

Magnetoaktivní pěny jako účinné radioabsorbéry

Bc. Michal Hvorecký

Diplomová práce
2025



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2024/2025

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	Bc. Michal Hvorecký
Osobní číslo:	T23302
Studijní program:	N0788A270002 Výrobní inženýrství
Forma studia:	Prezenční
Téma práce:	Magnetoaktivní pěny jako účinné radioabsorbéry

Zásady pro vypracování

1. Vypracování literární rešerši na zadané téma
2. Příprava magnetoaktivních pěn dle zadání
4. Evaluace vlastností zkoumaných magnetoaktivních pěn
5. Vyhodnocení a diskuze získaných výsledků

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

Seznam doporučené literatury:

1. SEDLACIK M., MRLIK M., BABAYAN V., PAVLINEK V. Magnetorheological elastomers with efficient electromagnetic shielding. *Composite Structures*, 135 (2016) 199-204.
2. MARZUKI A.A., NORDIN, N.A., MAZLAN, S.A., JOHARI, M.A.F., KHAIDIR, R.E.M., SEDLACIK, M., UBAIDILLAH. Enhancement of the rheological properties of magnetorheological foam via different constraint volumes foaming approach. *Polymer Testing*, 128 (2023) 108235.
3. BASTOLA, A.K., PAUDEL, M., LI, L., LI, W.H. Recent progress of magnetorheological elastomers: a review. *Smart Materials and Structures*, 29(12) (2020) 123002.

Vedoucí diplomové práce: **prof. Ing. Michal Sedlačík, Ph.D.**
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce: **2. ledna 2025**
Termín odevzdání diplomové práce: **9. května 2025**

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

L.S.

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

Ve Zlíně dne 3. února 2025

PROHLÁŠENÍ AUTORA DIPLOMOVÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že

- odevzdáním diplomové práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., v platném znění bez ohledu na výsledek obhajoby;
- diplomová práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému a bude dostupná k nahlédnutí;
- jedno vyhotovení diplomové práce v listinné podobě bude ponecháno Univerzitě Tomáše Bati ve Zlíně k uložení;
- na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- podle § 60 odst. 1 autorského zákona má Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- podle § 60 odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – diplomovou práci – nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- pokud bylo k vypracování diplomové práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tj. k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové práce využít ke komerčním účelům;
- pokud je výstupem diplomové práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá; neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji, že

- jsem na diplomové práci pracoval(a) samostatně a použitou literaturu jsem řádně citoval(a); v případě publikace výsledků budu uveden(a) jako spoluautor;
- odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou obsahově totožné.

Ve Zlíně, dne

.....
podpis autora

ABSTRAKT

Cílem diplomové práce je vyrobit magnetoaktivní pěnu z elastomeru metodou vulkanizace v uzavřené formě, prozkoumat její radioabsorpční a mechanické vlastnosti a určit vhodný poměr grafitu ve směsi. V teoretické části jsou popsány různé magnetoaktivní materiály včetně magnetoaktivních pěn, samotný magnetoaktivní jev a princip radioabsorpce materiálu. Praktická část zahrnuje přípravu směsí s různým složením, výrobu zkušebních vzorků a také zpracování naměřených výsledků.

Klíčová slova: elektromagnetické stínění, magnetoreologie, radioabsorpce, grafit, elastomer

ABSTRACT

The aim of this diploma thesis is to produce magnetoactive foam from elastomer using the vulcanization method in a closed mold, to examine its radio-absorbing and mechanical properties, and to determine the optimal graphite ratio in the mixture. The theoretical part describes various magnetoactive materials, including magnetoactive foams, the magnetoactive effect itself, and the principle of material radio absorption. The practical part includes the preparation of mixtures with different compositions, the production of test samples, and the processing of the measured results.

Keywords: electromagnetic shielding, magnetorheology, radio absorption, graphite, elastomer

Tímto bych chtěl poděkovat prof. Ing. Michalu Sedláčkoví Ph.D. za cenné rady a asistenci při měření vlastností materiálů, Ing. Petru Zádrapovi Ph.D. za pomoc při přípravě směsí, vzorků a měření mechanických vlastností, a své přítelkyni a rodině za psychickou podporu.

OBSAH

ÚVOD.....	11
I TEORETICKÁ ČÁST	12
1 MAGNETOREOLOGICKÝ EFEKT	13
2 MAGNETICKÉ MATERIÁLY	14
2.1 PARAMAGNETICKÉ LÁTKY.....	14
2.2 DIAMAGNETICKÉ LÁTKY	15
2.3 FEROMAGNETICKÉ LÁTKY	15
2.3.1 Ferity	16
2.3.2 Struktura feromagnetických látek	16
2.3.3 Křivka prvotní magnetizace	17
3 ELASTOMERY.....	19
4 MAGNETOAKTIVNÍ MĚKKÉ MATERIÁLY	21
4.1 MATRICE.....	21
4.2 MAGNETICKÁ PLNIVA	22
4.2.1 Magneticky tvrdé částice.....	22
4.2.2 Magneticky měkké částice	23
5 MAGNETOAKTIVNÍ PĚNY	24
5.1 STRUKTURA A SLOŽENÍ MAGNETOAKTIVNÍCH PĚN	24
5.2 VÝROBA MAGNETOAKTIVNÍCH PĚN	24
5.3 VÝROBA MAGNETOAKTIVNÍCH MATERIÁLŮ	25
5.3.1 Konvenční metoda – lití	25
5.3.2 3D/4D tisk	26
5.3.3 Direct ink writing (DIW)	28
5.3.4 The fused deposition modelling (FDM).....	29
5.3.5 Digital light synthesis (DLS)	30
5.3.6 Material jetting (MJ)	31
5.3.7 Two photon polymerization (TPP).....	31
6 DALŠÍ TYPY MAGNETOREOLOGICKÝCH MATERIÁLŮ	33
6.1 MAGNETOREOLOGICKÉ KAPALINY	33
6.2 MAGNETOREOLOGICKÉ ELASTOMERY	33
7 PRINCIP RADIOABSORPCE	35
7.1 VLIV PORÉZNÍ ASYMETRICKÉ STRUKTURY	36
8 SHRUTÍ TEORETICKÉ ČÁSTI.....	37
II PRAKTICKÁ ČÁST.....	38
9 CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE	39
10 PŘÍPRAVA KAUKUKOVÉ SMĚSI	40

