod sestává ze železného jádra s relativní permeabilitou $\mu_r = 1000$ (přibližná hodnota) a cívky s počtem závitů $N = 1500$. Magnetický obvod není v provozním stavu přesycený, nebylo jej tedy nutné modelovat s nelineární B-H charakteristikou. Rozměry magnetického obvodu jsou znázorněny na Obr. 20. Vnější poloměr cívky je 40 mm, vnitřní poloměr 20 mm, výška cívky je 70 mm.



Obr. 20: Rozměry jádra magnetického obvodu

7.1 Model magnetického obvodu

Model magnetického obvodu byl vytvořen v programu *COMSOL Multiphysics*. Modelováno bylo magnetické pole, které působilo na vzorek při vytvrzování v magnetickém obvodu. Jako první bylo nutné nakreslit geometrii obvodu s odpovídajícími rozměry. Oblastmi modelu byly: magnetický obvod (nástavec), cívka, forma, vzorek MRE a fiktivní (vzduchová) obálka, do které byl model umístěn.

Každé oblasti byl poté přiřazen materiál, a to následovně:

- magnetický obvod (nástavec): železo s permeabilitou $\mu_r = 1000$
- vzorek MRE: založen nový materiál se zvolenou permeabilitou $\mu_r = 2$
- ostatní oblasti: vzduch s permeabilitou $\mu_r = 1$

Rozložení magnetického pole je pak v jednotlivých oblastech popsáno následujícími rovnicemi [41]. Pro oblast cívky, kterou protéká proud, platí první Maxwellova rovnice, která má tvar:

$$\operatorname{rot} \left(\frac{1}{\mu} \operatorname{rot} \mathbf{A} \right) = \mathbf{J}_{\text{ext}}, \quad (13)$$

kde \mathbf{A} je magnetický vektorový potenciál a \mathbf{J}_{ext} je externí proudová hustota.

V ostatních oblastech je proud nulový, proudová hustota je tedy také nulová:

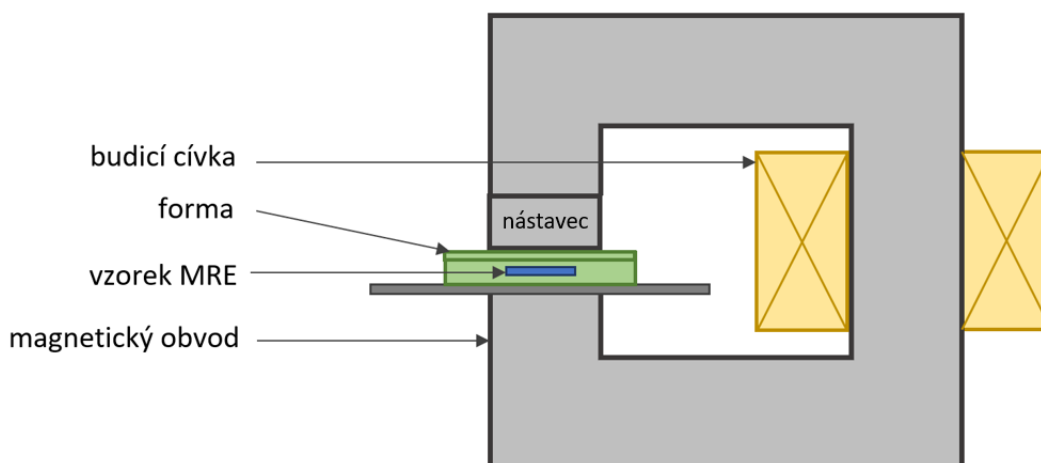
$$\operatorname{rot}\left(\frac{1}{\mu}\operatorname{rot}\mathbf{A}\right) = 0, \quad (14)$$

Dále bylo nutné definovat okrajové podmínky na hranicích oblastí. Pro definiční oblasti platí Dirichletova podmínka:

$$\mathbf{A} = 0. \quad (15)$$

Tímto je vyřešeno rozložení magnetického potenciálu \mathbf{A} v definované oblasti a z něj je pak možné vypočítat magnetickou indukci v jakémkoliv bodě pomocí vztahu:

$$\mathbf{B} = \operatorname{rot}\mathbf{A}. \quad (16)$$



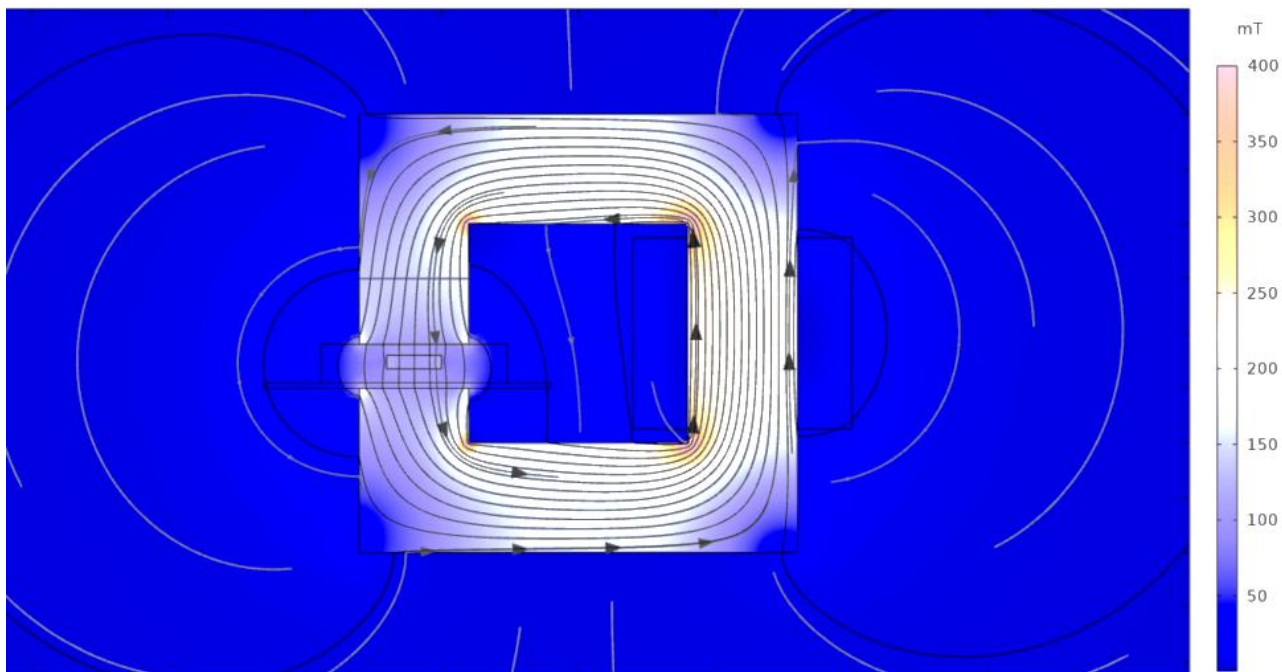
Obr. 21: Znárodnění jednotlivých částí magnetického obvodu s vloženým vzorkem MRE

Po přiřazení materiálů oblastem bylo potřeba nadefinovat vlastnosti cívky. Byl nastaven počet závitů $N = 1500$ a proud cívkou $I = 0,82$ A (kladný proud pro levou část cívky v modelu a záporný pro pravou část – podle směru toku proudu, který teče kolem jádra).

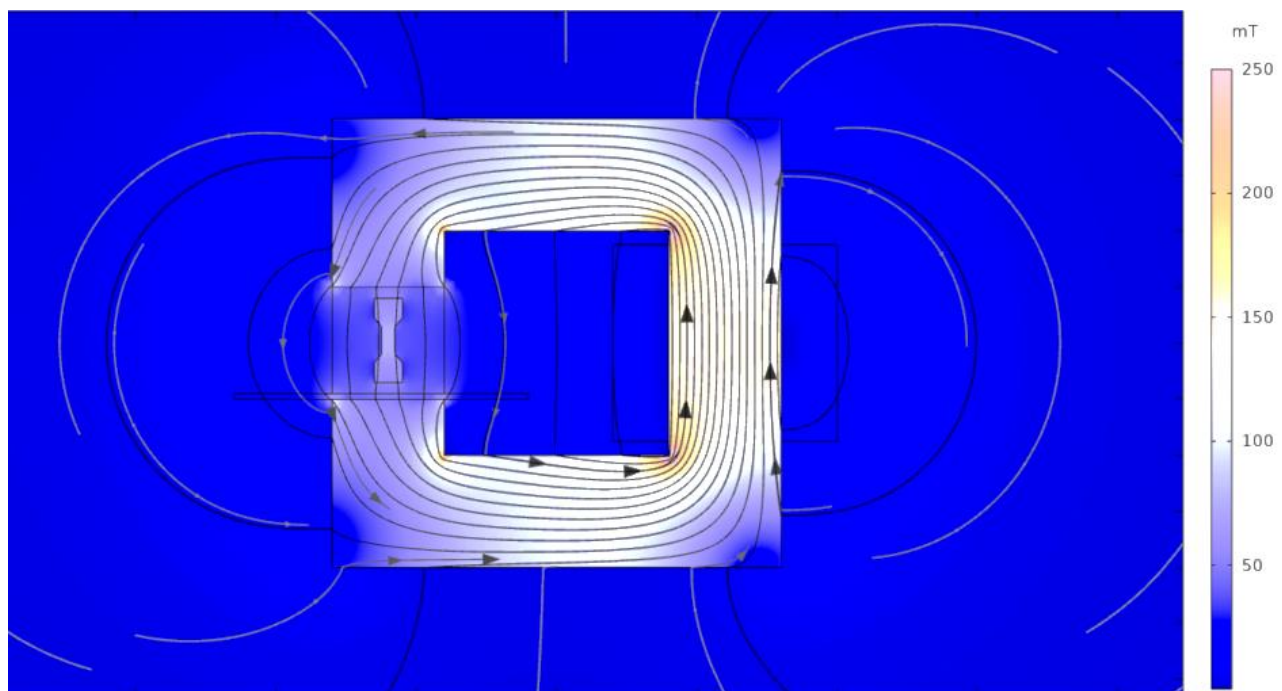
Byla také provedena konvergenční analýza modelu, která má za úkol co nevíce zpřesnit výsledné výpočty v modelu. Tato analýza byla provedena pro velikost fiktivní vzduchové obálky kolem modelu a následně i pro výpočetní síť modelu.

Ve výsledném modelu byly nakonec provedeny výpočty pro rozložení magnetické indukce v magnetickém obvodu s vloženým malým a velkým vzorkem MRE a v jeho okolí. Jak je z Obr. 22 a 23 patrné, magnetické indukční čáry se uzavírají především v jádře obvodu a procházejí vzorkem MRE, kde je vytvořeno téměř homogenní pole (ideální pro výslednou

anizotropní strukturu). Vypočítaná magnetická indukce v místě, kde byla následně měřena při tuhnutí, je pro obvod s malým vzorkem MRE rovna $B = 125 \text{ mT}$ a s velkým vzorkem $B = 50 \text{ mT}$, což odpovídá reálným naměřeným hodnotám teslametrem při tuhnutí, tedy $B = 129 \text{ mT}$ u malého vzorku a $B = 45 \text{ mT}$ u velkého.



Obr. 22: Výsledný model rozložení magnetické indukce při tuhnutí malých vzorků MRE (vpravo znázorněna škála v mT)



Obr. 23: Výsledný model rozložení magnetické indukce při tuhnutí velkých vzorků MRE (vpravo znázorněna škála v mT)

8 Příprava forem

Pro odlití každého typu vzorků bylo nutné vytvořit formu. Po nadefinování potřebných rozměrů a typu vzorku byly vytvořeny příslušné počítačové modely.

Návrh forem byl proveden v 3D modelovacím softwaru *SolidWorks 2020*. Výstupem z tohoto programu byl STL soubor (3D model) dané formy, který byl následně převeden v programu *PrusaSlicer* na G-Code („rozřezání“ modelu na vrstvy, po kterých se bude tisknout), který obsahuje instrukce pro 3D tiskárnu.

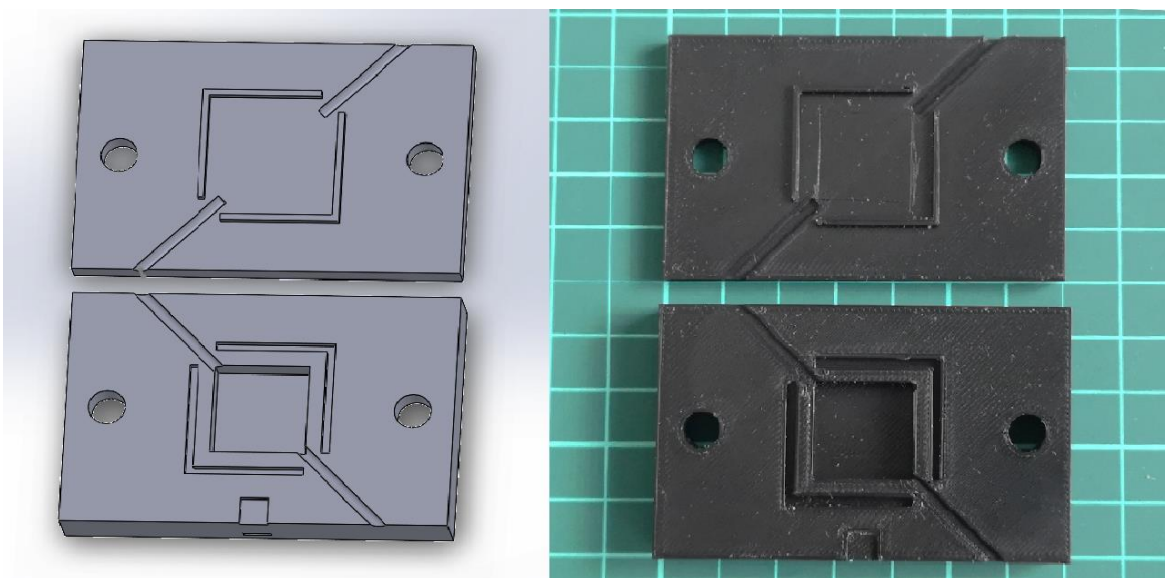
Samotný tisk forem byl proveden na FFF (z ang. Fused Filament Fabrication, tedy tisk z filamentu) 3D tiskárně *Original Prusa MINI+*, použitý byl filament PLA.

Na každé z forem byly vytvořeny otvory pro šrouby, kterými se pevně připevnila spodní část formy k víku. Dále byl přidán úzký otvor pro vložení např. šroubováku pro snazší otevření formy po ztuhnutí vzorku. Formy měly ještě jeden podobný otvor, a to na vložení sondy teslametru pro měření magnetické indukce při tuhnutí.

Formy se skládají ze dvou hlavních částí – spodní části pro odlití MRE a víka, nebo v případě vzorků pro tahovou zkoušku ze dvou symetrických částí. Pro tlakové lití (vsunutí injekce) byl ve formě vytvořen kanálek. Rozměry forem jsou uvedeny v příloze.

Forma pro vzorky k měření magnetických vlastností

Rozměry vzorku: 17 x 17 x 5 mm

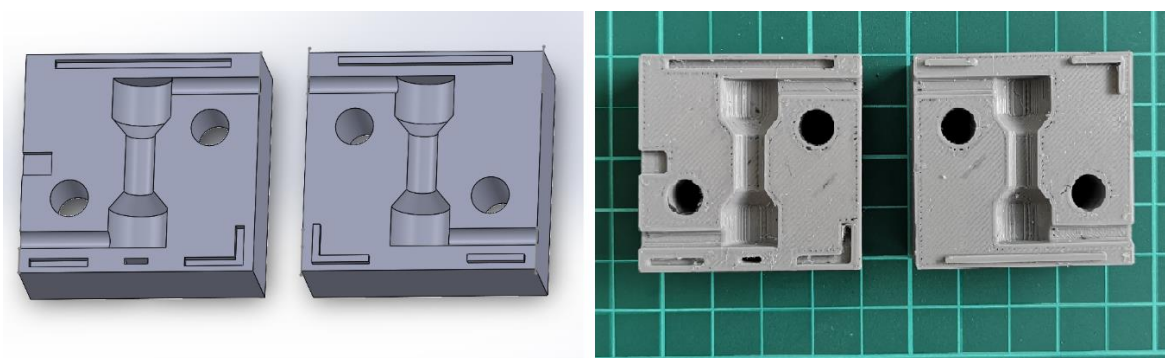


Obr. 24: Forma pro malé vzorky MRE (spodní část + víko)

Forma pro vzorky k měření mechanických vlastností

Rozměry vzorku:

- úchyty (horní a spodní část): 10 mm průměr, 7 mm délka
- deformovaná část (prostřední část): 5 mm průměr, 10 mm délka

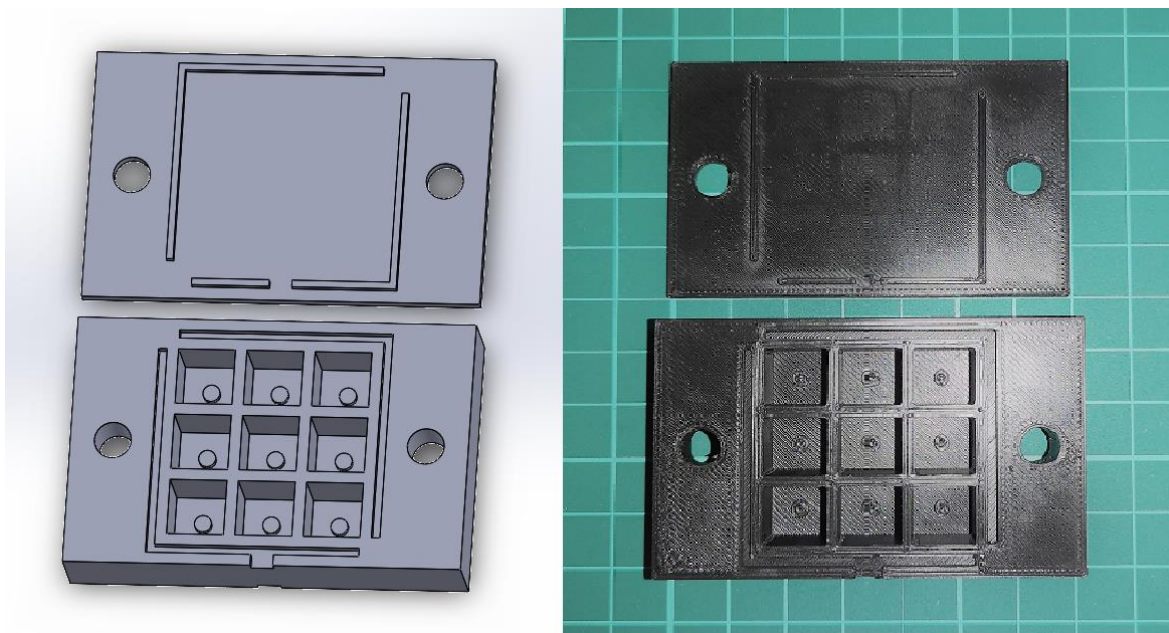


Obr. 25: Forma na vzorky MRE pro tahové zkoušky (levá + pravá polovina)

Forma pro vzorky VOXELY

Rozměry vzorku: 1 x 1 x 1 mm

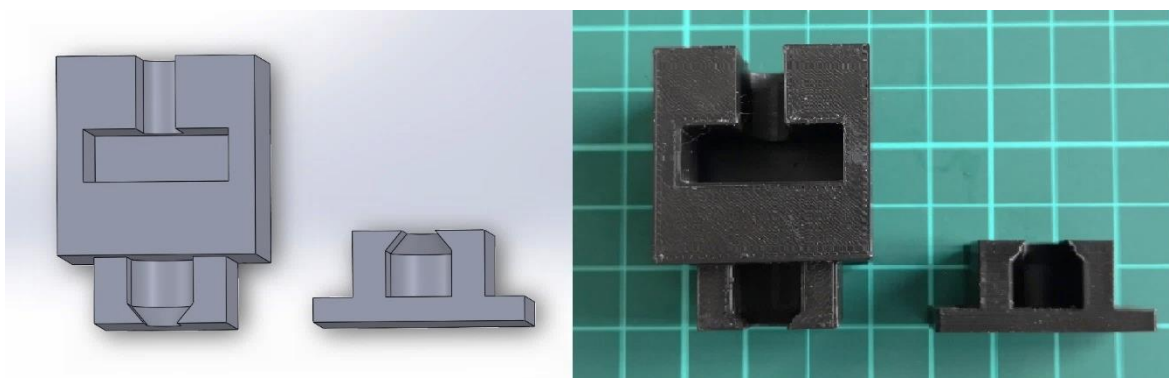
Forma pro voxely byla navržena tak, aby bylo možné odlít co nejvíce vzorků najednou. Omezující byly rozměry magnetického obvodu (40 x 40 mm), a tak bylo možné vytvořit formu pro celkem devět voxelů (3 x 3 voxely).