11	PŘÍPRAVA VZORKŮ.....	46
11.1	VZORKY OBSAHUJÍCÍ ŽELEZNÉ ČÁSTICE	47
11.1.1	Vzorek č. 1	47
11.1.2	Vzorek č. 2	49
11.1.3	Vzorek č. 3	50
11.1.4	Vzorek č. 7	51
11.2	VZORKY NEOBSAHUJÍCÍ ŽELEZNÉ ČÁSTICE	52
11.2.1	Vzorek č. 4	52
11.2.2	Vzorek č. 5	53
11.2.3	Vzorek č. 6	54
11.2.4	Vzorek č. 8	55
12	RADIOABSORPČNÍ VLASTNOSTI MAGNETOAKTIVNÍCH PĚN.....	57
12.1	PŘÍPRAVA ZKUŠEBNÍCH TĚLÍSEK	57
12.2	VÝSLEDKY MĚŘENÍ	58
12.2.1	WR248.....	58
12.2.2	WR187.....	60
12.2.3	WR137.....	62
12.2.4	Srovnání výsledků frekvenčních pásem	63
13	MECHANICKÉ VLASTNOSTI MAGNETOAKTIVNÍCH PĚN	66
13.1	TVRDOT SHORE A – ČSN EN ISO 868	66
13.2	ODRAZOVÁ PRUŽNOST – ČSN EN ISO 4662	68
13.3	TLAKOVÁ ZKOUŠKA – ISO 3386.....	70
13.3.1	Naměřená data a výsledky	71
	ZÁVĚR.....	74
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	75
	SEZNAM OBRÁZKŮ	80
	SEZNAM TABULEK.....	82
	SEZNAM GRAFŮ	83
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	84

ÚVOD

V současné době dochází k rostoucímu zájmu o chytré materiály s řízenými mechanickými a elektromagnetickými vlastnostmi. Mezi takové materiály patří i magnetoaktivní pěny (MAP), které představují perspektivní skupinu adaptivních materiálů využitelných v různých technologických aplikacích. Kombinace porézní struktury a magnetoreologických vlastností činí tyto materiály výhodné jak v oblasti tlumení vibrací a nárazů, tak i v oblasti elektromagnetického a mikrovlnného stínění.

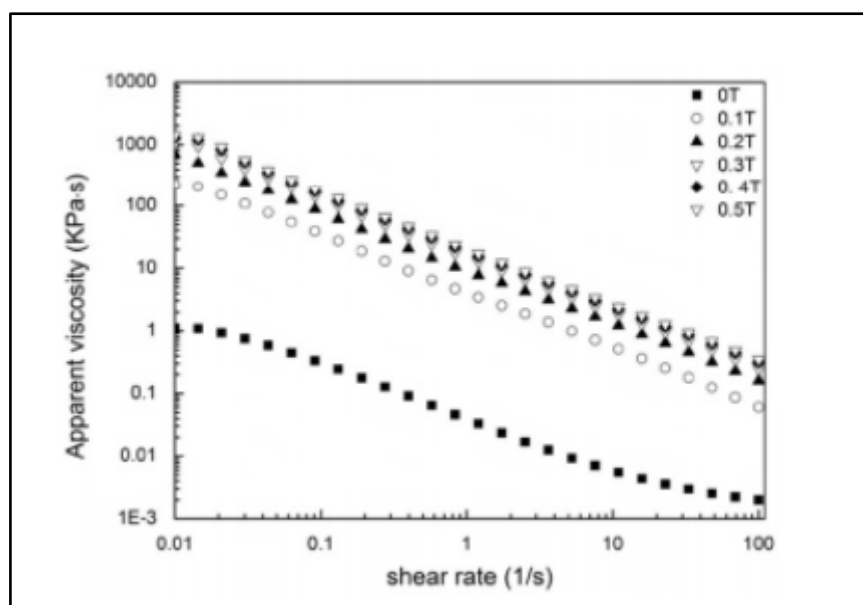
Cílem této diplomové práce je příprava různých typů MAP a sledování vlivu jednotlivých složek na radioabsorpční vlastnosti těchto materiálů. Pro efektivní využití těchto pěn bude stěžejní návrh jejich složení. V rámci této studie budou použity jako magnetická složka magnetické mikročástice a elastomerní matrice bude pěněna za přítomnosti exfoliovaného grafitu jakožto dielektrické složky.

Struktura práce je rozdělena do několika částí. Nejprve bude popsán teoretický úvod do problematiky absorpce elektromagnetických vln a principů fungování radioabsorpčních materiálů. Následně bude představen princip magnetoaktivních pěn, jejich složení a metody výroby. Nejzajímavější částí práce bude experimentální analýza vlastností vybraných vzorků, jejich testování a interpretace naměřených dat. Závěrem budou shrnuty dosažené výsledky a diskutovány možné aplikace magnetoaktivních pěn v praxi.

I TEORETICKÁ ČÁST

1 MAGNETOREOLOGICKÝ EFEKT

Magnetoreologický efekt je zpravidla spojován s magnetizací částic v suspenzi vyvolanou působením vnějšího magnetického pole. Bez tohoto pole mají suspenze poměrně nízkou viskozitu, avšak po jeho aplikaci se částice zmagnetizují, vzájemně se přitahují podél siločar a vytvářejí strukturované útvary, které se rozprostírají celým systémem. Tímto procesem materiál získává vysoké mezní napětí, což znamená, že k uvedení suspenze do pohybu je nutné překonat určitou minimální hodnotu smykového napětí. Tento efekt se rovněž vyznačuje výraznou zdánlivou viskozitou závislou na smykové rychlosti a zvýšenou viskoelasticitou ovlivněnou přítomností magnetického pole. [1; 2; 3; 4]



Obrázek 1 Závislost viskozity η na rychlosti smykové deformace při různé intenzitě magnetického pole u MR suspenzí [4]

2 MAGNETICKÉ MATERIÁLY

Permitivita prostředí charakterizuje schopnost tělesa vytvářet elektrické pole. Podobně je charakterizován pojem permeabilita (μ), což je veličina popisující magnetické vlastnosti hmoty. Pro popsání permeability materiálu se používá rovnice, ve které se nachází ve vzájemném poměru dvě hodnoty, kterými jsou magnetická indukce (B) a intenzita magnetického pole (H). [5; 6]

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

V případě prostředí vakua nabývá permeabilita specifické hodnoty, která je vyjádřena za pomoci rychlosti světla ve vakuu (c).

$$\mu_0 = \frac{1}{\varepsilon_0 \cdot c^2} = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H} \cdot \text{m}^{-1} \quad (2)$$

Pro možnost vzájemného srovnání různých magnetických materiálů byla zavedena relativní permeabilita (μ_r), na jejímž základě se látky dělí o tři hlavních skupin.

- paramagnetické látky - $\mu_r > 1$,
- diamagnetické látky - $\mu_r < 1$,
- feromagnetické látky - $\mu_r \gg 1$.

Magnetické pole je generováno pohybem elektronů po přesně definované dráze kolem jádra atomu (Bohrův atomový model). Tento pohyb je možné popsat magnetickým momentem, což je vektorová veličina představující součin proudu protékajícího smyčkou a odpovídajícího plošného vektoru. [5; 6]

2.1 Paramagnetické látky

Látky, které mají schopnost zesilovat magnetické pole jsou označovány jako paramagnetické a jejich relativní permeabilita je větší než 1 ($\mu_r > 1$). Do této skupiny patří například hliník ($\mu_r = 1,000023$), mangan, chrom nebo platina. [5]

Na rozdíl od diamagnetických látek mají paramagnetika vlastní magnetický moment i v nepřítomnosti vnějšího magnetického pole. Když je však taková látka umístěna do vnějšího magnetického pole, magnetické momenty jednotlivých atomů se začnou orientovat do směru tohoto pole. Postupným natáčením magnetických momentů atomů do směru působícího magnetického pole je základem těchto látek. [5]

Síla magnetického efektu u paramagnetických materiálů je závislá na teplotě. Platí, že s rostoucí teplotou se jejich magnetizace snižuje, protože tepelné pohyby částic narušují uspořádání magnetických momentů. Naopak při nižších teplotách se magnetické pole zesiluje, což znamená, že magnetismus paramagnetik je nepřímo úměrný teplotě. [5]

2.2 Diamagnetické látky

Látky, které oslabují působení magnetického pole, se nazývají diamagnetické ($\mu_r < 1$). Do této kategorie patří poměrně malý počet látek, mezi něž patří inertní plyny (He, Ne, Ar, Kr, Xe, Rn), většina organických sloučenin, některé kovy (např. měď, stříbro, zlato, rtuť a bizmut) a také voda (H_2O). [5]

Když je diamagnetický materiál umístěn do vnějšího magnetického pole, nepůsobí pole přímo na celý nemagnetický atom najednou. Místo toho ovlivňuje pohyb jednotlivých elektronů obíhajících kolem jádra. V nepřítomnosti vnějšího magnetického pole se elektrony přirozeně pohybují po kruhových trajektoriích díky Coulombově dostředivé síle, která působí jako centrální síla udržující je v pohybu. Když je takový atom vystaven magnetickému poli, vzniká další vnitřní síla (Lorenzova), která mění úhlovou rychlost pohybujících se elektronů. Tato změna pohybu elektronů vyvolává v atomu malý magnetický moment, který je orientován v opačném směru než působící magnetické pole. Výsledkem je celkové snížení intenzity původního magnetického pole. Tento jev je základní charakteristikou diamagnetismu. [5]

V roce 1895 Pierre Curie zjistil, že diamagnetické vlastnosti materiálů zůstávají do značné míry neovlivněny teplotou nebo změnami fyzikálního stavu látky (pevná látka, kapalina). [5]

2.3 Feromagnetické látky

Na rozdíl od diamagnetických látek, feromagnetické látky značně umocňují působení magnetického pole. Je to způsobeno kvůli vysoké permeabilitě těchto látek, která se pohybuje mezi hodnotami 10^2 až 10^5 . Feromagnetický jev lze běžně pozorovat u čtyř prvků a jejich slitin – Fe, Co, Ni a Gd. [5]

Feromagnetické látky závisí na uspořádání atomů v krystalické mřížce na rozdíl od předchozích dvou skupin (diamagnetické a paramagnetické), kde je jejich účinek závislý na struktuře jejich atomů. Atomy feromagnetických látek jsou samy o sobě paramagnetické.

Dojde-li k zahřátí těchto látek na Curieovu teplotu (viz. Tabulka 1), ztratí okamžitě své feromagnetické schopnosti a stanou se tak látkami paramagnetickými. [5]

Tabulka 1 Curieova teplota vybraných látek [5]

Látka	Curieova teplota [°C]
Nikl (Ni)	358
Oxid železitý (Fe_2O_3)	622
Železo (Fe)	768
Kobalt (Co)	1 130

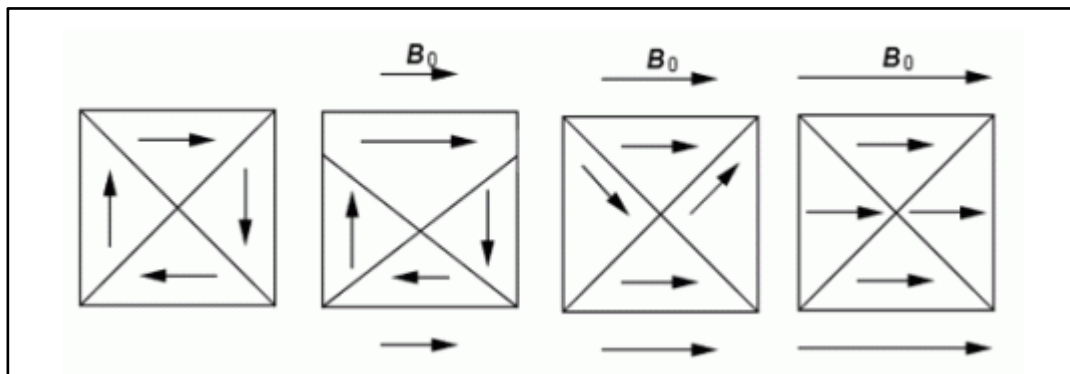
Po vystavení feromagnetické látky Curieově teplotě a jejím následným ochlazením mimo magnetické pole ztratí taková látka své magnetické vlastnosti do doby, dokud se tento proces nezopakuje a látka se nechá zchladnout v magnetickém poli. [5]