Obr. 26: Forma na voxely (spodní část + víko)

Uchycení pro vzorky pro tahovou zkoušku

Rozměry uchycení odpovídají rozměrově vzorkům pro tahovou zkoušku, navíc je zde i otvor na šroub pro připojení úchytu k siloměru.



Obr. 27: Úchyty vzorků pro tahovou zkoušku

9 Měření magnetických vlastností MRE

Pro zjištění magnetických vlastností připravených vzorků MRE bylo provedeno měření na hysterezigrafu (při laboratorní teplotě přibližně 22 °C). Pomocí tohoto zařízení byly zaznamenány kompletní hysterezní křivky B-H a J-H, tedy průběhy magnetické indukce \mathbf{B} v závislosti na intenzitě magnetického pole \mathbf{H} a křivka závislosti magnetické polarizace \mathbf{J} na intenzitě magnetického pole \mathbf{H} . Při měření na hysterezigrafu lze zjistit také základní parametry charakterizující magnetické materiály, konkrétně remanentní indukci B_r (T) či koercitivní sílu H_c (A/m).

Ze zaznamenaných křivek bylo dále možné zjistit relativní permeabilitu vzorků MRE pomocí výpočtu ze známých hodnot magnetické indukce a intenzity magnetického pole dle vzorce [42]:

$$\mathbf{B} = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \mathbf{H}. \quad (17)$$

Úpravou tohoto vzorce lze spočítat přímo relativní permeabilitu:

$$\mu_r = \frac{\mathbf{B}}{\mu_0 \cdot \mathbf{H}}. \quad (18)$$

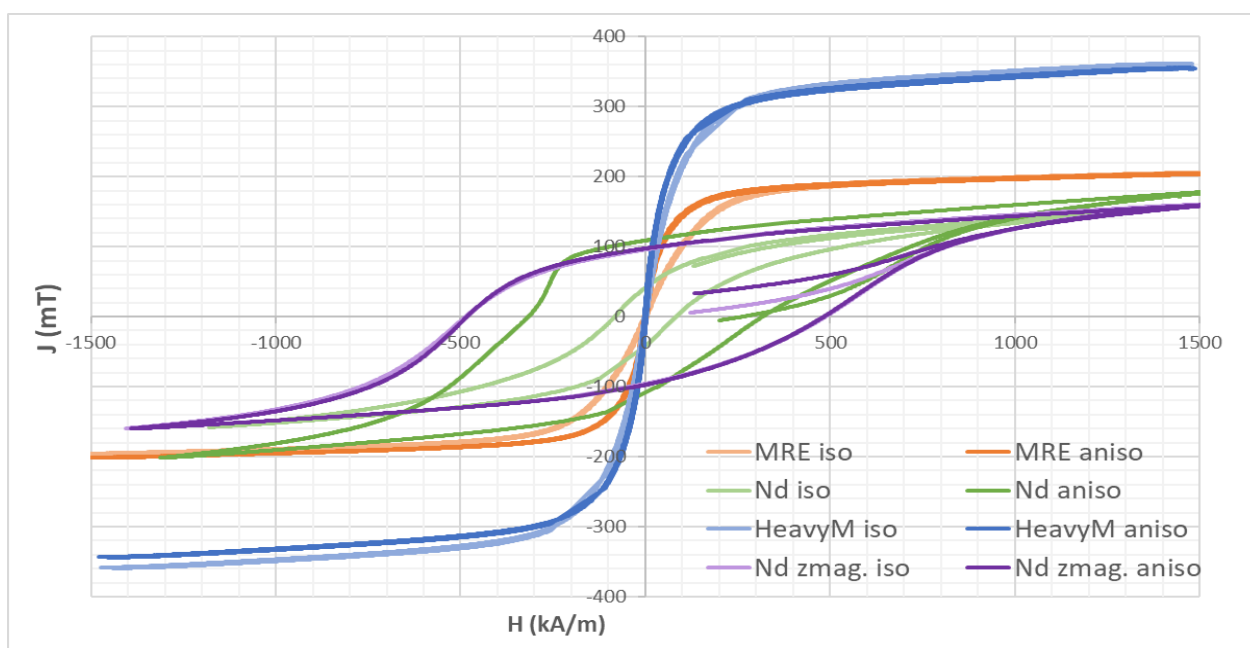
Cílem tohoto měření bylo zjistit relativní permeabilitu jednotlivých vzorků MRE, pomocí které lze tyto vzorky mezi sebou porovnat – konkrétně porovnáním rozdílů mezi izotropními a anizotropními vzorky a porovnáním podle použitých materiálů plniva, tedy magnetických částic (Fe₈₅Si₁₅, NdFeB zmagnetované, NdFeB nezmagnetované). Předpokladem pro vypočítané hodnoty permeability bylo to, že má anizotropní struktura vzorku vliv na zvýšení jeho permeability. Finální výpočet dynamické relativní permeability pro bod i byl proveden pomocí centrální diference, která je pro aproximaci dat přesnější:

$$\mu_{r,dyn} = \frac{\Delta B}{\mu_0 \cdot \Delta H} = \frac{B_{i+1} - B_{i-1}}{\mu_0 \cdot (H_{i+1} - H_{i-1})}. \quad (19)$$

Pro srovnání naměřených dat je na Obr. 28 zobrazena J-H křivka pro všechny vzorky změřené na hysterezigrafu (jak již bylo uvedeno u přípravy vzorků, pro přehlednost jsou průběhy pro stejný materiál vzorku vyznačeny stejnou barvou, izotropní a anizotropní uspořádání je odlišeno odstínem příslušné barvy).

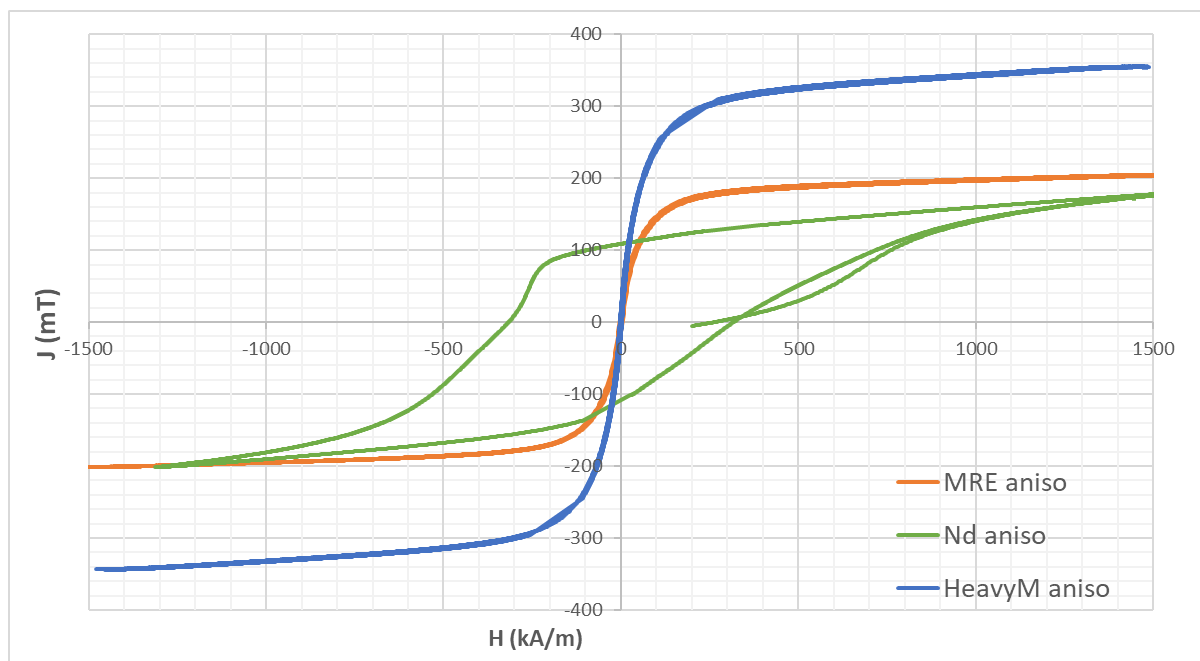
9.1 J-H charakteristiky vzorků

Z grafu (Obr. 28) je na první pohled patrný značný rozdíl mezi použitím železných částic (vzorky MRE a HeavyM) a neodymových částic. J-H křivka pro vzorky MRE a HeavyM je velmi úzká, což odpovídá použitému materiálu částic, neboť se jedná o magneticky měkký materiál, který lze snadno přemagnetovat. Naopak při použití neodymu, jako zástupce magneticky tvrdých materiálů, je J-H křivka pro vzorky s částicemi NdFeB výrazně širší než u MRE a HeavyM – pro jejich přemagnetování je tedy nutno dodat větší energii. Rozdíl mezi křivkami Nd zmag. iso a Nd zmag. aniso není téměř žádný – orientace částic tedy u nich nemá význam. Křivky nezačínají v počátku kvůli remanentní indukci vzorků.



Obr. 28: Porovnání J-H křivek jednotlivých vzorků MRE

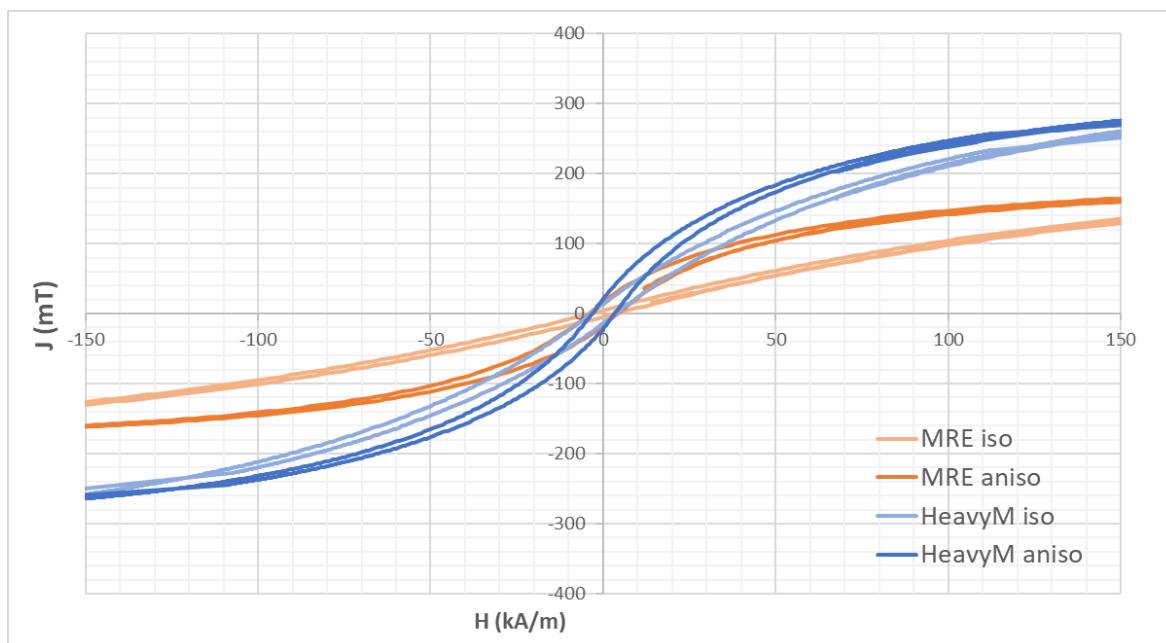
Tato práce se zabývá zjištěním parametrů především anizotropních magnetoreologických elastomerů, na Obr. 29 je tedy přehledové srovnání vzorků s anizotropní strukturou.



Obr. 29: Porovnání J-H křivek anizotropních vzorků

Na Obr. 30 je zobrazeno srovnání J-H křivek vzorků MRE (přibližný pohled) s různým plněním železných částic (MRE s 56% plněním Fe₈₅Si₁₅ a HeavyM s 80% plněním Fe₈₅Si₁₅). Je zde patrné, že u anizotropních vzorků dochází k jejich rychlejšímu sycení než u izotropních vzorků (strmější nárůst J-H křivky v oblasti počátku, tedy nízkých hodnot intenzity H). Tento jev ukazuje na to, že bude relativní permeabilita vyšší u anizotropních vzorků (relativní permeabilita je tečnou ke křivce prvotní magnetizace). Vzorky se železnými částicemi se obecně sytí rychleji než jiné magnetické materiály, u HeavyM je saturační magnetizace výrazně vyšší než u MRE. Rozdíl mezi izotropní a anizotropní variantou je v tomto ohledu nevýznamný.

Přesycení je nevýhodné u výkonových aplikací, využití MRE ale více směřuje do oblasti sensoriky. Při dalším zvyšování intenzity H je pak průběh J-H křivek téměř totožný. Rozdíl je také ve zmíněném plnění, kdy bylo u HeavyM vzorků dosaženo vyšších hodnot magnetické polarizace J než u vzorků MRE, což je přímo způsobeno větším množstvím částic, které HeavyM obsahuje a do nichž je ukládána energie při zmagnetování vzorku.

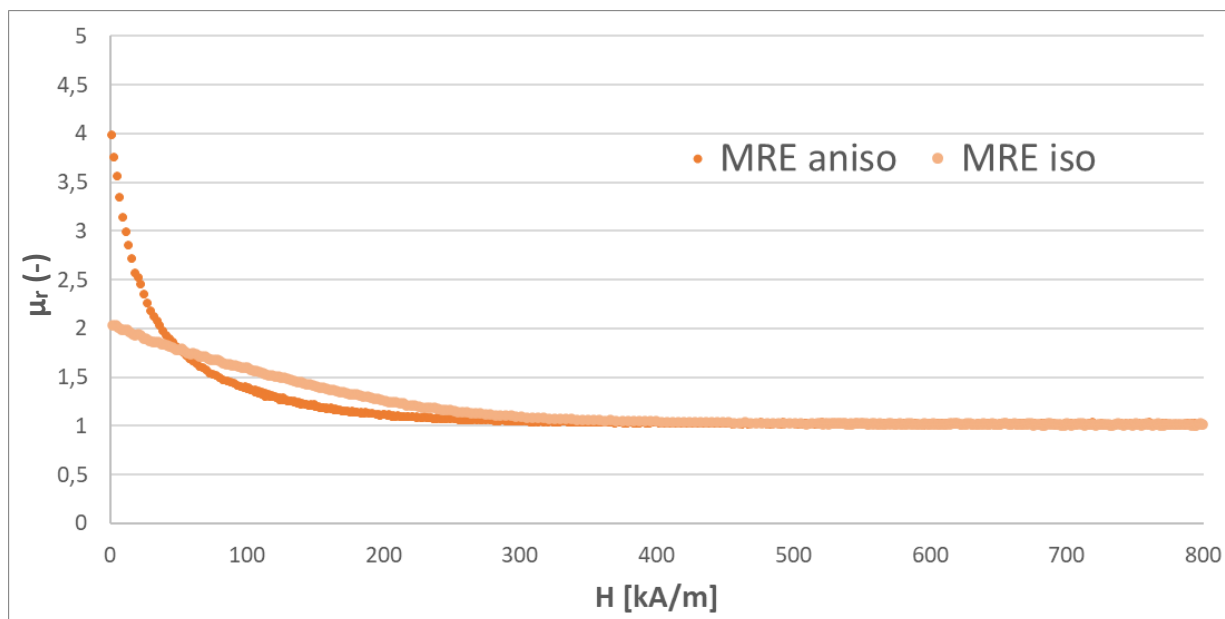


Obr. 30: Porovnání J-H křivek vzorků MRE s různým plněním železných částic

9.2 Relativní permeabilita vzorků

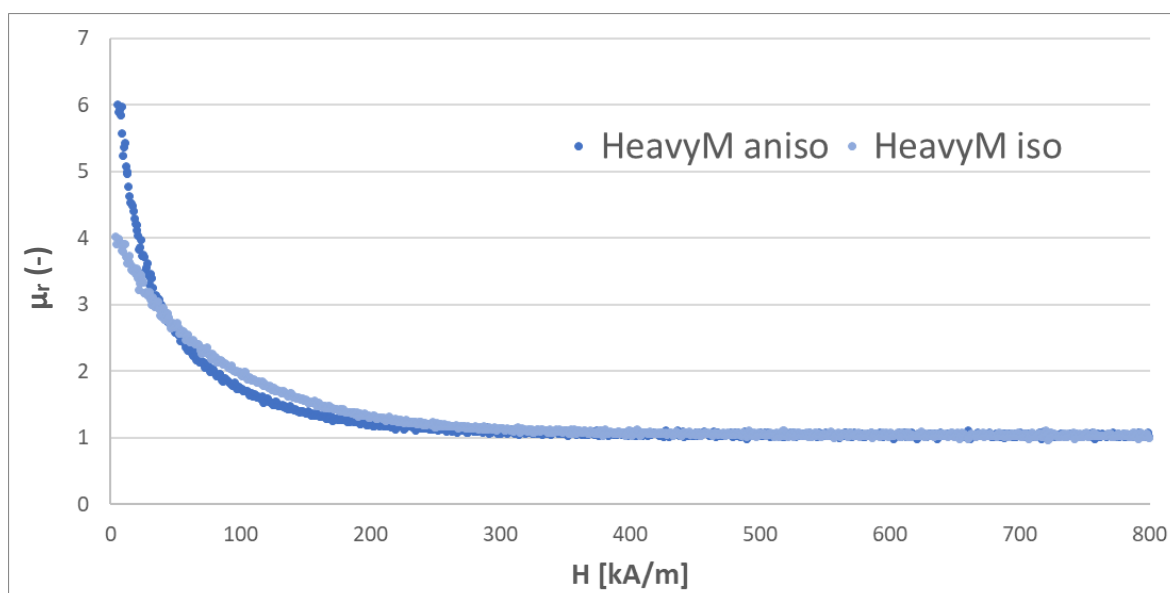
Pro porovnání relativních permeabilit vzorků MRE bylo nutné vypočítat tento parametr z odpovídajících B-H křivek. Jsou zde samostatně uvedeny relativní permeability podle materiálů plniva, tedy kovových částic, vždy pro izotropní a anizotropní variantu vzorku.