2.3.1 Ferity

Ferity jsou speciálním případem feromagnetických látek. Jedná se o sloučeniny oxidu železa s oxidy jiných kovů jako jsou například mangan nebo baryum. Tyto sloučeniny značně zesilují magnetické pole a jejich charakteristickou vlastností je vysoký elektrický odpor, který umožňuje uplatnění těchto materiálů v elektrotechnice. [5]

2.3.2 Struktura feromagnetických látek

Struktura je tvořena mikrooblastmi (doménová struktura), ve kterých jsou směry magnetických momentů mimo vnější magnetické pole odlišné a jejich součet je tak nulový. Kvůli tomu se jeví feromagnetické látky navenek jako nemagnetické. [5]

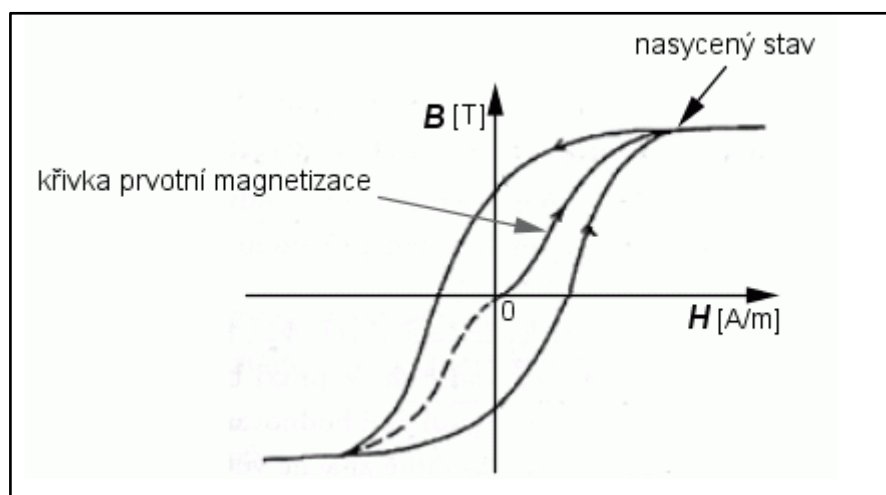


Obrázek 2 Natáčení vektorů vnitřní magnetizace při vložení feromagnetické látky do vnějšího magnetického pole [5]

Jakmile je však feromagnetická látka vložena do vnějšího magnetického pole, dochází k postupné orientaci magnetických momentů jednotlivých domén do směru působícího pole. Tento proces probíhá skokově a při dostatečně silném magnetickém poli dosáhne materiál stavu nasycení, kdy všechny domény jsou plně orientovány a další zvyšování intenzity pole již významně nezvyšuje magnetizaci. První hypotézu o existenci vnitřního pole ve feromagnetických materiálech vyslovil Pierre Weiss, ale důkaz o jeho existenci poskytli až Jakov Iljič Frenkel a Werner Heisenberg, kteří tento jev popsali pomocí kvantově-mechanických výměnných sil mezi elektrony sousedních atomů. [5]

2.3.3 Křivka prvotní magnetizace

Tato křivka popisuje chování feromagnetických materiálů po první magnetizaci. Intenzita vnějšího magnetického pole (H), ve kterém je umístěn původně nezmagnetizovaný feromagnetický materiál, je postupně zvyšována. Následně postupným snižováním intenzity začne křivka magnetické indukce (B) vykazovat zpoždění a nekopíruje tak původní průběh (hystereze). Výsledek tohoto cyklu je označován jako hysterezní smyčka (viz. Obrázek 3). Po vynulování intenzity magnetického pole si materiál uchová určitou magnetizaci, což se označuje jako remanentní magnetizace. Grafické znázornění průběhu tohoto cyklu je uvedeno na obrázku 3. [5]



Obrázek 3 Hysterezní křivka [5]

Na základě tvaru hysterezní smyčky se feromagnetika dělí na:

- **Magneticky měkké** – Hysterezní smyčka je úzká a jejich zmagnetování je jednoduché, ale po odstranění vnějšího magnetického pole svou magnetizaci rychle ztrácejí. Uplatňují se v elektromagnetech a transformátorech.

- **Magneticky tvrdé** – Hysterezní smyčka je široká, což umožňuje těmto materiálům zachovat si magnetizaci i po odstranění vnějšího magnetického pole. Díky tomu se z takových látek vyrábí permanentní magnety.

Při magnetizaci feromagnetik dochází rovněž k magnetostrikci. To znamená, že při zmagnetování dochází k rozměrovým a objemovým změnám materiálu v důsledku změny uspořádání atomů v doménách. Tento efekt je však velmi malý (v řádu statisícin původní délky) a závisí na intenzitě a směru působení magnetického pole vůči krystalové struktuře materiálu. [5]

3 ELASTOMERY

Elastomery jsou skupina polymerů, které jsou charakteristické svými elastickými vlastnostmi. Struktura těchto polymerů je tvořena dlouhými řetězci, které jsou příčně propojeny. Toto propojení umožňuje materiálu se po deformaci vrátit do svých počátečních rozměrů, tomuto efektu se říká vratná deformace. [7]

Pro zlepšení vlastností a pro většinu použití elastomerů se používá chemický proces vulkanizace, při kterém dochází k síťování struktury elastomeru. Proces vulkanizace je nevratný a zvulkanizovaný elastomer již není možné znovu zpracovat. Aby mohl elastomer zvulkanizovat, je potřeba vytvořit směs, která bude obsahovat vulkanizační systém. [7; 8]

Vulkanizační systém se skládá z několika částí:

- **Vulkanizační činidlo**
 - Vytváří síťové vazby v elastomeru – síra
- **Aktivátory**
 - Spouští proces vulkanizace – ZnO (oxid zinečnatý)
- **Urychlovače**
 - Urychlují vulkanizační proces a zajišťují správný průběh vulkanizace – dipropylenglykol (DPG), cyklohexylbenzothiazol-sulfenamid (CBS), Mercaptobenzothiazol (MBT)
- **Retardéry**
 - Zabraňují předčasné vulkanizaci – cyklohexylthiophthalimid (CTP)
- **Antidegradanty a stabilizátory**
 - Zajišťují ochranou složku vulkanizátu např. proti stárnutí nebo proti UV záření – parafín, saze, vosky [8]