U vzorku izotropního MRE byla nejvyšší hodnota relativní permeability $\mu_r = 2$ (viz Obr. 31 – závislost relativní permeability na intenzitě magnetického pole), při zvyšování intenzity pak poklesla na $\mu_r = 1$ (odpovídá přesycení materiálu), stejně jako u vzorku anizotropního MRE, u kterého byla maximální zjištěná hodnota permeability oproti izotropnímu vzorku dvojnásobná, konkrétně $\mu_r = 4$.



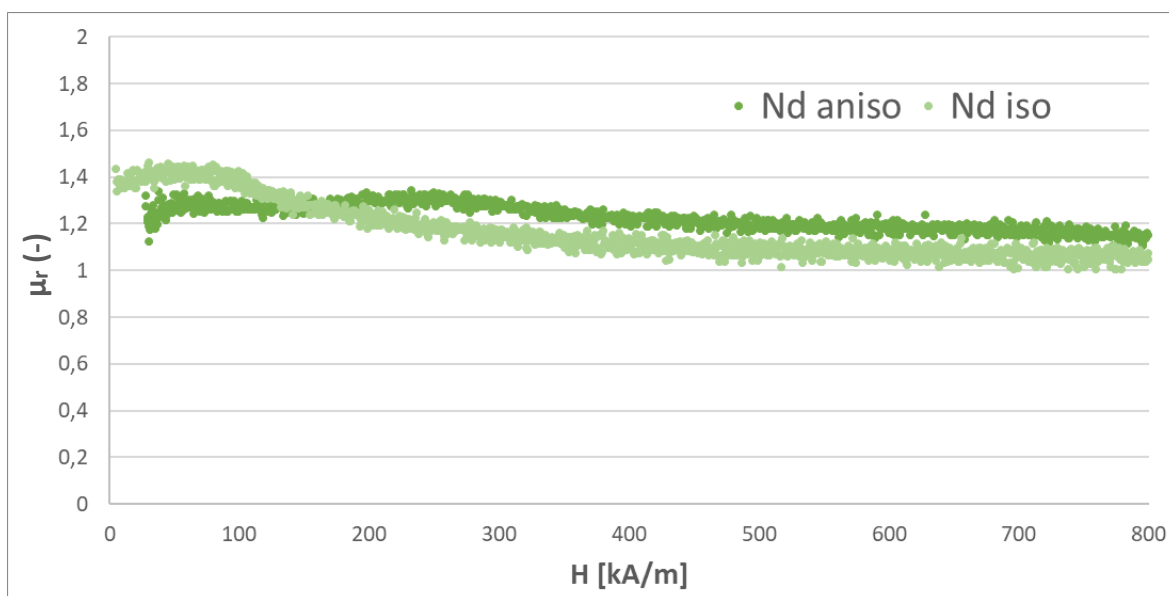
Obr. 31: Porovnání relativní permeability anizotropního a izotropního vzorku MRE

U izotropního i anizotropního vzorku HeavyM bylo v porovnání se vzorky MRE dosaženo vyšších hodnot relativní permeability – pro izotropní vzorek konkrétně $\mu_r = 4$, což je dvojnásobek hodnoty izotropního MRE, pro anizotropní HeavyM je $\mu_r = 6$. Tento nárůst relativní permeability je způsoben vyšším počtem kovových částic obsažených ve vzorcích HeavyM.



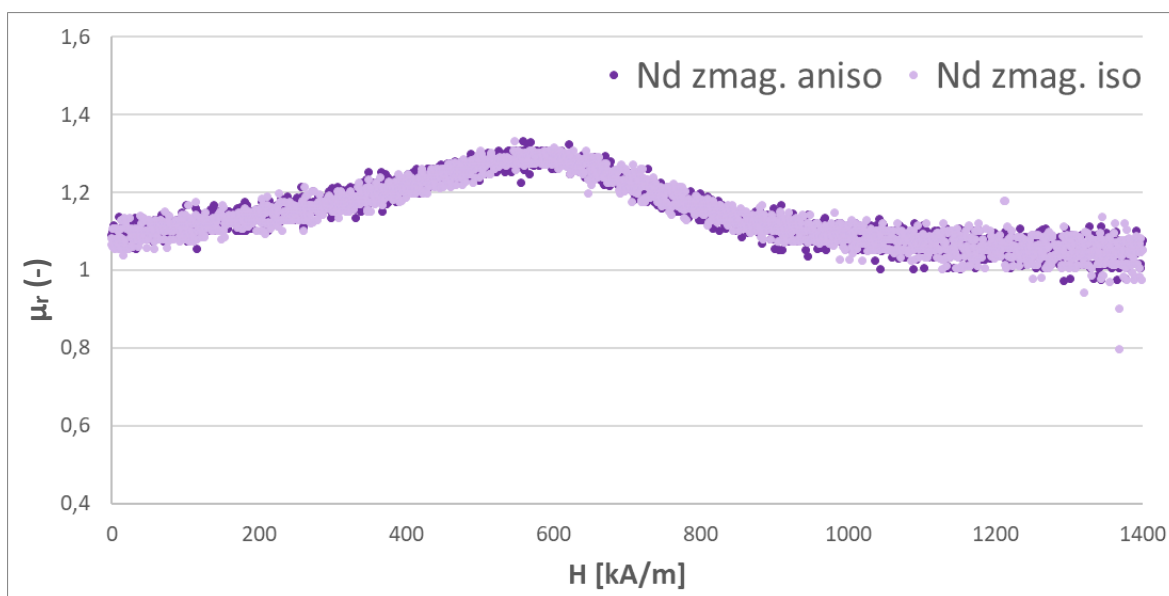
Obr. 32: Porovnání relativní permeability anizotropního a izotropního vzorku HeavyM

U vzorků s neodymovými částicemi je mezi izotropní a anizotropní variantou, oproti výše uvedeným vzorkům, minimální rozdíl. Oba typy vzorků mají při nulové intenzitě magnetického pole poměrně nízkou relativní permeabilitu. Hodnoty jsou blízké jedné, což odpovídá použitému materiálu, tedy neodymu.



Obr. 33: Porovnání relativní permeability anizotropního a izotropního vzorku Nd

Srovnání vzorků izotropního a anizotropního MRE se zmagnetovanými částicemi neodymu je podobné jako v předchozím případě – průběhy relativní permeability v závislosti na intenzitě magnetického pole jsou téměř totožné. Opět se hodnoty relativní permeability u obou vzorků pohybují kolem jedné.

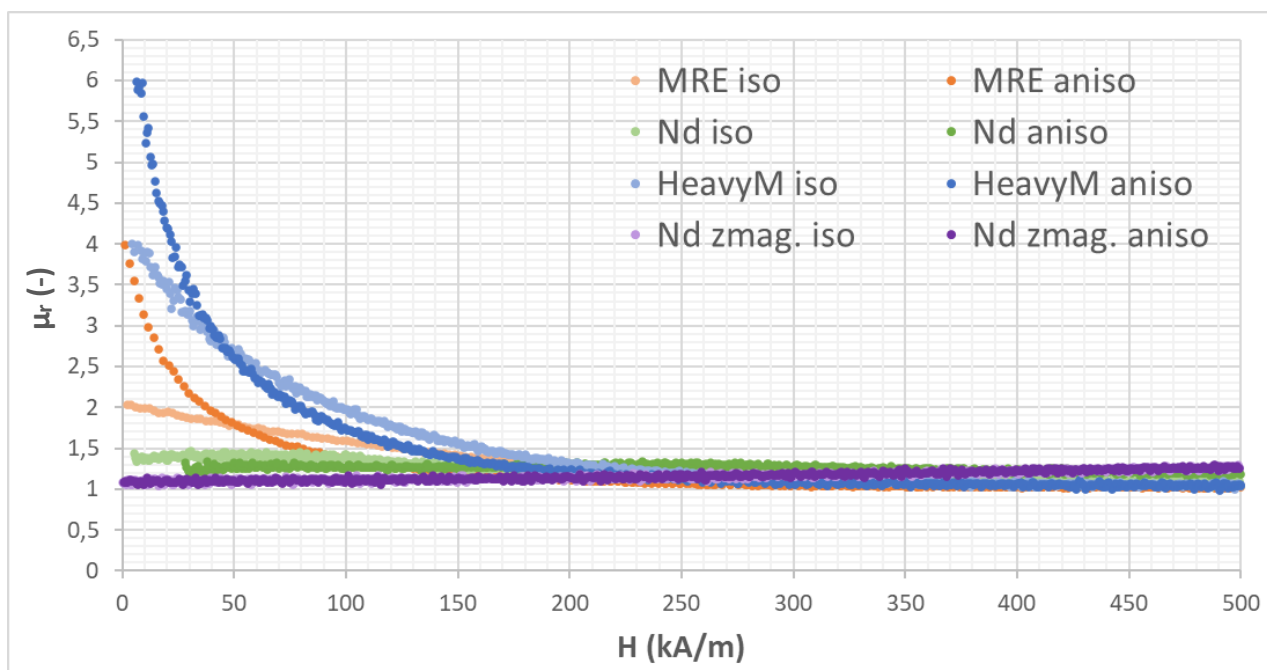


Obr. 34: Porovnání relativní permeability anizotropního a izotropního vzorku zmag. Nd

9.3 Porovnání relativní permeability vzorků

Z výše uvedených srovnání je patrné, že orientace vnitřní struktury, tedy kovových částic v silikonové matici, nemá téměř žádný vliv na relativní permeabilitu při použití neodymových částic. V případě použití zmagnetovaných i nezmagnetovaných neodymových částic bylo dosaženo velmi podobných průběhů s hodnotou relativní permeability přibližně rovné jedné, což odpovídá tabulkovým hodnotám pro neodymové permanentní magnety.

Z průběhů relativní permeability u vzorků obsahujících železné částice je velmi dobře patrný její nárůst v závislosti na orientaci vzorků. Toto zjištění potvrzuje, že se u anizotropních (orientovaných) vzorků MRE s železnými částicemi (MRE a HeavyM) dosahuje vyšších hodnot relativní permeability, navíc tato hodnota roste s vyšším podílem plniva (kovových částic). Větší hodnoty permeability znamenají nižší magnetický odpor R_m materiálu, což z něj dělá lepší magnetický vodič. Rozsah relativní permeability u MRE a HeavyM je rovněž vyšší (při malých hodnotách intenzity) než u vzorků s neodymem, jsou proto vhodnější pro senzorické aplikace. Vzorky s neodymem jsou vhodné například pro aktuátory díky své velké remanentní indukci (více reagují na změny magnetického pole).

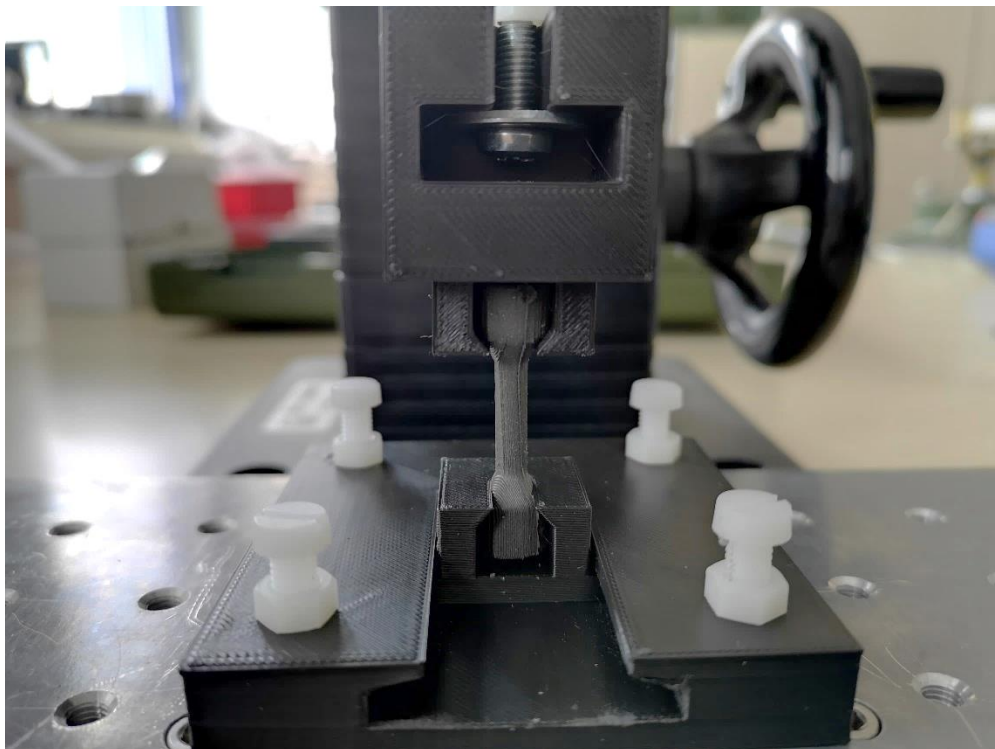


Obr. 35: Porovnání relativní permeability všech připravených vzorků MRE

10 Měření mechanických vlastností MRE

Pro zjištění mechanických vlastností MRE byla zvolena tahová zkouška, pro kterou byly připraveny izotropní a anizotropní vzorky s 56% plněním částic Fe85Si15 (MRE), s 80% plněním částic Fe85Si15 (HeavyM) a s 56% plněním částic NdFeB (Nd). Vzorky se zmagnetovanými částicemi NdFeB bohužel nebylo možné připravit z důvodu omezeného množství těchto částic. Z používaných typů vzorků pro tahové zkoušky byl vybrán typ zvaný „psí kost“ (z anglického „dog bone“) v oválném provedení.

Siloměr byl pomocí 3D vytištěného úchytu připevněn k posuvnému systému (s digitálním zobrazením posunu), k jehož základně byla připevněna spodní část úchytu pro vzorek. Horní část úchytu pro vzorek byla připojena přímo k siloměru (všechny úchyty byly navrženy pro účely této práce a vytištěny na 3D tiskárně). Vzorek MRE byl poté vložen do úchytů a byla nastavena výchozí vzdálenost (1 cm mezi úchyty odpovídající výchozí délce vzorku před natažením).



Obr. 36: Tahová zkouška – uchycení vzorku MRE

Vzorek byl pak postupně natahován vždy po 1 mm až do 10 mm, a pro každé prodloužení byla zaznamenána příslušná síla na siloměru a změřen průměr vzorku digitálním posuvným měřítkem. Jelikož se jedná o měření elastického materiálu, měření průměru vzorků posuvným měřidlem není zcela přesné.

10.1 Naměřená data

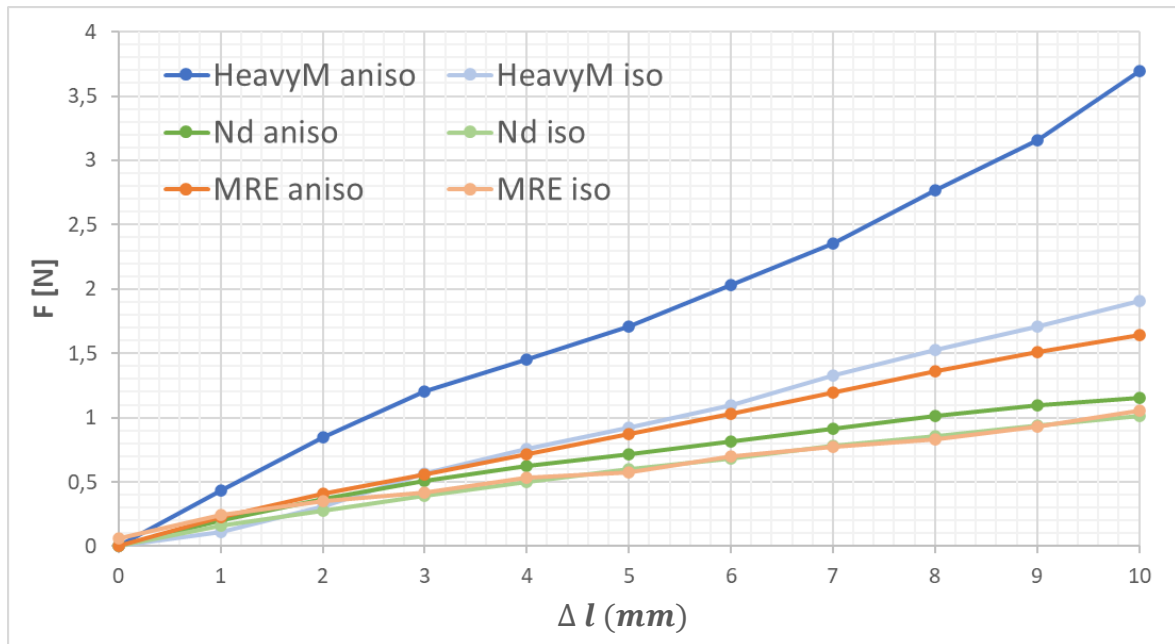
Při měření byly zjištěny hodnoty síly F (N) a průměry vzorků d (mm) pro příslušná prodloužení Δl . Tyto hodnoty jsou pro přehled zaznamenány v následující tabulce.