Základní surovinou pro výrobu elastomerů je kaučuk, který se dělí na dvě skupiny:

- **Přírodní kaučuk**
 - Získává se z mízy kaučukovníku brazilského – latex
 - Bez úprav má velmi špatnou odolnost vůči stárnutí a UV záření

- **Syntetický kaučuk**

- Vyrábí se chemickou polymerací monomerů
- Kladné vlastnosti i bez úprav
- Silikony, EPDM, NBR, neopren (CR) [9]

Elastomery se díky své mimořádné pružnosti, schopnosti pohlcovat vibrace a rázy, a vysoké odolnosti proti opotřebení, chemickému působení i vlivům prostředí uplatňují v široké škále technických a průmyslových oblastí. [7; 8; 9]

V automobilovém průmyslu slouží k výrobě pneumatik, těsnicích prvků, manžet, hadic, tlumičů a dalších komponent, které vyžadují pružnost i dlouhou životnost. Elastomer EPDM (ethylen-propylen-dienový kaučuk) se hojně používá pro těsnění oken a dveří vozidel díky své vysoké odolnosti vůči ozónu a UV záření. Syntetické kaučuky jako NBR (nitrilový kaučuk) a FKM (fluorovaný kaučuk) nacházejí uplatnění v oblasti motoru, zejména v palivových a olejových systémech, protože dobře odolávají látkám, které se zde nacházejí, a vysokým teplotám. [7; 8; 9]

V oblasti strojírenství a průmyslu se elastomery používají na výrobu těsnicích kroužků, hadic, tlumicích vložek nebo pásů v dopravních systémech. Pro svou chemickou odolnost se rovněž často uplatňují v chemickém průmyslu, kde zajišťují spolehlivé utěsnění potrubních spojů a chrání zařízení před korozí. V elektrotechnice slouží jako izolace, ochranné krytky nebo flexibilní prvky v různých zařízeních. [7; 8; 9]

4 MAGNETOAKTIVNÍ MĚKKÉ MATERIÁLY

Magneticky měkké materiály (MSM) jsou materiálové systémy složené z nemagnetické matrice a magnetického plniva. Jejich chování závisí na vlastnostech obou těchto složek. Pro dosažení požadovaných vlastností, jako je tvarová změna, programovatelné deformace a vysoké deformace při působení vnějších podnětů, je klíčový správný výběr materiálů a konstrukční návrh. [10; 11]

4.1 Matrice

Pro vývoj MSM se běžně využívají elastomerní polymery, které lze obecně rozdělit na silikony, akrylátové polymery a polyuretany. K dalším hojně používaným měkkým materiálům patří syntetické a přírodní hydrogely. [10; 12]

Jedním z požadavků na matricové materiály MSM je jejich vysoká elasticita. To znamená, že musí být schopny se po působení vnějšího zatížení vrátit do původního tvaru. Mezi nejčastěji používané měkké elastomery patří komerčně dostupné silikonové matrice, jako jsou Ecoflex, Elastosil, Sylgard. Tyto materiály jsou oblíbené pro svou snadnou přípravu, mechanickou a tepelnou stabilitu, nízké cyklické ztráty, odolnost vůči degradaci v prostředí, biokompatibilitu a netoxické vlastnosti. [10; 12]

V homogenním magnetickém poli vede spojení magneticky tvrdých mikročástic s měkkými elastomery ke komplexním změnám tvaru, jako jsou zkroucení či ohyb. Naopak kombinace magnetických měkkých mikročástic s měkkými elastomery výrazně zlepšuje elastické a tlumicí vlastnosti, což se běžně označuje jako magnetoreologické (MR) elastomery. [10; 12]

Mezi další typy elastomerních matric patří polymery na bázi akrylátů, jejichž měkkost lze upravit podle stupně provázání. Jednou z vlastností těchto polymerů je jejich schopnost usnadnit 3D tisk prostřednictvím fotopolymerizace, díky nízké viskozitě pryskyřice. Tyto měkké materiály vhodné pro 3D tisk lze také kombinovat s magnetickými nanovláknami za účelem vývoje magnetoaktivních materiálů. [10; 12]

Hydrogely představují další skupinu matricových materiálů, které si získaly značnou pozornost při vývoji MSM, a to díky své variabilní měkkosti od střední po extrémní a vysoké biokompatibilitě. Tyto polymery mohou ve své struktuře zadržovat až 90 hm. % vody. Typickým příkladem jsou polymery na bázi ethylen-glykolu. Ve srovnání s elastomery

nabízejí magnetické hydrogely významné výhody pro různé aplikace, zejména díky své výborné biokompatibilitě a měkké struktuře. [10; 12]

4.2 Magnetická plniva

Typickými magnetickými plnivy jsou feromagnetické částice, které jsou zodpovědné za reaktivní chování MSM, pokud není jako matricový materiál použit polymer s tvarovou pamětí. Magnetická plniva se dělí na dva typy:

- magneticky tvrdé částice,
- magneticky měkké částice. [10]

4.2.1 Magneticky tvrdé částice

Magneticky tvrdé částice se vyznačují velkou hysterezní smyčkou, což znamená, že si po zmagnetizování zachovávají vysokou zbytkovou magnetizaci (remanenci), zatímco k odmagnetování vyžadují silné vnější magnetické pole. Tento jev je způsoben jejich vysokou koercitivitou, tj. schopností materiálu odolávat změnám magnetického stavu i při působení opačně orientovaného magnetického pole. [10; 13; 14]

Díky těmto vlastnostem jsou magneticky tvrdé materiály vhodné pro výrobu permanentních magnetů, které si zachovávají svou magnetizaci i bez vnějšího pole. Jedním z nejčastěji používaných materiálů tohoto typu je slitina neodymu, železa a boru (Nd-Fe-B), která je známá svou extrémně vysokou magnetickou energií a širokým využitím v moderní technice. [10; 15; 16]

Neodymové magnety se používají například v elektromotorech, generátorech větrných turbín, magnetických spojkách nebo v reproduktorech a sluchátkách, kde jejich silná magnetizace umožňuje účinný přenos energie a zvuku. Kromě Nd-Fe-B patří mezi další magneticky tvrdé materiály samarium-kobalt (Sm-Co), který je oblíbený díky své vysoké teplotní stabilitě a odolnosti vůči korozi. [10; 15; 16; 14]

4.2.2 Magneticky měkké částice

Magneticky měkké částice se vyznačují nízkou magnetickou koercitivitou, úzkou hysterezní smyčkou při cyklickém zatěžování a odlehčování. Nejrozšířenějším zástupcem této skupiny je tzv. karbonylové železo (CIP), které chemicky představuje takřka čisté železo (obsah Fe > 99,5 %) připravené tepelným rozkladem pentakarbonylu železa. Kromě něj však existují i další typy magneticky měkkých částic, mezi něž patří především nanočástice oxidů čistých feromagnetických materiálů, jako jsou oxid železitý (Fe_2O_3), oxid železnato-železitý (Fe_3O_4) nebo oxid kobaltnatý (CoO). [10; 17]

5 MAGNETOAKTIVNÍ PĚNY

Magnetoaktivní pěny (MAP) jsou inteligentní porézní materiály, které se v různých formách používají k řešení širokého spektra problémů. Dají se využít například jako těsnění, tlumení vibrací nebo v případě této studie jako radioabsorbéry neboli stínící materiály mikrovlnného záření. Potenciál využití těchto pěn v dnešní době rychle roste, a to hlavně díky schopnosti reverzibilně měnit své viskoelastické vlastnosti v závislosti na působení vnějšího magnetického pole. [1; 18]

5.1 Struktura a složení magnetoaktivních pěn

Pěna se skládá ze dvou hlavních komponent, polymerní matrice a magnetických částic. Jako magnetické částice se obvykle využívá CIP, který se během výroby zapouští do porézní struktury pěny. Přítomnost magnetických částic má vliv i na velikost samotných pórů. Vysoká koncentrace má za následek zmenšení těchto pórů a z reologického hlediska se struktura s menšími póry stává křehčí, avšak její MR efekt je podstatně vyšší. Odstranění problému s křehkostí je možné docílit použitím elastičtější polymerní matrice. [18]

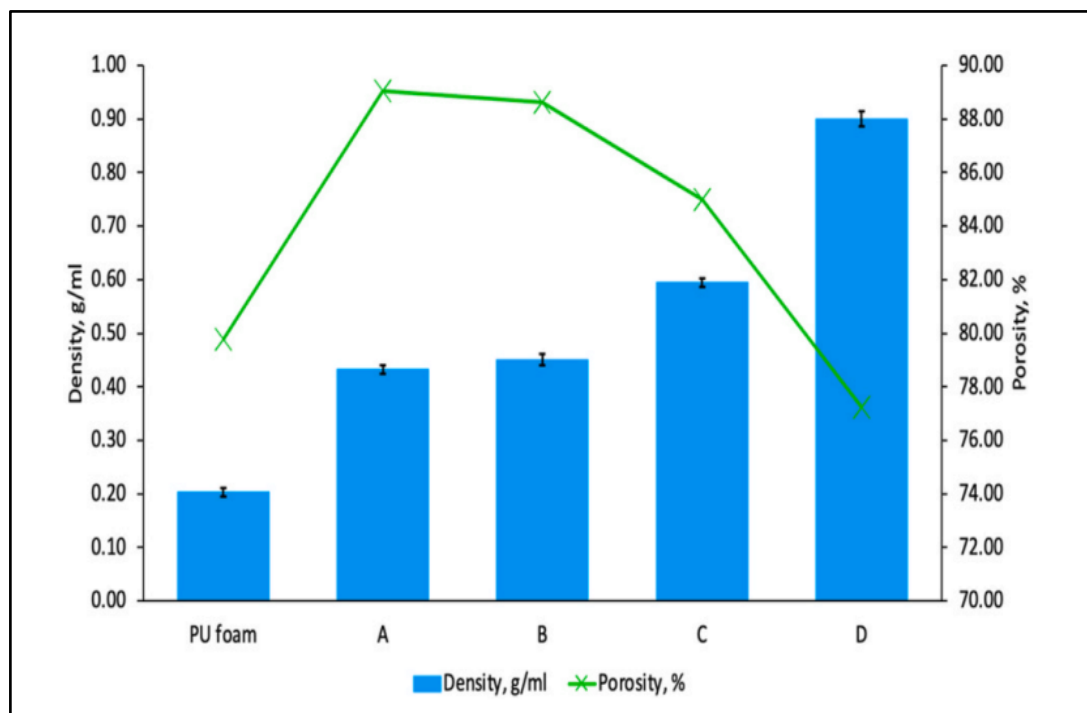
Existují však i pěny, kde jako magnetoaktivní složka figuruje magnetoreologická kapalina uvnitř absorpční matrice, houby či porézní pěny, která udržuje magnetoreologickou kapalinu v aktivní oblasti (v místě působícího magnetického pole). Pro fungování je zapotřebí pouze minimálního objemu MR kapaliny. Při aplikaci vnějšího magnetického pole nabývá MR kapalina uvnitř matrice vlastností, jakými je mez kluzu a odpor vůči smykovému tření. Díky absenci těsnění těchto systémů je možné pěny tvarově přizpůsobit na požadovanou geometrii a využít je jak v tlumičích, tak rotačních brzdných systémech. [19; 18]

Důležitými parametry magnetoaktivních pěn jsou pórovitost a propustnost, od kterých se odvíjí jejich tlumící účinek. Kromě vlivu na mechanické a magnetické vlastnosti pěny ovlivňují částice také její strukturu. Pro analýzu rozmístění částic v magnetoreologických polymerech se využívá rentgenové mikrotomografie. [1; 18]

5.2 Výroba magnetoaktivních pěn

K výrobě magnetoaktivních pěn se nejvíce osvědčil takzvaný řízený pěnicí proces. Při tomto procesu je možné regulovat strukturu pórů, které mají na výsledný produkt největší dopad a je tak možné výrobu této pěny reprodukovat. [18]