Tab. 3: Tahová zkouška – naměřené hodnoty

Δl (mm)	0,00	1,00	2,00	3,00	4,00	5,00	6,00	7,00	8,00	9,00	10,00
MRE iso											
F (N)	0,00	0,24	0,36	0,42	0,53	0,57	0,70	0,77	0,84	0,93	1,06
d (mm)	5,02	4,92	4,77	4,6	4,43	4,31	4,25	4,12	4,02	3,91	3,82
MRE aniso											
F (N)	0,00	0,23	0,41	0,56	0,72	0,87	1,03	1,19	1,36	1,51	1,65
d (mm)	5,02	4,9	4,78	4,68	4,56	4,47	4,33	4,23	4,18	4,07	3,97
HeavyM iso											
F (N)	0,00	0,11	0,31	0,57	0,76	0,92	1,10	1,32	1,53	1,71	1,91
d (mm)	4,3	4,13	3,87	3,73	3,57	3,44	3,35	3,25	3,17	3,10	3,00
HeavyM aniso											
F (N)	0,00	0,44	0,85	1,20	1,45	1,71	2,04	2,36	2,77	3,16	3,70
d (mm)	4,21	4,10	3,88	3,80	3,64	3,54	3,44	3,35	3,29	3,24	3,18
Nd iso											
F (N)	0,00	0,16	0,28	0,39	0,50	0,60	0,69	0,78	0,86	0,94	1,02
d (mm)	5,03	4,93	4,82	4,70	4,59	4,48	4,39	4,25	4,17	4,07	3,99
Nd aniso											
F (N)	0,00	0,21	0,37	0,51	0,63	0,72	0,82	0,91	1,02	1,10	1,16
d (mm)	4,94	4,88	4,72	4,65	4,47	4,30	4,22	4,17	4,12	4,09	3,95

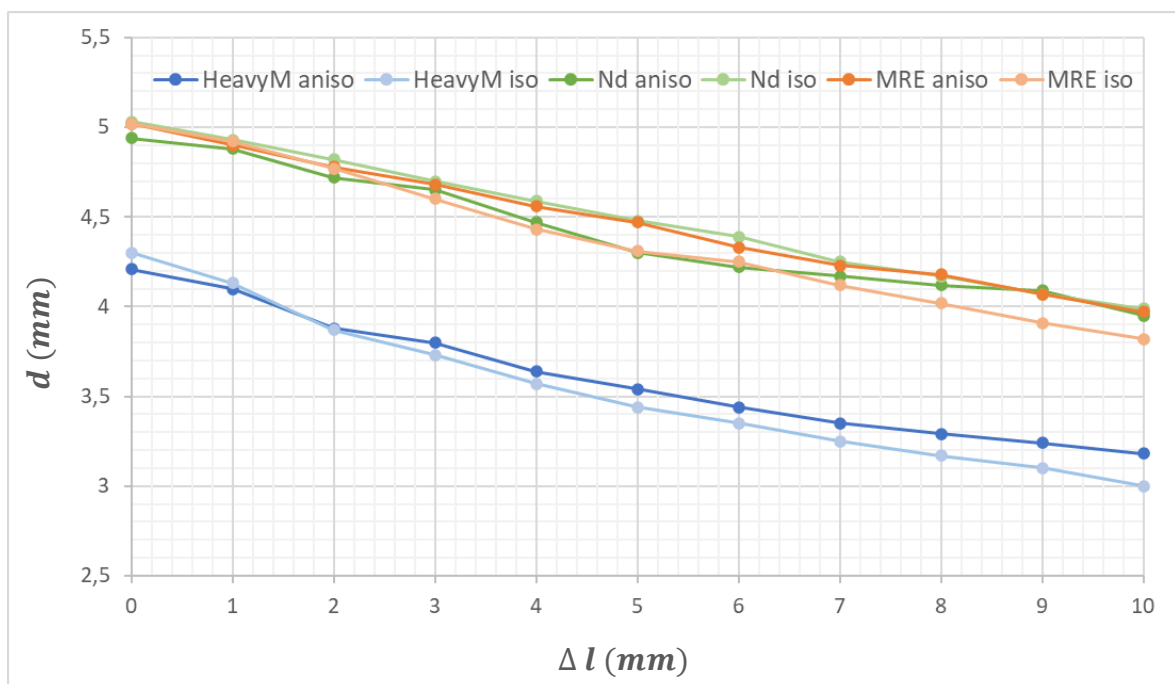
10.2 Porovnání vzorků

V grafu (Obr. 37) jsou pro srovnání zobrazeny hodnoty naměřené síly v závislosti na prodloužení (natažení) jednotlivých vzorků. Jako u předchozích grafů jsou pro přehlednost barevně odlišeny použité materiály (odstín barvy pak odpovídá izotropní či anizotropní variantě). Podobně jako u měření relativní permeability má závislost síly na natažení celkově podobný průběh u izotropní i anizotropní varianty pro vzorky s neodymovými částicemi (Nd aniso dosahuje nepatrně vyšších hodnot) – orientace vzorků zde tedy opět není nutná. Značný nárůst síly je u vzorků MRE, kde bylo u anizotropní varianty dosaženo při natažení o 10 mm vyšší síly, konkrétně 1,65 N (oproti 1,06 N u izotropního vzorku). Ještě vyšších hodnot bylo dosaženo při měření vzorků HeavyM – izotropní vzorek má podobný průběh jako anizotropní MRE (opět podobnost s měřením relativní permeability), maximální naměřená síla je 1,91 N a u anizotropního vzorku pak 3,7 N. Měřené izotropní a anizotropní vzorky se tedy chovají podle předpokladů.



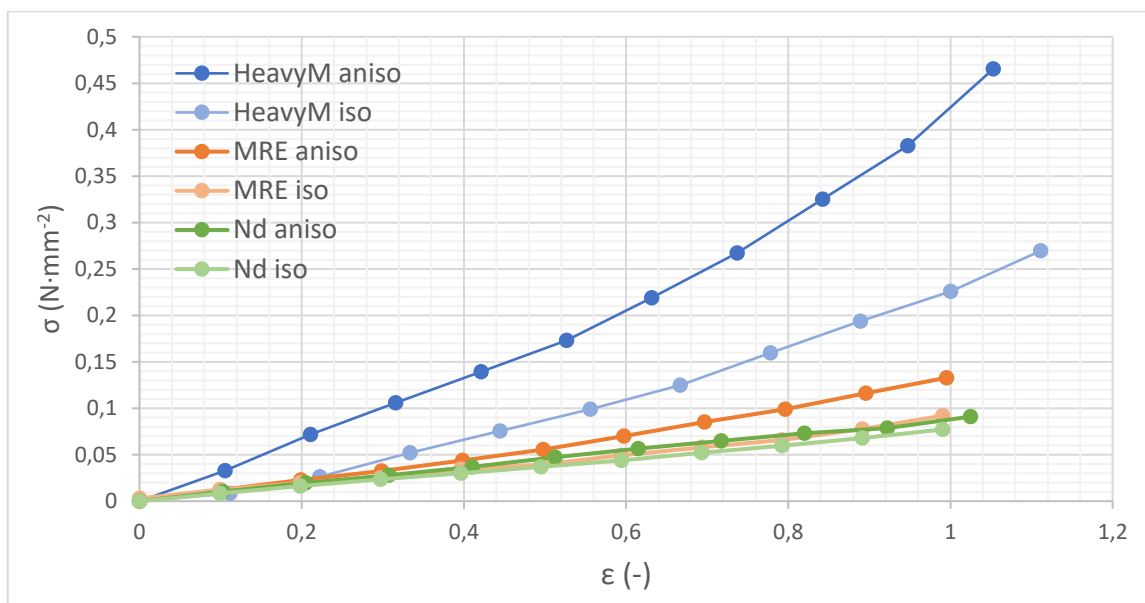
Obr. 37: Porovnání změřené síly pro daná prodloužení vzorků

Na Obr. 38 je znázorněná změna průměru průřezu vzorků v závislosti na jejich natažení (prodloužení). Je zde patrné, že změna rozměrů má stejný klesající trend u všech měřených vzorků, v tomto případě je tedy jejich chování podobné – vzorky se deformují stejným způsobem, odlišná je ovšem síla, se kterou se proti natahování (působící síle) brání. Nižší hodnoty průměrů u HeavyM vzorků jsou způsobeny jejich smrštěním po ztuhnutí.

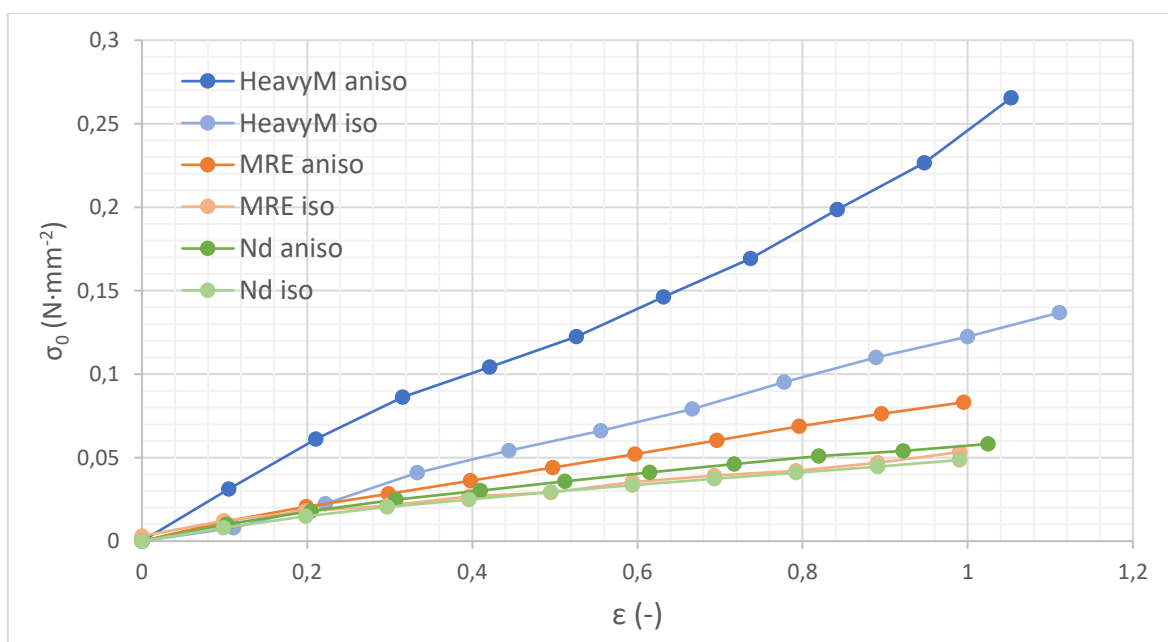


Obr. 38: Změna průměru průřezu vzorků v závislosti na jejich prodloužení

Dle vzorců (9) a (10) byly naměřené hodnoty přepočteny na normálové napětí (vztažené k deformovanému zkušebnímu tělesu) a normálové smluvní (Kirchhoffovo) napětí (vztažené k nedeformovanému zkušebnímu tělesu). Tyto parametry byly následně zobrazeny v závislosti na poměrném prodloužení, vypočteném dle vzorce (8). Z obou výsledných charakteristik je patrná vyšší tuhost při větším namáhání u anizotropních variant všech vzorků, nejvyšší u vzorku HeavyM.



Obr. 39: Závislost normálového napětí (vztaženo k deformované ploše) na poměrném prodloužení

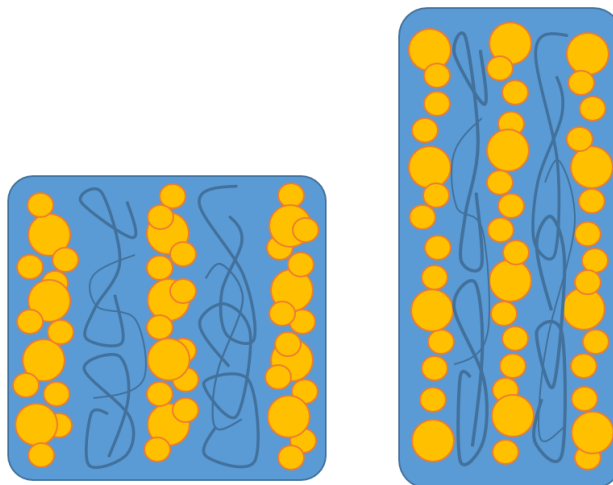


Obr. 40: Závislost Kirchhoffova napětí (vztaženo k původní ploše) na poměrném prodloužení

10.2.1 Vliv orientace částic na mechanické vlastnosti MRE

Na mechanické vlastnosti u magnetoreologických elastomerů má vliv použitá matrice i plnivo (kovové částice). Pro přípravu všech měřených vzorků byl použitý stejný typ silikonu, na výsledné vlastnosti má vliv tedy jen použité plnivo – typ (materiál) kovových částic a jejich množství.

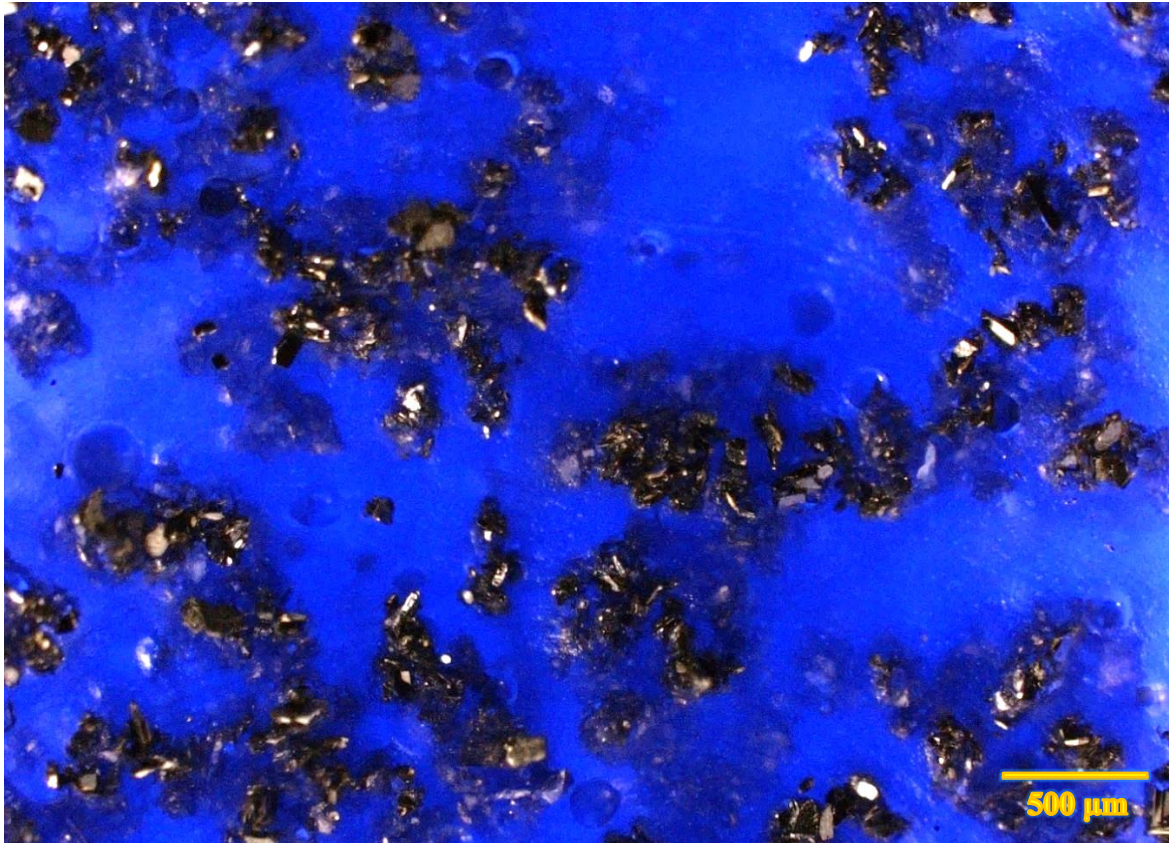
Podle [43] má na výslednou tuhost vzorků vliv uspořádání kovových částic (v tomto případě konkrétně železných). Nižší tuhost je pozorována u izotropních vzorků, větší tuhost pak u anizotropních vzorků, u kterých jsou částice zřetězené v jednom směru, konkrétně ve směru tahu (působící síly). Takové chování je typické pro kompozity vyztužené například skleněnými vlákny, která jsou ale spojitá. Řetězce z kovových částic („vlákna“) u MRE jsou ale nespojité, a proto má podobnost jejich chování jinou příčinu. V tomto případě se jedná o mechanismus na mikroskopické úrovni – vzniká tření mezi zřetězenými kovovými částicemi a řetězci samotného polymeru (silikonu), ke kterému dochází při zatížení (natahování) MRE. Právě ve směru zatížení dochází k omezení pohybu polymerních řetězců – kovové částice jim brání „v odvíjení“ (natahování). Tento jev pak vede k pozorovanému zvýšení tuhosti. Znázornění tohoto jevu je pro lepší představu na obrázku níže.



Obr. 41: Znázornění struktury MRE u nenamáhaného vzorku (vlevo) a po jeho natažení (vpravo)

11 Mikroskopie

Pro pochopení vlastností a chování MRE byly pořízeny snímky pomocí fluorescenčního mikroskopu. Využity byly vzorky připravené pro měření na hysterezigrafu. Každý vzorek byl příčně rozřezán skalpelem ve směru orientace částic pro zobrazení řetězců u anizotropních vzorků. Upravený vzorek byl poté umístěn na pohyblivý stolek mikroskopu. Pro pořizování snímků byl nastaven pozorovací mód UV-VIS s využitím zdroje UV záření a clon pro dosažení potřebného kontrastu mezi silikonem a částicemi. U větších zvětšení byly snímky pořizovány postupným „proostřováním“ kvůli nerovnosti vzorků (ostření v různých rovinách s následným „složením“ snímku).



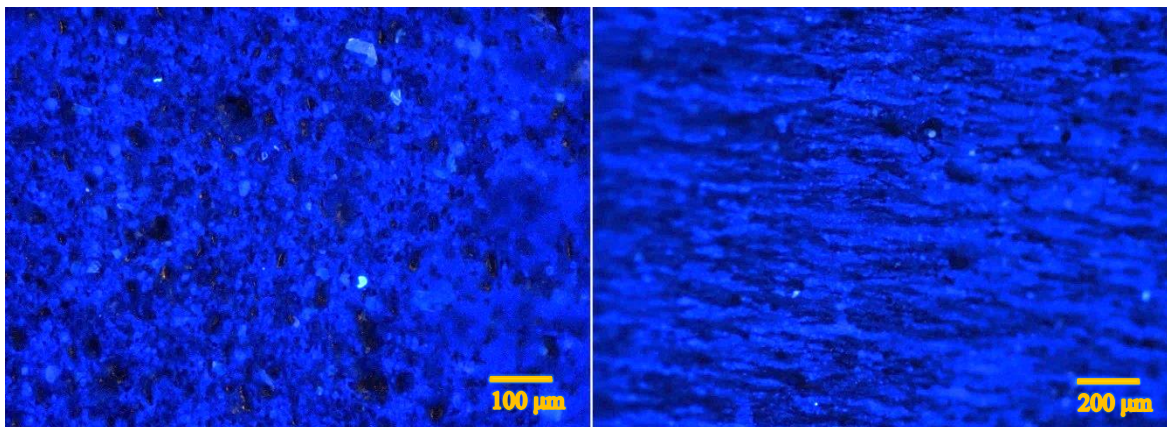
Obr. 42: Snímek pořízený fluorescenčním mikroskopem, Nd zmag. iso

11.1 Mikroskopie vzorků

Pro porovnání byly pořízeny snímky izotropních a anizotropních vzorků, a to konkrétně pro MRE, HeavyM, Nd a zmag. Nd. Na snímcích jsou kovové částice zobrazeny jako tmavě modrá až černá místa, světle modrá místa pak odpovídají silikonu. Snímky všech anizotropních vzorků jsou orientovány stejným směrem – směr řetězců je „zleva doprava“.

11.1.1 MRE iso + aniso (Fe85Si15 56 %)

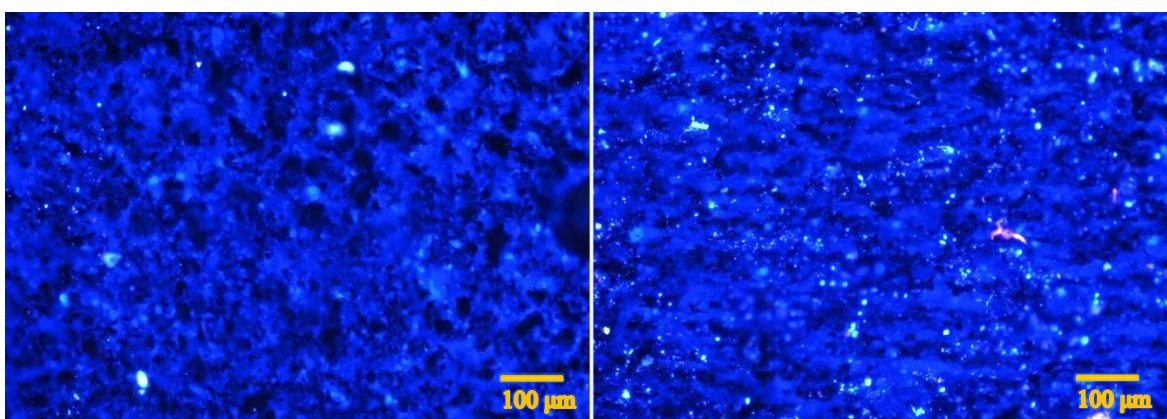
Na snímcích pro vzorky MRE je patrný značný rozdíl mezi strukturou izotropního a anizotropního vzorku. V izotropním vzorku jsou částice v silikonu rovnoměrně rozmístěné, u anizotropního jdou velmi dobře vidět vytvořené řetězce z kovových částic.



Obr. 43: Izotropní MRE, anizotropní MRE (vpravo)

11.1.2 HeavyM iso + aniso (Fe85Si15 80 %)

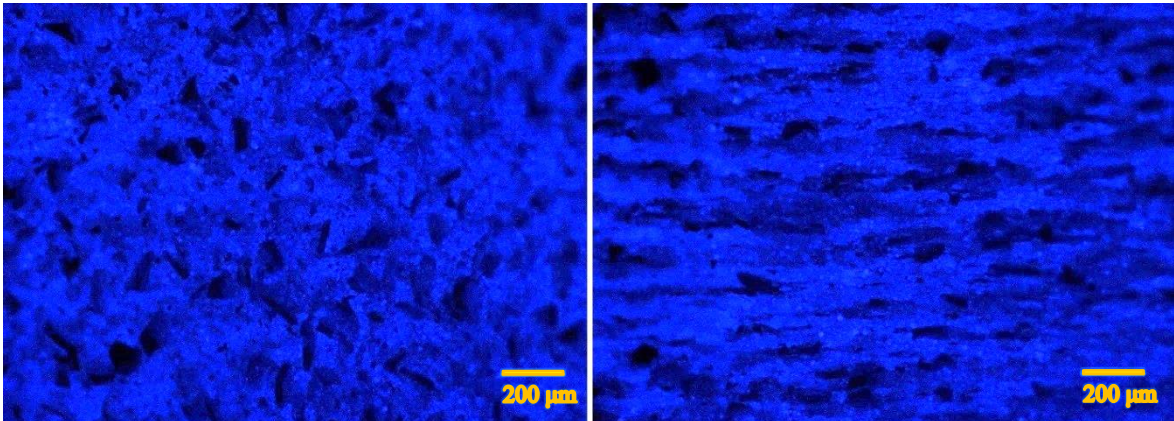
Vzorky HeavyM obsahují o 24 % více částic než vzorky MRE, není u něj proto zřetězení tak výrazné, ale je patrné. Navíc kvůli smršťivosti HeavyM bylo nutné pořídít snímky ihned po vyjmutí vzorků z forem, z tohoto důvodu jsou na snímcích „svítící“ body, které poukazují na nedokončený proces polymerace silikonu (po dovytvrzení vzorku již zřetězení nešlo na mikroskopických snímcích zaznamenat).



Obr. 44: Izotropní HeavyM (vlevo), anizotropní HeavyM (vpravo)

11.1.3 Nd iso + aniso (NdFeB 56 %)

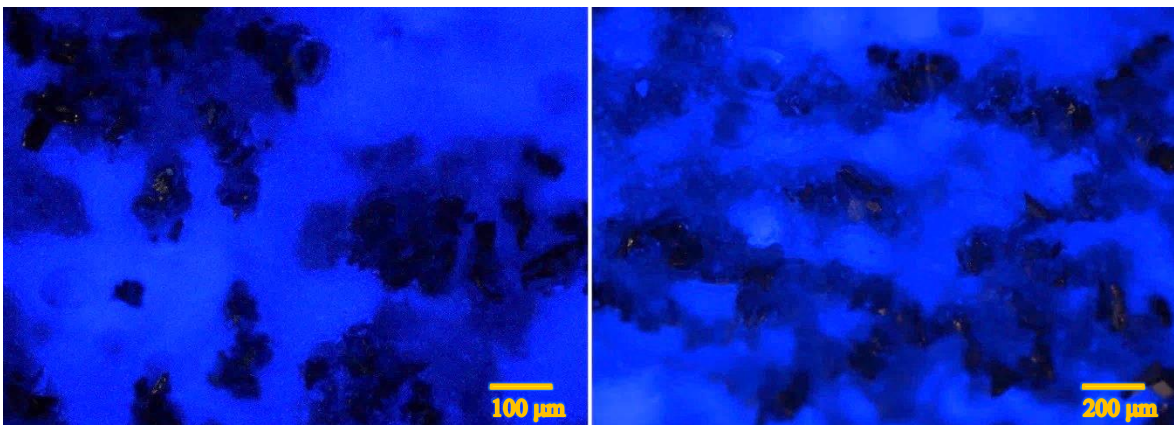
U vzorků Nd jsou použité neodýmové částice větší než železné částice u výše zmíněných vzorků MRE a HeavyM. Toto se projevilo u anizotropní struktury Nd, kde je zřetězení dobře patrné, ale tento efekt je oproti MRE menší právě kvůli velikosti částic, které působením magnetického pole není tak snadné zorientovat a „shlukovat“ do řetězců jako menší železné částice.



Obr. 45: Izotropní Nd (vlevo), anizotropní Nd (vpravo)

11.1.4 Nd zmag. iso + aniso (FNdFeB zmagnetované 56 %)

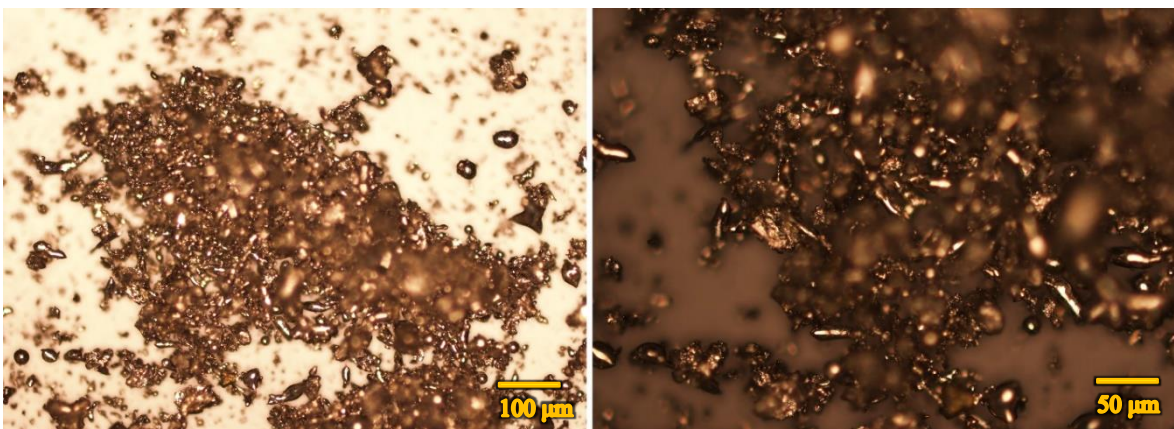
Zmagnetované částice neodymu se pod mikroskopem u izotropního vzorku projevily jako velké shluky rozprostřené v silikonové matrici, což bylo na první pohled zjevné již při vyjmutí vzorků z forem. Zřetězení je pro anizotropní variantu opět znatelné, došlo zde k propojení jednotlivých shluků částic.



Obr. 46: Izotropní MRE (vlevo), anizotropní MRE (vpravo)

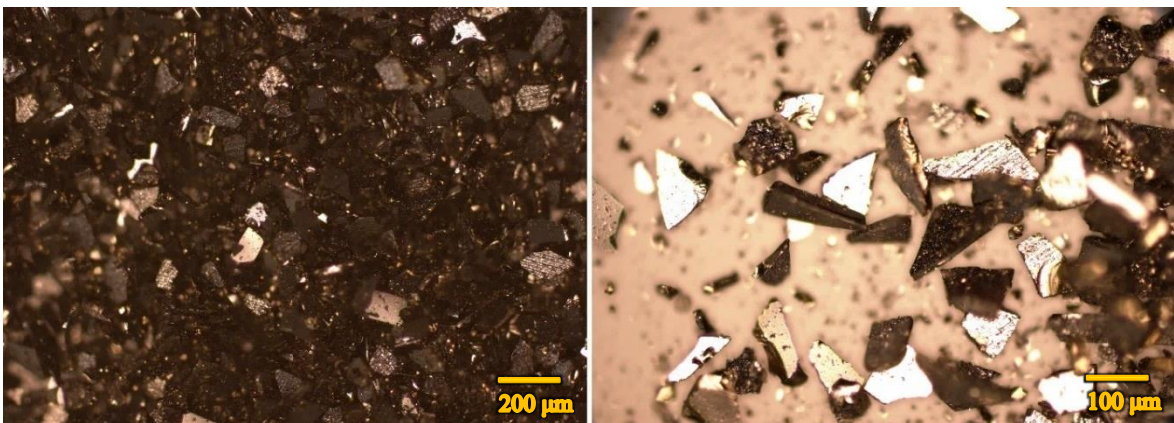
11.2 Mikroskopie částic

Pro doplnění předchozího porovnání a lepší popis jednotlivých izotropních a anizotropních vzorků byly pořízeny snímky i samostatných použitých částic, tedy Fe₈₅Si₁₅ a NdFeB. Z mikroskopických snímků na Obr. 47 je vidět, že jsou v „práškovém“ Fe₈₅Si₁₅ částice různých velikostí, přibližně od velikosti 1 μm u nejmenších částic až do 30 μm u největších částic. Malé částice v tomto případě výrazně převažují, což usnadňuje jejich snadnější orientaci při tuhnutí vzorku v magnetickém obvodu. Tvar částic je kulatý až oválný, všechny mají hladký povrch, což naznačuje jejich možnou výrobu pomocí „rozfoukání“ roztaveného kovu.



Obr. 47: Fe₈₅Si₁₅ částice – měřítko: 100 μm (vlevo), měřítko: 50 μm (vpravo)

Neodymové částice jsou oproti železným dle mikroskopických snímků (Obr. 48) větší, zde se velikosti částic pohybují v rozmezí přibližně 10 – 100 μm. Dalším rozdílem je vyšší podíl větších částic (50 – 100 μm). Částice NdFeB mají nepravidelný tvar s „ostrými“ hranami a jsou ploché. Z tohoto tvaru částic lze usoudit, že byly vyrobeny z tenké vrstvy NdFeB, která byla následně roztříštěna.



Obr. 48: NdFeB částice – měřítko: 200 μm (vlevo), měřítko: 100 μm (vpravo)

11.3 Porovnání vzorků

Z mikroskopických snímků připravených vzorků (MRE, HeavyM, Nd a Nd zmag.) byly získány následující poznatky – použité železné částice (Fe₈₅Si₁₅) jsou v porovnání s neodymovými (NdFeB) podstatně menší, což je výše potvrzeno i na samostatných snímcích těchto částic. Železné částice se pohybují s rozměry v jednotkách mikrometrů, kde největší z nich mají v průměru přibližně 30 μm, ale převažují hlavně malé částice (1 – 5 μm). Rozměry neodymových částic jsou v rozmezí 10 – 100 μm, přičemž převažují naopak větší částice (50 – 100 μm), a jsou tedy zhruba třikrát větší než Fe₈₅Si₁₅.

Velikost částic ovlivnila tvorbu řetězců u anizotropních vzorků, kde je tento jev nejvíce patrný u vzorku anizotropního MRE, u kterého se malé částice nejsnadněji zřetězily. U vzorků s neodymem se tyto větší částice zformovaly spíše do orientovaných shluků s větším okolním prostorem vyplněným silikonem. V případě zmagnetovaných částic Nd bylo pozorováno velmi podobné chování, kdy se shluky již zmagnetovaných částic při tuhnutí v magnetickém poli propojily. Dále měl vliv na zmíněné zřetězení obsah částic – u vzorku anizotropního HeavyM není tvorba řetězců právě kvůli vyššímu obsahu částic tak zjevná jako u MRE, ale na pořízeném snímku patrná je.

12 Vyhodnocení vlastností vzorků MRE

Po provedení měření magnetických a mechanických vlastností připravených izotropních a anizotropních vzorků MRE by bylo dobré tyto poznatky shrnout a porovnat.

Z hlediska magnetických vlastností, konkrétně relativní permeability vzorků, bylo dosaženo nejvyšší hodnoty tohoto parametru u anizotropního vzorku HeavyM, a naopak nejnižší hodnotu vykázali vzorky s neodymem, u kterých je navíc hodnota relativní permeability na měřeném rozsahu téměř konstantní bez ohledu na jejich strukturu. Obecně platí, že vyšší hodnoty permeability lze dosáhnout u anizotropní varianty, výrazně větší rozsah permeability je navíc pozorován u vzorků s vyšším plněním železných částic.

V závislosti na mechanickém namáhání vzorků při tahové zkoušce bylo zjištěno, že má anizotropní struktura vliv i na mechanické vlastnosti. Nejvyšší tuhost při namáhání se projevila opět u anizotropního vzorku HeavyM díky vyššímu plnění částic, které při natahování vzorku znesnadňují odvíjení polymerních řetězců. Pro porovnání jsou Tab. 4 uvedeny hodnoty normálového napětí při 100% natažení vzorků. Stejně jako v případě permeability, i zde je tedy patrný vliv anizotropie, díky které je dosaženo vyšší tuhosti MRE, ovšem tento vliv je znovu nepatrný u vzorků s neodymovými částicemi.

Z použitých materiálů jsou tedy pro dosažení vyšší relativní permeability vhodné železné mikročástice, u kterých se projevuje vliv anizotropní struktury MRE. Tento jev je výraznější s vyšším plněním těchto částic, které navíc způsobuje i vyšší tuhost MRE.

Tab. 4: Porovnání parametrů jednotlivých vzorků MRE

Vzorek	MRE iso	MRE aniso	HeavyM iso	HeavyM aniso	Nd iso	Nd aniso	Nd zmag. iso	Nd zmag. aniso
částice	Fe85Si15				NdFeB			
obsah částic	56 %	56 %	80 %	80 %	56 %	56 %	56 %	56 %
μ_{r_max} (-)	2	4	4	6	1,2	1,2	1	1
rozsah μ_r	↑	↑↑	↑↑	↑↑	↓↓	↓↓	↓↓	↓↓
$\sigma_{100\%}$ (N/mm^2)	0,09	0,14	0,23	0,42	0,08	0,09	-	-
vliv anizotropie	-	↑	-	↑↑	-	↓↓	-	↓↓
možné využití	senzorika				aktuátory			

↑...velký rozsah/velký vliv, ↑↑...největší rozsah/největší vliv, ↓↓velmi malý rozsah/nepatrný vliv

13 Koncepce výroby anizotropního MRE – VOXELY

Jedním z cílů této práce bylo navrhnout koncepci výroby anizotropního MRE. Poměrně jednoduchou variantou výroby, která umožňuje vytvářet orientované (anizotropní) MRE navíc s následnou velkou variabilitou využití, je výroba voxelů. Z tohoto důvodu byl vybrán právě tento způsob.

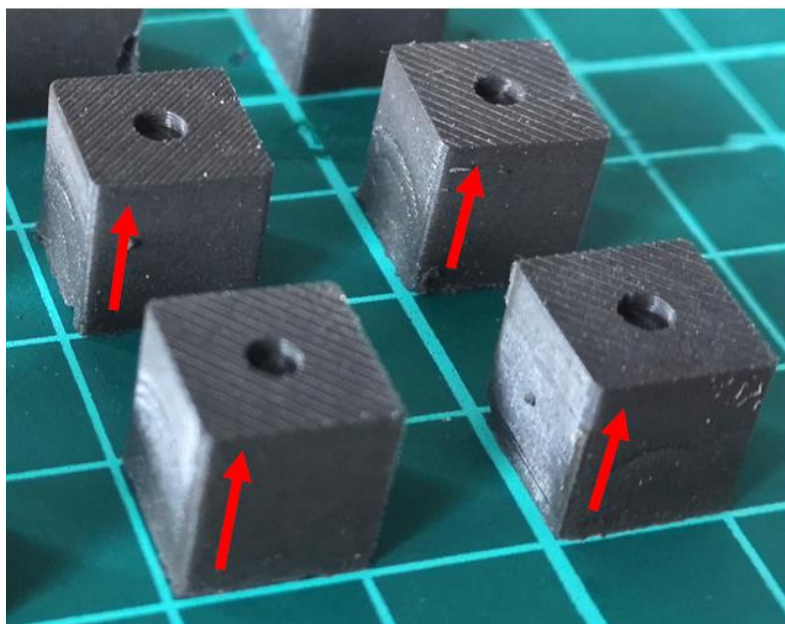
Každý voxel odpovídá jedné „stavební“ jednotce s orientovanou strukturou, což právě umožňuje sestavení libovolné struktury s různými možnostmi využití. Pro samotnou výrobu voxelů byl využitý postup jako u předchozích vzorků MRE, použity byly částice Fe₈₅Si₁₅ s plněním 56 %, jelikož se u této varianty velmi dobře projevuje anizotropie. Bylo zváženo i použití HeavyM, ale tato varianta byla zavržena kvůli smrštivosti a sedimentaci vzorků HeavyM. Tvar voxelů byl zvolen krychlový s rozměry 1 cm x 1 cm x 1 cm.