Oproti volnému pění omezuje řízený proces prostor pro expanzi pěny, čímž snižuje riziko kolapsu pórů. Proces je stále více inovován zejména v posledních letech, kdy bylo dosaženo lepších tlakových a ohybových vlastností přidáním jemně rozptýlených kenafových vláken do matrice. [18]



Obrázek 4 Závislost hustoty a pórovitosti pěn vyrobených při různých objemech řízeného pění [18]

Na obrázku 4 je možné vidět závislost hustoty a pórovitosti výsledné pěny za použití odlišných způsobů pění. Vzorek A byl vyráběn volným pěním, zatímco vzorek B byl pěn řízeně při 100% omezení pěního prostoru. Vzorky C a D byly rovněž pění řízeně, ale objem jejich pěního prostoru byl omezen ze 75 % pro vzorek C a z 50 % pro vzorek D. [18]

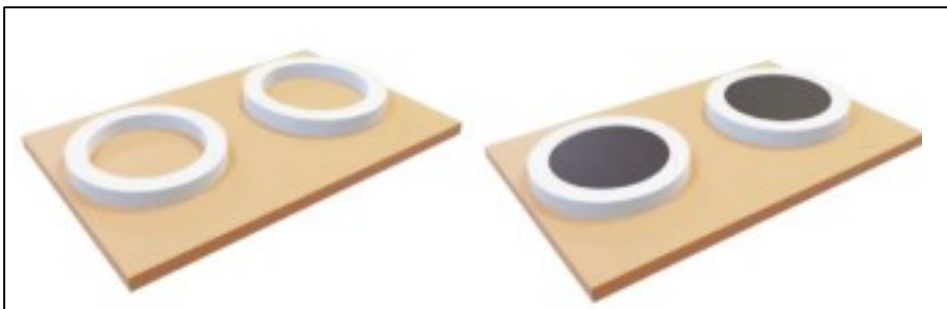
5.3 Výroba magnetoaktivních materiálů

Kromě výběru vhodné matrice a magnetického plniva hraje klíčovou roli také zvolená výrobní technologie, která by měla zajistit požadovanou výslednou strukturu. Obecně se výroba MSM dělí na konvenční metody a pokročilé technologie, jako je 3D/4D tisk. [10]

5.3.1 Konvenční metoda – lití

Nejběžnější metodou výroby MSM, jakožto i mnohých polymerních materiálů, je lití do formy. Pro výrobu se krom matrice a magnetických částic používají také síťovací

činnidla a iniciátory. V matrici dochází k tvoření polymerních sítí, které jsou dále obohaceny o vlastnosti, jako jsou tuhost nebo elasticita díky síťovacím činidlům. [10; 20; 21]



Obrázek 5 Lití MSM do formy [10]

Nejprve se všechny výchozí materiály pečlivě promíchají, aby se dosáhlo homogenního složení, což se obvykle provádí mechanickým mícháním a následným ošetřením ultrazvukem (sonikací). Směs se poté nalije do formy, kde probíhá polymerace. V závislosti na typu iniciátoru může být tento proces dokončen buď v tepelném prostředí, nebo UV zářením. Proces vytvrzování MSM může probíhat v magnetickém poli nebo mimo něj, v závislosti na použití. Bez působení magnetického pole během polymerace vzniká převážně homogenní (izotropní) materiál. Pokud naopak proces vytvrzování probíhá pod vlivem magnetického pole, magnetická plniva se orientují ve směru siločar působícího pole, což vede k vytvoření směrově závislého (anizotropního) MSM. [10; 20; 21]

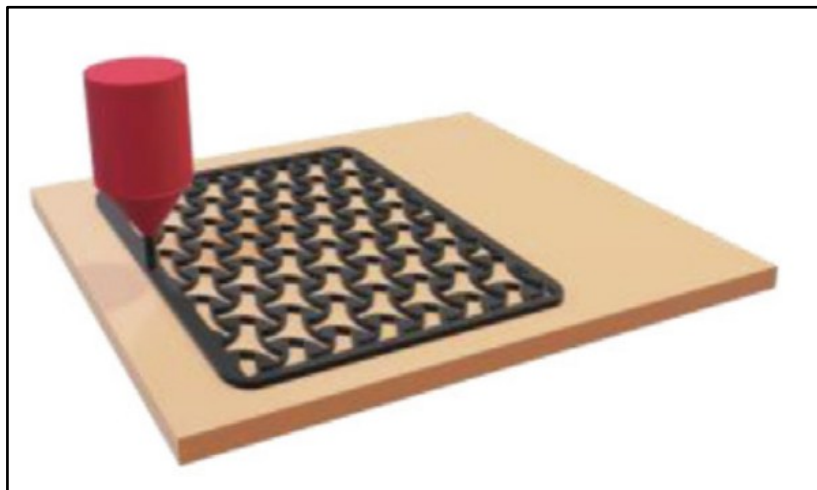
U magneticky tvrdých plniv je možné orientovat a magnetizovat magnetické domény i po úplném vytvrzení tím, že jsou MSM vystaveny vnějšímu magnetickému poli. Přestože lití představuje jednoduchou výrobní metodu, umožňuje primárně výrobu dvourozměrných nebo základních trojrozměrných tvarů. Tyto jednoduché struktury lze však následně upravit a opracovat tak, aby získaly požadované geometrické vlastnosti. [10; 20; 21]

5.3.2 3D/4D tisk

Trojrozměrný tisk představuje moderní technologii aditivní výroby, při níž jsou objekty vytvářeny postupným nanášením materiálu ve vrstvách na základě digitálních modelů z programů typu CAD. Tento proces umožňuje výrobu složitých tvarů a struktur, které by byly tradičními metodami obtížně realizovatelné nebo zcela nemožné. [10; 11; 22]

Technologie 3D tisku má široké uplatnění v různých průmyslových odvětvích. V oblasti strojírenství a leteckého průmyslu se využívá k výrobě kovových součástí s vysokou

pevností a nízkou hmotností, zatímco v medicíně umožňuje tisk protéz nebo dokonce biologických tkání. Ve stavebnictví se tato metoda využívá k tisku betonových konstrukcí a prefabrikovaných prvků, což přispívá k rychlejší a efektivnější výstavbě. [10; 11; 22]