13.1 Výroba MRE voxelů

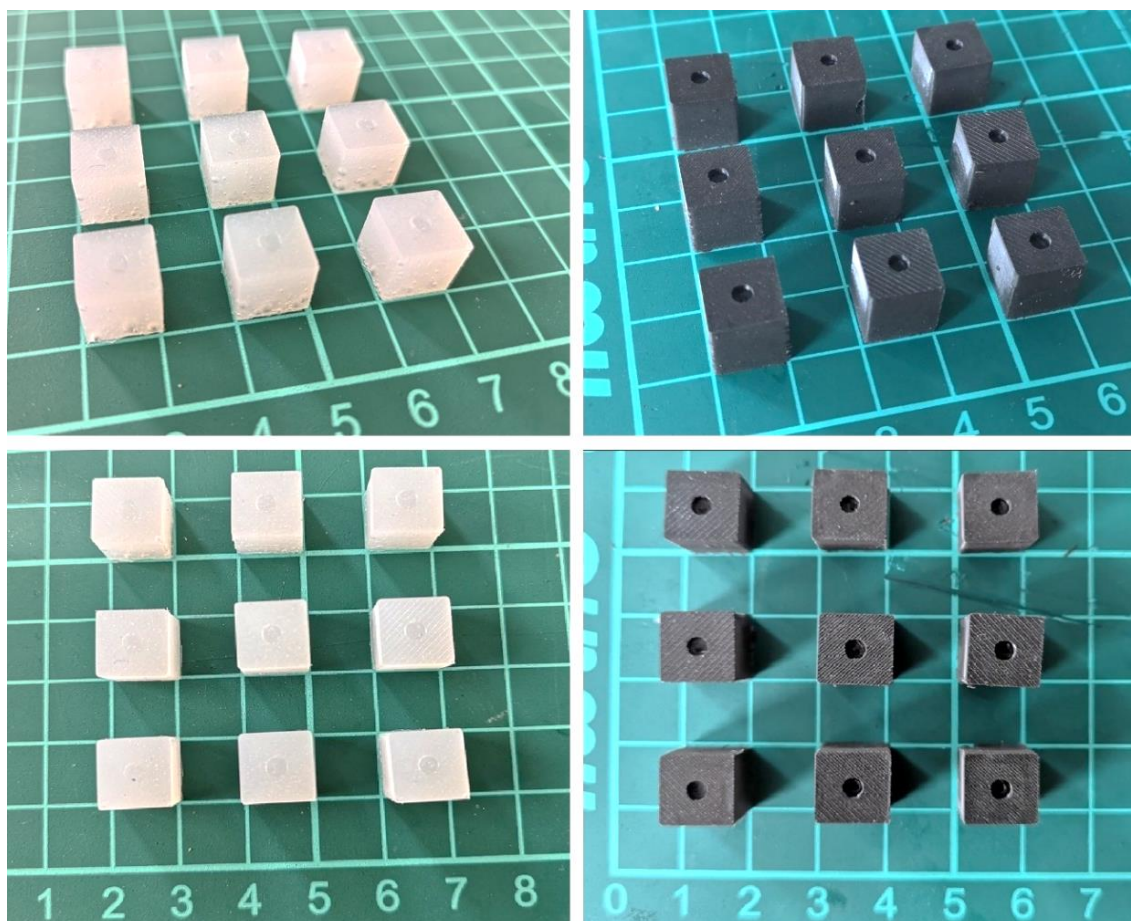
Jak je již zmíněno výše, byl pro výrobu voxelů zvolen způsob výroby jako u malých a velkých vzorků s použitím částic Fe₈₅Si₁₅ a plněním 56 %. Do formy připravených právě pro voxely bylo tlakovým litím odlito připravené MRE, přičemž bylo možné v jedné formě připravit celkem devět voxelů najednou. Forma byla následně vložena do magnetického obvodu, využívaného pro předchozí vzorky, pro vytvoření orientované struktury výsledných voxelů.

Pro srovnání byly vytvořeny i voxely izotropního (neorientovaného) MRE a voxely čistě ze silikonu – v tomto případě byl připraven silikon od výrobce *Smooth-on „Dragon Skin 10“*, který je po ztuhnutí pevnější než *„Dragon Skin FX-Pro“* použitý u ostatních vzorků. Pro lepší tečení silikonu pro jeho odlití do formy byl přidán *„Thinner“* (ředidlo).

Pro snadné rozpoznání směru orientace částic je na každém voxelu „klíč“ ve formě válcové prohlubně (znázorněno na Obr. 49).



Obr. 49: Směr orientace částic u anizotropních MRE voxelů



Obr. 50: Vzorčky silikonových voxelů (vlevo) a MRE voxelů (vpravo)

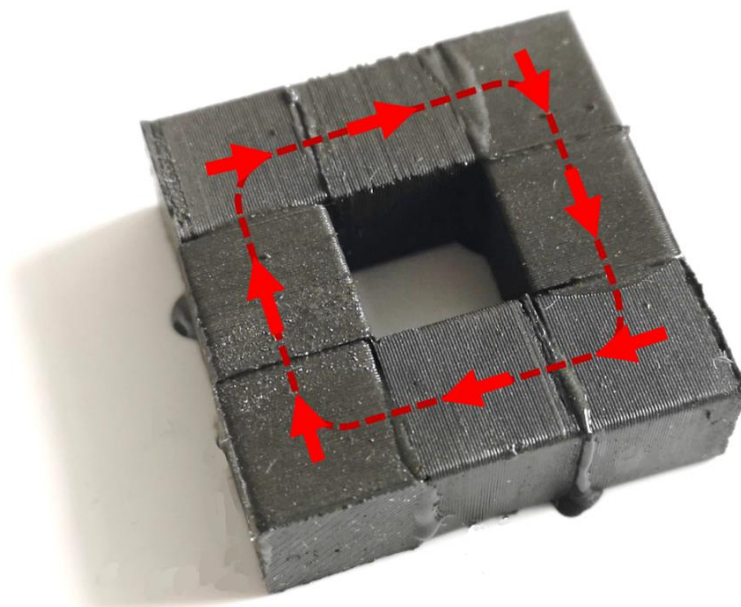
14 Aplikační příklad – Elastický transformátor

Pro demonstraci vlastností a možné aplikace anizotropního MRE byly použité připravené voxelů. Díky krychlovému tvaru voxelů se přímo nabízelo vytvoření magnetického obvodu (jádra) pro transformátor. Minimální rozměry jádra byly dány rozměry voxelů, přičemž bylo pro jeho sestavení potřeba celkem osm voxelů. Výsledné rozměry jádra transformátoru tedy jsou 3 cm x 3 cm x 1 cm (v x š x h). Na toto jádro byly namotány dvě cívky z lakovaného měděného drátu (primární a sekundární vinutí). Pro porovnání byla vytvořena další dvě jádra, a to z izotropních MRE voxelů a silikonových voxelů.

Cílem vytvoření MRE transformátoru nebylo podat jeho komplexní hodnocení, ale ukázat potenciál a možnosti MRE (toto téma bude řešeno v rámci vypsání bakalářské práce).

14.1 Výroba MRE transformátorů

Pro vytvoření jádra transformátoru bylo potřeba spojit celkem devět voxelů. Spojení jednotlivých voxelů bylo provedeno pomocí MRE v případě MRE voxelů a u silikonových voxelů pak s použitím silikonu. V jednom místě nebyly voxelů spojeny, aby bylo v dalším kroku možné na jádro nasadit cívky. Voxelů byly před spojením natočeny pro optimální uzavření magnetického toku, jejich orientace je zobrazena na Obr. 51.



Obr. 51: Jádro transformátoru z anizotropních MRE voxelů s naznačenou orientací částic

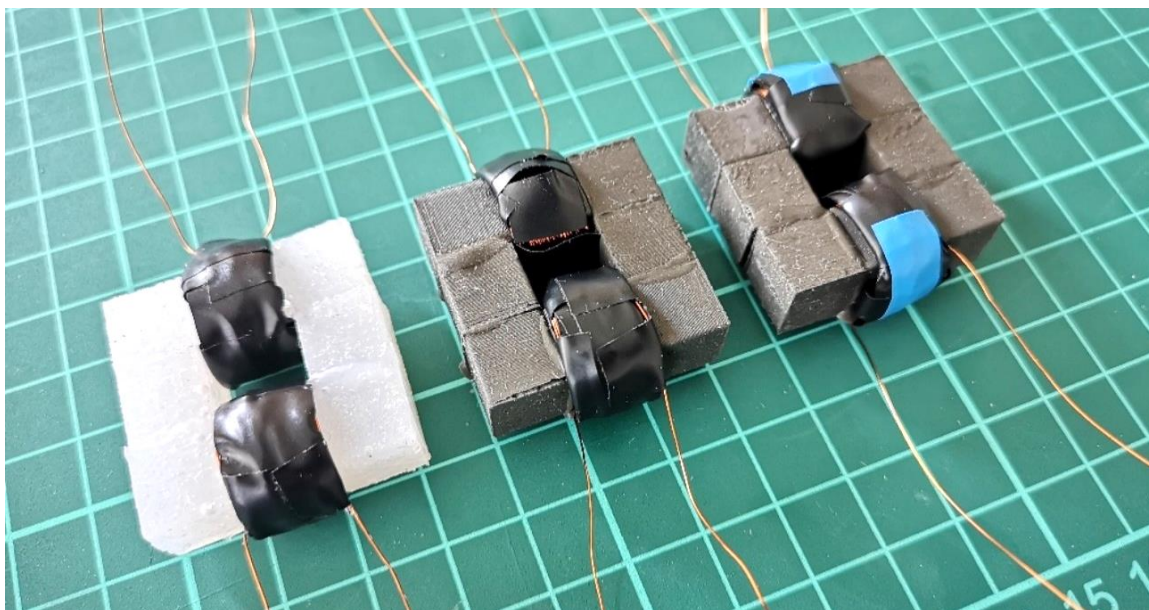
Dalším krokem byla příprava cívek primárního a sekundárního vinutí pro všechna tři jádra (celkem bylo tedy vytvořeno šest stejných cívek). Každá z cívek byla namotána z lakovaného měděného drátu o průměru 0,25 mm (výrobce BQ Cable, jedna vrstva laku) s celkovým počtem 100 závitů. Šířka cívky je 10 mm a vnitřní průměr 15 mm – rozměry zvolené tak, aby bylo možné cívku nasadit na jádro. Páska byla použita pro zpevnění cívky a pro usnadnění jejího nasunutí na jádro.



Obr. 52: Cívky primárního a sekundárního vinutí z měděného lakovaného drátu

Pro stanovení rovných podmínek pro následující měření byly vývody všech cívek zkráceny na stejnou délku. Posledním krokem bylo nasazení cívek na jádra. Elastická struktura jádra z MRE i silikonu umožnila snadné nasazení cívek, po kterém bylo nutné spojit jádro transformátoru již jen v jednom místě.

Finální podoba transformátorů z MRE i silikonu je zobrazena na Obr. 53. Jelikož byly pro srovnání vyrobeny transformátory z MRE v izotropní i anizotropní variantě, byl transformátor z anizotropního MRE pro snadné odlišení označen modrou páskou.



Obr. 53: Transformátory (zleva): silikon, iso MRE, aniso MRE

Pro základní porovnání byly u každého transformátoru naměřeny impedance cívek (primárního i sekundárního vinutí) pomocí digitálního multimetru. U každé cívky byl naměřen její odpor, kapacita, indukčnost a celková impedance. Tyto hodnoty jsou zaznamenány v Tab. 5. Stejně jako u porovnání vzorků v předchozí části práce, jsou i zde pro přehled barevně odlišena data či průběhy v grafech pro jednotlivá trafo – modrá pro silikon, oranžová pro MRE iso a zeleně je označeno MRE aniso.

Tab. 5: Parametry cívek transformátorů

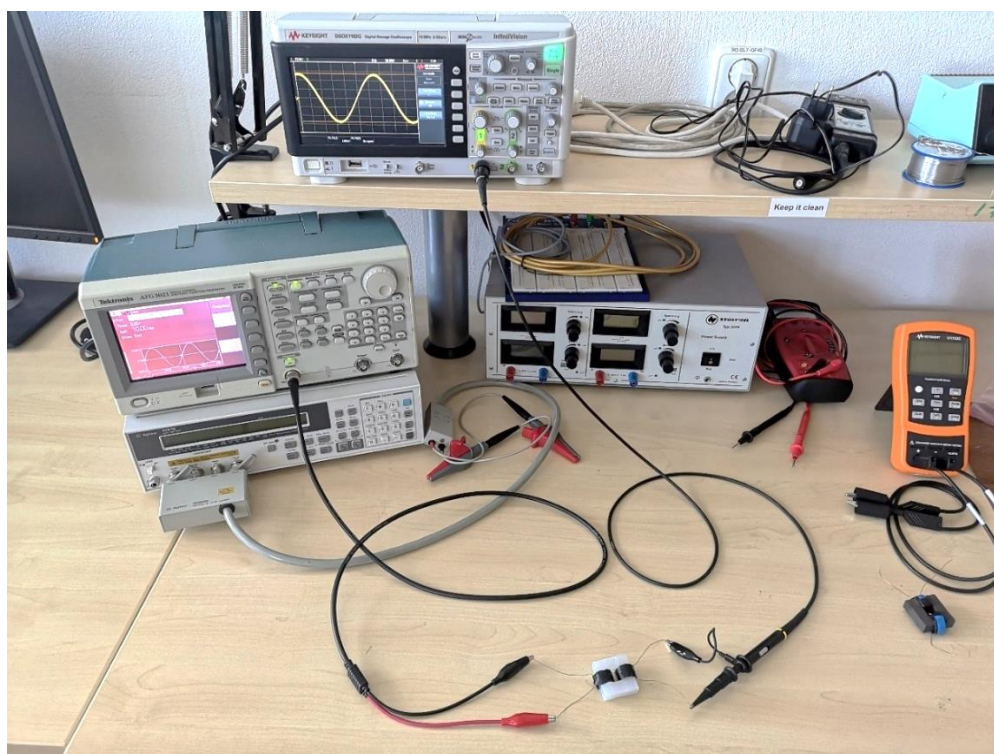
TYP parametry		Silikon		MRE iso		MRE aniso	
		1. vinutí	2. vinutí	1. vinutí	2. vinutí	1. vinutí	2. vinutí
R	(Ω)	2,3	2,3	2,4	2,4	2,7	2,6
L	(μH)	124,7	123,4	161,6	160,9	204,2	201,2
C	(nF)	20,2	20,4	15,6	15,7	12,4	12,4
Z	(Ω)	78,4	77,6	101,6	101,2	128,3	127,5

Největší hodnoty indukčnosti cívek dosahuje transformátor s jádrem z anizotropního MRE, což odpovídá již zjištěným poznatkům – má vyšší permeabilitu, tedy nižší magnetický odpor. Magnetický tok u tohoto transformátoru bude proto vyšší.

14.2 Měření indukovaného napětí

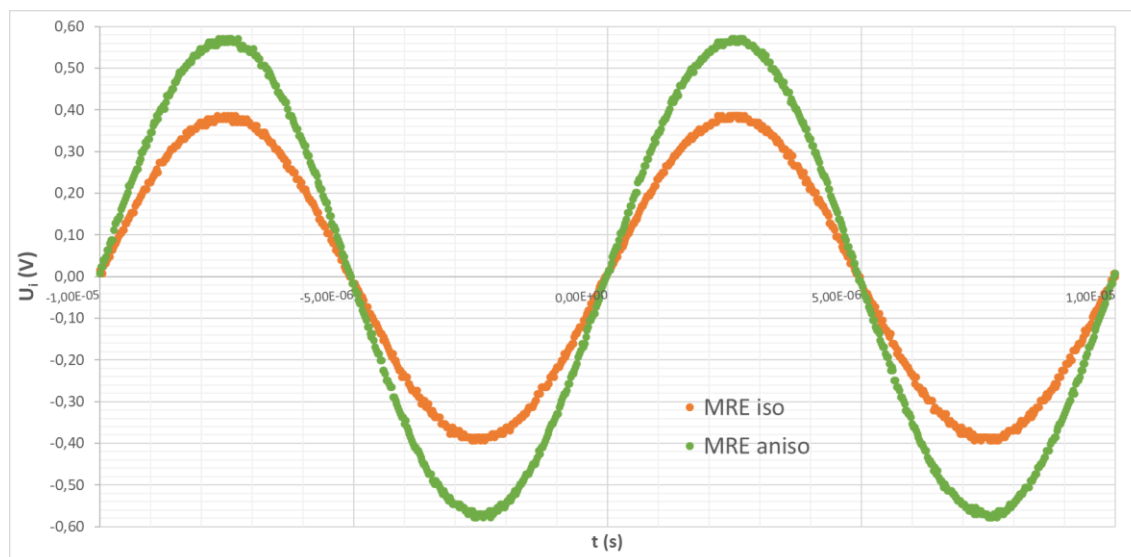
Pro demonstraci chování MRE v rámci jeho použití pro magnetický obvod transformátoru bylo provedeno měření indukovaného napětí. Indukované napětí bylo pro porovnání změřeno pro všechny tři připravené transformátory. K primárnímu vinutí transformátoru byl připojen generátor a k sekundárnímu vinutí osciloskop.

Na primární vinutí byl z generátoru přiveden střídavý sinusový signál o amplitudě 10 V (peak-peak) a postupně byla měněna jeho frekvence. Průchod proměnného proudu cívkou vytvořil magnetický tok jádrem transformátoru, na sekundárním vinutí bylo pak zaznamenáváno indukované napětí pro příslušné frekvence vstupního napětí.

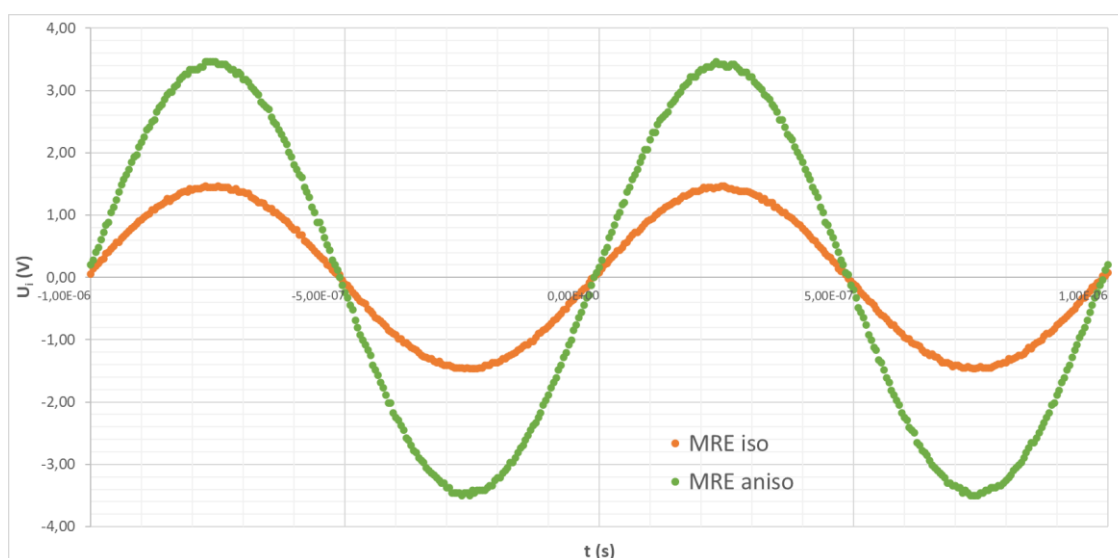


Obr. 54: Měření indukovaného napětí pomocí generátoru (vlevo) a osciloskopu (nahore)

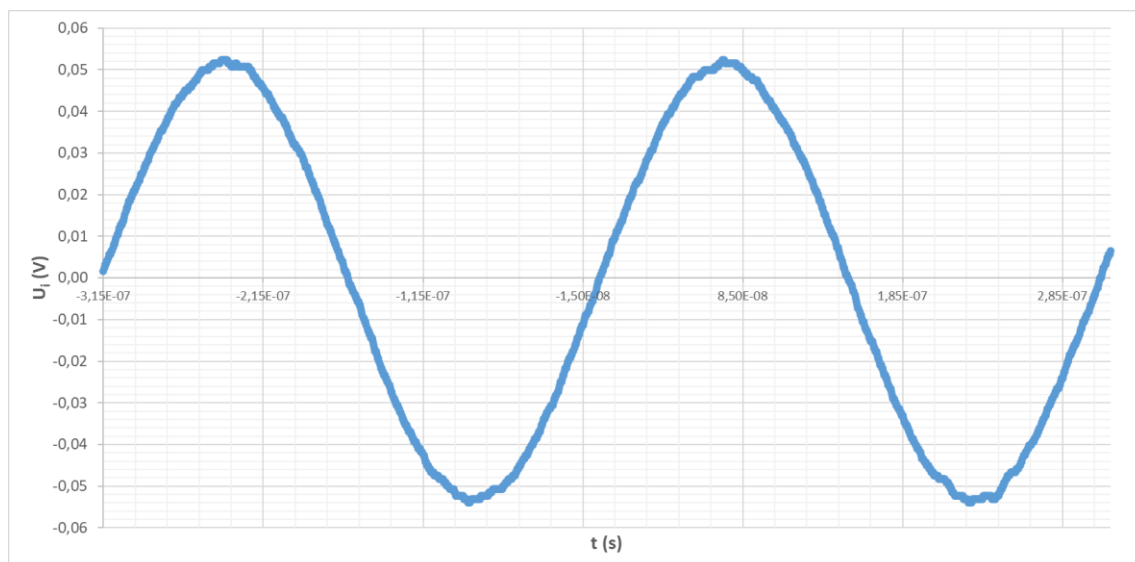
Pro porovnání transformátorů MRE iso a MRE aniso bylo provedeno měření při frekvenci 100 kHz. Z průběhů na Obr. 55 a Obr. 56 je patrné, že transformátor s anizotropním MRE jádrem dosahuje vyšší hodnoty indukovaného napětí. Jak již bylo zmíněno v předchozích částech této práce, magnetický tok orientovaným jádrem je snazší než u neorientovaného jádra, které má větší magnetický odpor.

Obr. 55: MRE iso + aniso – průběh indukovaného napětí, $f = 100$ kHz

Při dalším zvýšení frekvence vstupního napětí, konkrétně na hodnotu 1 MHz, se rozdíl ve velikosti indukovaného napětí mezi transformátory MRE iso a MRE aniso znásobil (indukované napětí MRE aniso je více než dvojnásobné oproti MRE iso).

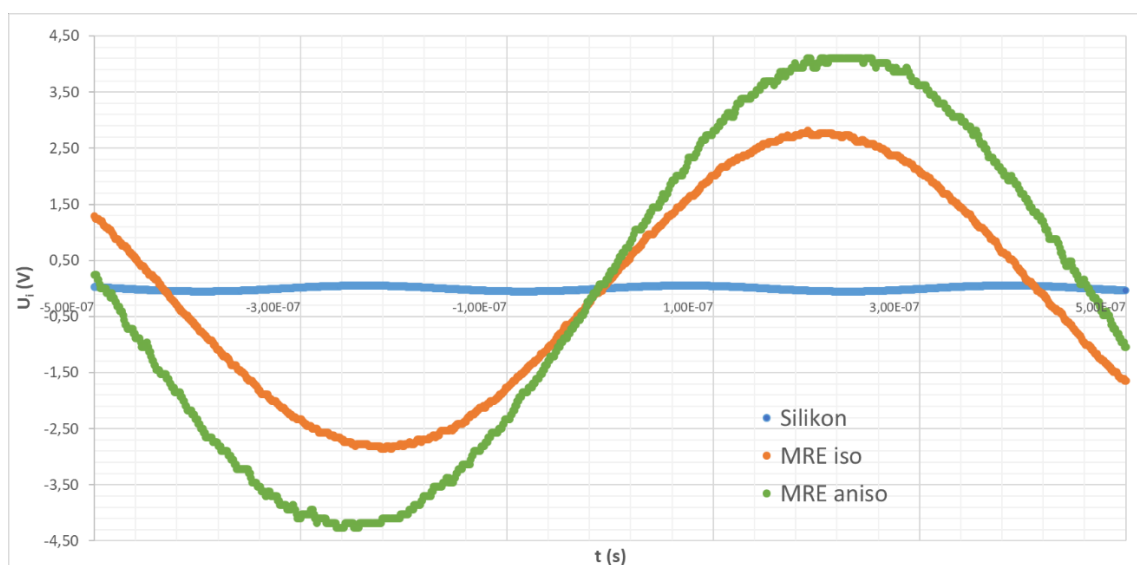
Obr. 56: MRE iso + aniso – průběh indukovaného napětí, $f = 1$ MHz

Při měření transformátoru se silikonovým jádrem bylo měřitelného signálu indukovaného napětí dosaženo až při frekvenci vstupního napětí 3,2 MHz. I přes vysokou frekvenci byly ale naměřeny jen velmi malé hodnoty indukovaného napětí, maximální hodnota 105 mV (peak-peak).

Obr. 57: Silikon – průběh indukovaného napětí, $f = 3,2$ MHz

V následujícím grafu (Obr. 58) je zobrazeno srovnání maximálních naměřených hodnot indukovaného napětí u všech tří transformátorů, konkrétně se jedná o hodnoty (peak-peak):

- MRE aniso – 1,05 MHz – 8,5 V
- MRE iso – 1,18 MHz – 5,6 V
- Silikon – 3,2 MHz – 105 mV



Obr. 58: Srovnání maximálních indukovaných napětí transformátorů

Pro přehled naměřených hodnot indukovaných napětí byla vytvořena následující tabulka (Tab. 6), která navíc ukazuje ztráty každého transformátoru na výstupu vzhledem

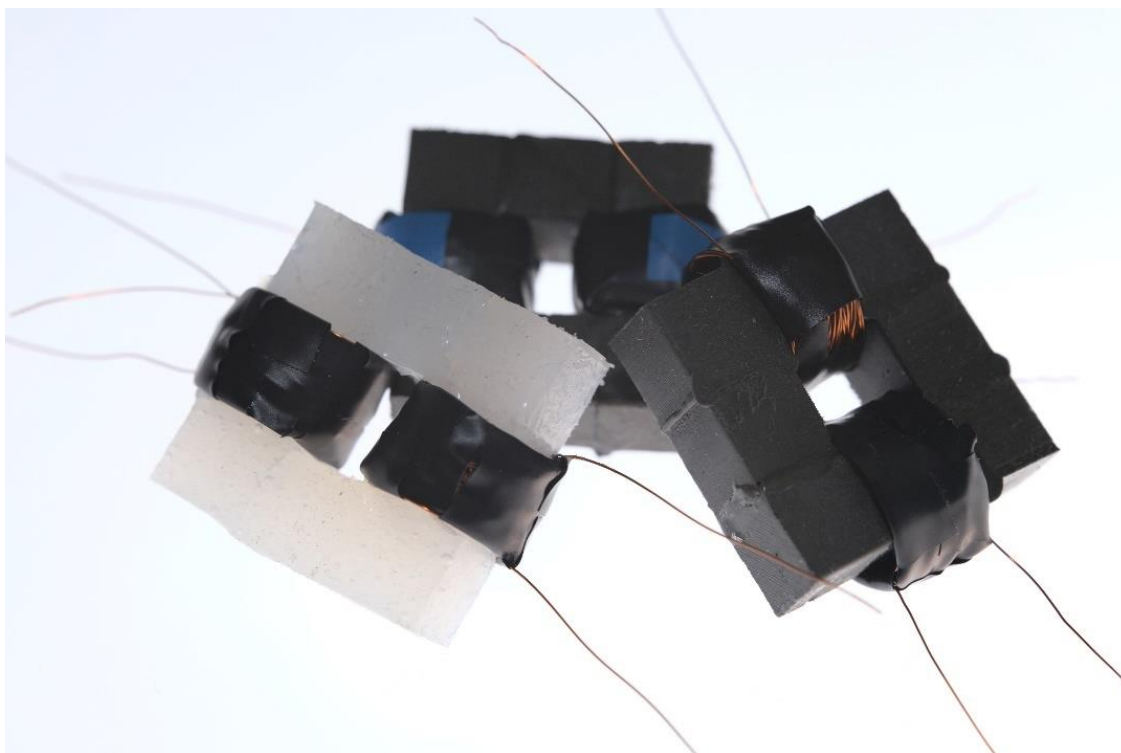
k přiloženému vstupnímu napětí. Převod je díky stejnému počtu závitů u primární i sekundární cívky roven jedné, napětí na vstupu a výstupu by se v ideálním případě měla rovnat.

Tab. 6: Přehled naměřených hodnot transformátorů

Transformátory	silikon	MRE iso	MRE aniso
	U _i (V)		
f = 100 kHz	-	0,80	1,17
f = 1 MHz	-	2,80	7,00
max. U _i (V)	0,11	5,63	8,50
ztráta U	98,9 %	43,7 %	15,0 %

14.3 Porovnání MRE transformátorů

Na základě měření indukovaného napětí lze jednoznačně říci, že využití anizotropního MRE pro magnetický obvod transformátoru má výraznější vliv na chování transformátoru než neorientovaného MRE. Díky orientovanému jádru se magnetický tok lépe uzavírá, čímž je dosaženo vyššího indukovaného napětí na sekundární cívce. Tento vyšší rozsah indukovaného napětí je pak lépe využitelný například v senzorce, jak je popsáno dále. Navíc je u anizotropního MRE transformátoru dosaženo mnohem menší ztráty napětí na výstupu než u izotropního, konkrétně jen 15 % oproti 43,7 %.

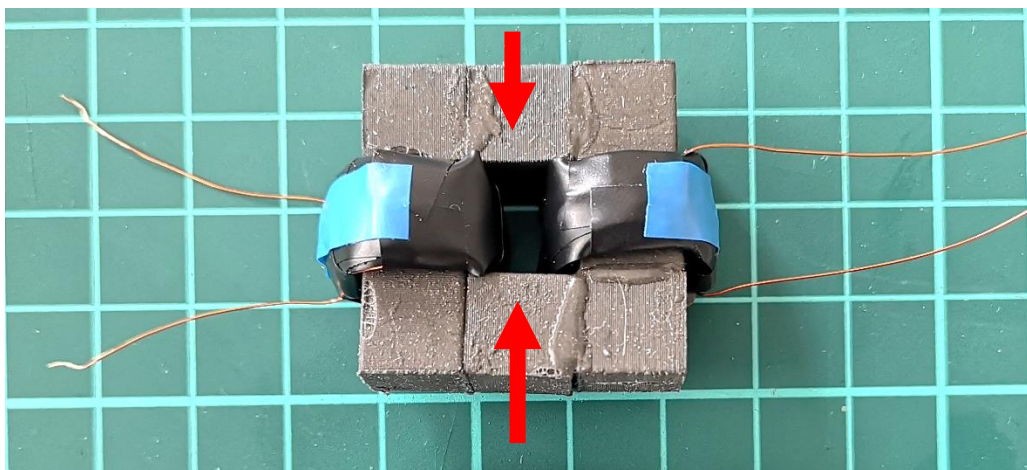


Obr. 59: MRE izotropní, MRE anizotropní a silikonový transformátor

14.4 Možné využití MRE transformátorů – Senzorika

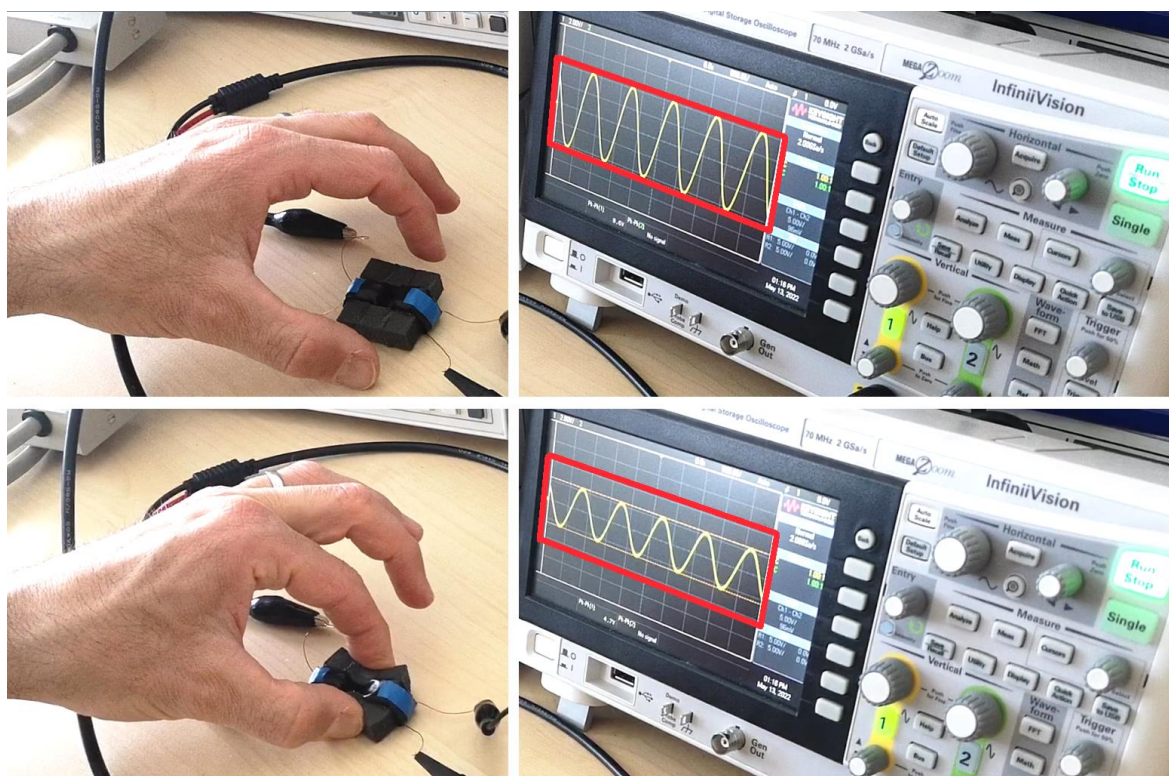
Při měření indukovaného napětí byl získán ještě jeden důležitý poznatek. Při deformaci transformátoru během měření se indukované napětí měnilo, konkrétně se jeho hodnota zmenšovala. Touto deformací je myšleno stlačení magnetického obvodu znázorněné na Obr. 60, při kterém dojde ke zmenšení měřeného indukovaného napětí. Při větším stlačení dochází k oddálení cívek, což způsobuje právě toto snížení indukovaného napětí, ale jeho změna je patrná i při velmi malé deformaci transformátoru, kdy nedochází k viditelnému posunu cívek, ale mění se magnetický obvod a tím také tok. K tomuto jevu nedochází u transformátoru se silikonovým jádrem. Transformátor s MRE jádrem je tedy v porovnání se silikonovým citlivější.

Tohoto jevu by bylo možné využít například pro senzorické aplikace, protože i při malém stlačení magnetického obvodu je pozorovatelná změna indukovaného napětí.



Obr. 60: Směr deformace transformátoru pro snížení indukovaného napětí

Na obrázku níže je demonstrována změna indukovaného napětí při deformaci anizotropního MRE transformátoru. Je zde konkrétně znázorněno zmenšení indukovaného napětí z hodnoty 8,5 V na hodnotu 4,7 V při deformaci transformátoru.



Obr. 61: Změna indukovaného napětí při deformaci transformátoru

Zhodnocení a závěr

V úvodu práce jsem obecně popsala magnetoreologické elastomery (MRE) z hlediska jejich vlastností a aplikačních možností, kterým se aktuálně věnuje řada výzkumů, z nichž se jako nejzajímavější jeví využití v soft-robotice. Jelikož jsou známé vlastnosti a charakteristiky chování MRE zjištěny především experimentálně a vždy pouze pro konkrétní kombinaci materiálů, může tato práce sloužit k dalšímu porozumění MRE, a především z hlediska anizotropie.

Cílem práce bylo vyrobit izotropní a anizotropní vzorky MRE a charakterizovat jejich vlastnosti. Pro výrobu anizotropních vzorků byl upraven magnetický obvod se vzduchovou mezerou pro vkládání forem se vzorky MRE. V tomto obvodu probíhalo tuhnutí vzorků MRE za působení homogenního magnetického pole, které vytvořilo orientovanou strukturu výsledných vzorků. Vytvořila jsem počítačový model tohoto magnetického obvodu (Obr. 22, Obr. 23), který působící pole simuluje, a v jeho rámci jsem provedla výpočty ověřující skutečné naměřené hodnoty magnetické indukce při buzení tohoto obvodu.

Pro důkladnější porovnání izotropní a anizotropní struktury MRE jsem připravila více vzorků, které se lišily právě orientací struktury, ale i materiálem použitých magnetických částic a jejich obsahem. Vzorky byly připraveny tlakovým litím do forem, vytištěných na 3D tiskárně podle počítačového modelu. Pro zjištění magnetických vlastností těchto vzorků jsem provedla měření na hysterezigrafu a ze zaznamenaných hysterezních křivek následně vypočítala relativní permeabilitu vzorků. Zjistila jsem, že použité neodymové částice (NdFeB) nemají vliv na změnu relativní permeability, která je v případě izotropního i anizotropního vzorku téměř stejná, a navíc konstantní na daném rozsahu intenzity působícího magnetického pole. Naopak velký vliv anizotropie na relativní permeabilitu se projevil u vzorků se železnými částicemi (Fe85Si15), u kterých je tento jev ještě výraznější s vyšším plněním částic (při nízkých hodnotách intenzity magnetického pole). Díky vysokému rozsahu relativní permeability je možné MRE s železnými částicemi využít v senzorce.

Pro charakterizaci chování vzorků MRE z hlediska mechanického namáhání jsem provedla tahovou zkoušku. Pomocí siloměru jsem zaznamenávala sílu, která odpovídala danému natažení vzorku a hodnoty jsem přepočítala na normálová napětí (odpovídají působící síle na deformovaný či nedeformovaný průřez vzorku). Závěr z tohoto měření je velmi podobný jako v případě měření magnetických vlastností MRE – anizotropie se opět téměř neprojevila u vzorků s neodymovými částicemi. Patrná je ovšem u vzorků MRE se železnými částicemi, přičemž vyššímu plnění odpovídá i větší tuhost vzorku při namáhání. Pro pochopení chování MRE jsem pořídila i snímky struktury jednotlivých vzorků pomocí fluorescenčního mikroskopu a snímky použitých částic (bez UV světla). Ze snímků (Obr. 47, Obr. 48) je patrné, že jsou neodymové částice větší než železné, což způsobuje méně výrazné zřetězení ve struktuře oproti MRE se železnými částicemi (působící magnetické pole při tuhnutí bylo pravděpodobně slabé pro dosažení výraznějšího zřetězení neodymových částic). Toto může mít za následek například menší tuhost vzorků

MRE s neodymem, a bylo by proto vhodné vyrobit a změřit vzorky s neodymovými částicemi o menších rozměrech pro ověření této teorie.

Posledním úkolem bylo navrhnout postup výroby anizotropního MRE. Zvolila jsem způsob výroby pomocí tzv. voxelů – univerzálních stavebních bloků, které lze poměrně snadno připravit. Jejich velkou výhodou je široká variabilita použití pro vytvoření různých 3D struktur, které mohou mít různé vlastnosti či funkce v závislosti jejich reakce na vnější magnetické pole. Pro porovnání jsem připravila tři druhy voxelů (silikonové, izotropní MRE a anizotropní MRE). Pro demonstraci použití voxelů, a prakticky i vlastností samotného MRE, jsem vytvořila tři jednoduché transformátory s jádrem vyrobenými spojením připravených voxelů. Vliv použitého jádra byl porovnán na základě měření indukovaného napětí na sekundárním vinutí transformátoru (výstupní napětí). Mnohem menší ztráty napětí na výstupu bylo dosaženo s jádrem z anizotropních MRE voxelů, díky kterým se snadněji uzavírá indukční tok jádrem. Navíc, při deformaci (stlačení) tohoto transformátoru se měřené napětí zmenšuje (viz Obr. 61), mohl by tedy najít využití jako senzor. Jedná se ale zatím pouze o prototyp demonstrující použití voxelů v kombinaci s vlastnostmi anizotropního MRE. Po vyřešení problému sedimentace u vzorků HeavyM (Fe₈₅Si₁₅ s 80% plněním) by bylo zajímavé vyrobit voxely právě z tohoto materiálu a porovnat chování tohoto transformátoru s již vyrobenými MRE transformátory.

Nakonec by bylo dobré zmínit, že bylo v rámci práce prokázáno, že anizotropii MRE má smysl řešit, protože ovlivňuje výsledné vlastnosti tohoto materiálu a umožňuje použití orientovaného MRE v různých aplikacích, zejména ve zmíněné senzorce.

Výsledky této práce byly již využity v rámci přípravy odborné publikace [44] na mezinárodní konferenci MARSS 2020 (International Conference on Manipulation, Automation and Robotics at Small Scales) v Torontu.

Literatura

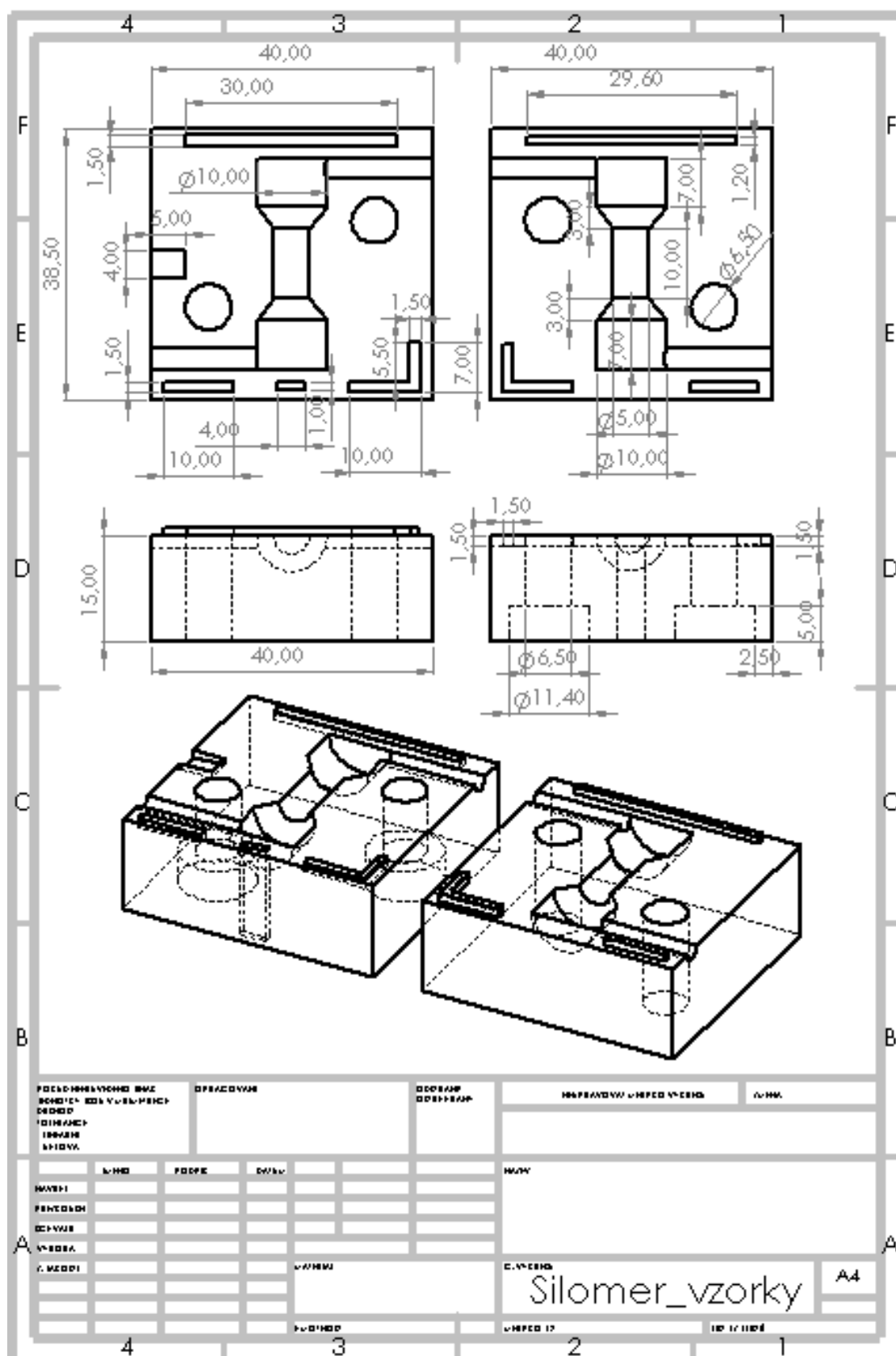
- [1] Y. Xu, G. Liao, and T. Liu, "Magneto-Sensitive Smart Materials and Magnetorheological Mechanism," *Nanofluid Flow Porous Media*, Mar. 2019, doi: 10.5772/INTECHOPEN.84742.
- [2] Y. Kim and X. Zhao, "Magnetic Soft Materials and Robots," *Chem. Rev.*, vol. 122, no. 5, pp. 5317–5364, Mar. 2022, doi: 10.1021/ACS.CHEMREV.1C00481.
- [3] W. Hu, G. Z. Lum, M. Mastrangeli, and M. Sitti, "Small-scale soft-bodied robot with multimodal locomotion," *Nat. 2018 5547690*, vol. 554, no. 7690, pp. 81–85, Jan. 2018, doi: 10.1038/nature25443.
- [4] T. Xu, J. Zhang, M. Salehizadeh, O. Onaizah, and E. Diller, "Millimeter-scale flexible robots with programmable three-dimensional magnetization and motions," *Sci. Robot.*, vol. 4, no. 29, Apr. 2019, doi: 10.1126/SCIROBOTICS.AAV4494/SUPPL_FILE/AAV4494_SM.PDF.
- [5] Z. Liu, M. Li, X. Dong, Z. Ren, W. Hu, and M. Sitti, "Creating three-dimensional magnetic functional microdevices via molding-integrated direct laser writing," *Nat. Commun. 2022 131*, vol. 13, no. 1, pp. 1–11, Apr. 2022, doi: 10.1038/s41467-022-29645-2.
- [6] U. G. K. Wegst, H. Bai, E. Saiz, A. P. Tomsia, and R. O. Ritchie, "Bioinspired structural materials," *Nat. Mater. 2014 141*, vol. 14, no. 1, pp. 23–36, Oct. 2014, doi: 10.1038/nmat4089.
- [7] "(PDF) Magnetorheological fluids: a review. *Soft Matter* 7:3701-3710." https://www.researchgate.net/publication/224862135_Magnetorheological_fluids_a_review_Soft_Matter_73701-3710 (accessed May 25, 2022).
- [8] M. Sheikholeslami and O. Mahian, "Enhancement of PCM solidification using inorganic nanoparticles and an external magnetic field with application in energy storage systems," *J. Clean. Prod.*, vol. 215, pp. 963–977, Apr. 2019, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2019.01.122.
- [9] M. T. López-López, G. Vertelov, G. Bossis, P. Kuzhir, and J. D. G. Durán, "New magnetorheological fluids based on magnetic fibers," *J. Mater. Chem.*, vol. 17, no. 36, pp. 3839–3844, Sep. 2007, doi: 10.1039/B705871C.
- [10] T. Shiga, A. Okada, and T. Kurauchi, "Magnetroviscoelastic behavior of composite gels," *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 58, no. 4, pp. 787–792, Oct. 1995, doi: 10.1002/APP.1995.070580411.
- [11] B. Wei, X. Gong, W. Jiang, L. Qin, and Y. Fan, "Study on the properties of magnetorheological gel based on polyurethane," *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 118, no. 5, pp. 2765–2771, Dec. 2010, doi: 10.1002/APP.32688.
- [12] Y. Xu, X. Gong, S. Xuan, W. Zhang, and Y. Fan, "A high-performance magnetorheological material: Preparation, characterization and magnetic-mechanic coupling properties," *Soft Matter*, vol. 7, no. 11, pp. 5246–5254, Jun. 2011, doi: 10.1039/C1SM05301A.
- [13] "The investigation on the nonlinearity of plasticine-like magnetorheological material under oscillatory shear rheometry," *J. Rheol. (N. Y. N. Y.)*, vol. 56, no. 6, pp. 1375–1391, Nov. 2012, doi: 10.1122/1.4739263.
- [14] T. Liu and Y. Xu, "Magnetorheological Elastomers: Materials and Applications," *Smart Funct. Soft Mater.*, Mar. 2019, doi: 10.5772/INTECHOPEN.85083.
- [15] T. H. Nam, I. Petříková, and B. Marvalová, "Experimental characterization and

- viscoelastic modeling of isotropic and anisotropic magnetorheological elastomers,” *Polym. Test.*, vol. 81, p. 106272, Jan. 2020, doi: 10.1016/J.POLYMERTESTING.2019.106272.
- [16] L. Chen, X. L. Gong, and W. H. Li, “Microstructures and viscoelastic properties of anisotropic magnetorheological elastomers,” *Smart Mater. Struct.*, vol. 16, no. 6, pp. 2645–2650, Dec. 2007, doi: 10.1088/0964-1726/16/6/069.
- [17] M. Lokander and B. Stenberg, “Performance of isotropic magnetorheological rubber materials,” *Polym. Test.*, vol. 22, no. 3, pp. 245–251, May 2003, doi: 10.1016/S0142-9418(02)00043-0.
- [18] E. Galipeau and P. Ponte Castañeda, “The effect of particle shape and distribution on the macroscopic behavior of magnetoelastic composites,” *Int. J. Solids Struct.*, vol. 49, no. 1, pp. 1–17, Jan. 2012, doi: 10.1016/J.IJSOLSTR.2011.08.014.
- [19] I. Bica, “Magnetoresistor sensor with magnetorheological elastomers,” *J. Ind. Eng. Chem.*, vol. 17, no. 1, pp. 83–89, Jan. 2011, doi: 10.1016/J.JIEC.2010.12.001.
- [20] M. Medek, “MKP analýza tlumiče vibrací,” 2016.
- [21] L. Chen and S. Jerrams, “A rheological model of the dynamic behavior of magnetorheological elastomers,” *J. Appl. Phys.*, vol. 110, no. 1, p. 013513, Jul. 2011, doi: 10.1063/1.3603052.
- [22] M. A. Cantera, M. Behrooz, R. F. Gibson, and F. Gordaninejad, “Modeling of magneto-mechanical response of magnetorheological elastomers (MRE) and MRE-based systems: A review,” *Smart Mater. Struct.*, vol. 26, no. 2, Feb. 2017, doi: 10.1088/1361-665X/AA549C.
- [23] Z. Varga, G. Filipcsei, and M. Zrínyi, “Magnetic field sensitive functional elastomers with tuneable elastic modulus,” *Polymer (Guildf).*, vol. 47, no. 1, pp. 227–233, Jan. 2006, doi: 10.1016/J.POLYMER.2005.10.139.
- [24] B. Miroslava Horáčková, “Magnetoreologické elastomery a jejich radioabsorpční schopnosti,” 2018.
- [25] M. Kazemian Abyaneh, S. Ekar, S. K. Kulkarni, and S. SCpA, “Piezoresistivity and Mechanical Behavior of Metal-polymer Composites under Uniaxial Pressure,” *J. Mater. Sci. Res.*, vol. 1, no. 3, 2012, doi: 10.5539/jmsr.v1n3p50.
- [26] N. Bira, P. Dhagat, and J. R. Davidson, “A Review of Magnetic Elastomers and Their Role in Soft Robotics,” *Front. Robot. AI*, vol. 7, p. 146, Oct. 2020, doi: 10.3389/FROBT.2020.588391/BIBTEX.
- [27] H.-J. Chung, A. M. Parsons, and L. Zheng, “Magnetically Controlled Soft Robotics Utilizing Elastomers and Gels in Actuation: A Review,” *Adv. Intell. Syst.*, vol. 3, no. 3, p. 2000186, Mar. 2021, doi: 10.1002/AISY.202000186.
- [28] J. Sang Ho, “Voxel, short for volume pixel, is the smallest distinguishable... | Download Scientific Diagram,” 2011, Accessed: May 28, 2022. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/figure/Voxel-Voxel-short-for-volume-pixel-is-the-smallest-distinguishable-box-shaped-part-of-a_fig6_221917509.
- [29] J. Drápala and M. Kursá, “ELEKTROTECHNICKÉ MATERIÁLY - Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava (učební text).” 2012.
- [30] “Měření magnetických vlastností | ABC MAGNET.” <https://www.abcmagnet.cz/cs/kontrola-kvality/mereni-magneticky-ch-vlastnosti> (accessed May 15, 2022).
- [31] B. Vybíral, “Magnetické pole v látce (Elektrodynamika II.) .” .
- [32] Ing. Radovan Hartmann, “Vlastní indukčnost - Magnetismus,” 2013.

- https://www.sokolska.cz/DUMy/ELE/VY_32_INOVACE_44-16.pdf (accessed May 22, 2022).
- [33] “Hysteresisgraph HG 200 BROCKHAUS MEASUREMENTS.” <http://www.brockhaus.com/wp-content/uploads/2021/11/Hystograph-HG-200.pdf> (accessed May 25, 2022).
- [34] “STATICKÉ ZKOUŠKY KRÁTKODOBÉ,” Accessed: May 22, 2022. [Online]. Available: https://ufmi.ft.utb.cz/texty/kzm/KZM_09.pdf.
- [35] J. Heczko, “Modelování pryžových součástí při zohlednění změn mechanických vlastností způsobených provozními podmínkami,” *Disertační práce*, 2020. <https://dspace5.zcu.cz/handle/11025/41900> (accessed May 24, 2022).
- [36] V. Miller, “Faradayův-Lenzův zákon.”
- [37] “Transformátor - základní vlastnosti a dělení.” <https://oenergetice.cz/elektroenergetika/transformator-zakladni-vlastnosti-a-deleni> (accessed May 22, 2022).
- [38] “Dragon Skin™ FX- Pro™ Product Information | Smooth-On, Inc.” <https://www.smooth-on.com/products/dragon-skin-fx-pro/> (accessed May 23, 2022).
- [39] “Dragon Skin™ 10 FAST Product Information | Smooth-On, Inc.” <https://www.smooth-on.com/products/dragon-skin-10-fast/> (accessed May 23, 2022).
- [40] “Psycho Paint™ Product Information | Smooth-On, Inc.” <https://www.smooth-on.com/products/psycho-paint/> (accessed May 23, 2022).
- [41] P. Ing. Polcar, “Elektromechanický systém s magnetickou kapalinou,” 2013.
- [42] “What is Magnetic Permeability? - Matmatch.” <https://matmatch.com/learn/property/magnetic-permeability> (accessed May 15, 2022).
- [43] L. Bodelot, J. P. Voropaieff, and T. Pössinger, “Experimental investigation of the coupled magneto-mechanical response in magnetorheological elastomers,” *Exp. Mech.*, vol. 58, no. 2, pp. 207–221, Feb. 2018, doi: 10.1007/S11340-017-0334-7/FIGURES/12.
- [44] O. Sodomka, V. Skřivan, K. Jozová, and F. Mach, “Magnetically Controlled Microfluidic Channels.”

Přílohy

Rozměry – forma na velké vzorky (pro tahovou zkoušku)



Rozměry – forma voxely