Obrázek 6 Metoda 3D tisku [10]

Pokročilé metody aditivní výroby chytrých a víceúčelových materiálů se dnes označují jako 4D tisk. Tento termín vznikl díky schopnosti 3D tištěných magneticky aktivních materiálů (MSM) reagovat na vnější podněty, což je považováno za „čtvrtý rozměr“. Podobně jako u jiných inteligentních materiálů umožňuje tato technologie přizpůsobení tvaru a vlastností v čase. [10; 11; 22]

Hlavní výhodou 4D tisku je minimalizace potřeby externích energetických zdrojů nebo složitých elektromechanických systémů k řízení mikrostruktury materiálu. Mezi další významné vlastnosti patří neomezené možnosti designu, schopnost produkce téměř hotových součástí, snížení nutnosti dodatečných úprav, efektivní využití surovin a redukce odpadu. Díky těmto faktorům se aditivní výroba ukazuje jako ideální metoda pro tvorbu vysoce specializovaných geometrií požadovaných v aplikacích MSM. [10; 11; 22]

Aditivní výroba se v dnešní době dělí na sedm hlavních metod. Jsou to:

- extruze materiálu,
- tryskání materiálu,
- tryskání pojiva,
- laminace,
- fotopolymerizace v lázni,

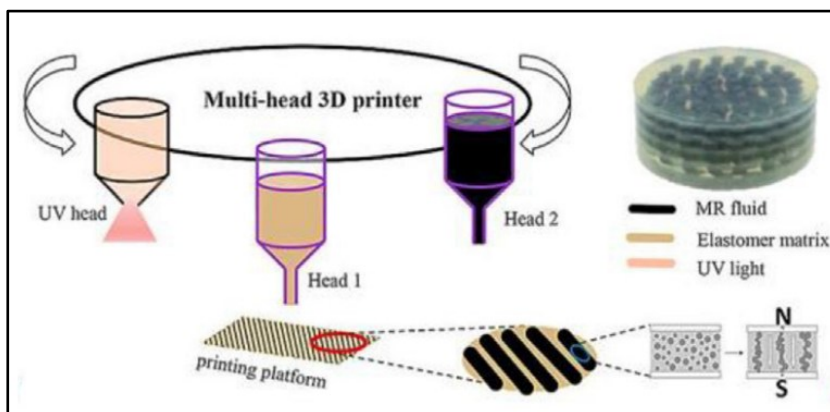
- slinování práškového lože,
- energeticky řízená depozice.

Ne všechny tyto metody jsou však vhodné pro práci s MSM. Současné metody 3D tisku na bázi filamentů nebo prášků zatím neposkytují velké deformace, které jsou obvykle vyžadovány pro změny tvaru při aplikaci systémů na bázi MSM. Nicméně tyto tiskové techniky poskytují nové výzkumné možnosti pro magnetoaktivní materiály. [10; 11; 22]

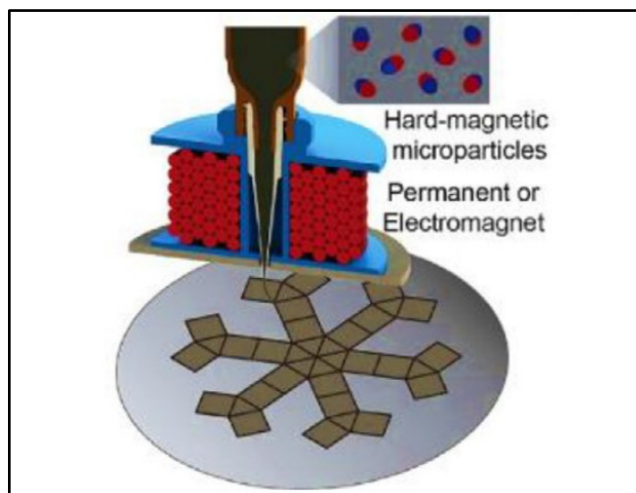
5.3.3 Direct ink writing (DIW)

Metoda přímého nanášení inkoustu funguje na principu řízeného vytlačování viskózního materiálu skrze úzkou trysku pod určitým tlakem. Tento tlak může být generován pneumaticky, mechanicky nebo jinými způsoby, v závislosti na požadované přesnosti a vlastnostech nanášeného materiálu. Celý proces je kontrolován elektronickým dávkovacím systémem, který umožňuje přesné řízení toku inkoustu a jeho nanášení v požadovaném vzoru. [10; 13]

Tato technologie se hojně využívá při výrobě magneticky aktivních materiálů především díky své jednoduchosti, vysoké flexibilitě a schopnosti pracovat s vysoce viskózními materiály. Přímé nanášení inkoustu umožňuje efektivní vrstvení materiálu s vysokým stupněm přesnosti, což je důležité pro aplikace, kde je nutná specifická mikrostruktura či unikátní mechanické vlastnosti. [10; 13]



Obrázek 7 Metoda DIW bez působení magnetického pole [10]



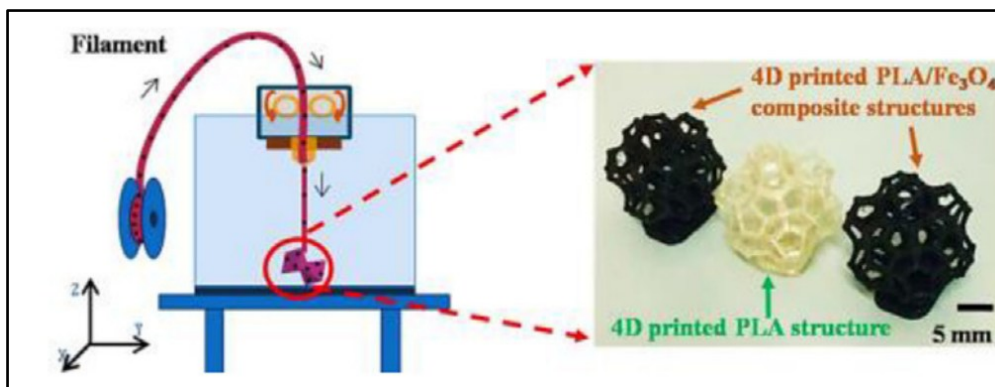
Obrázek 8 Metoda DIW při působení magnetického pole [10]

Metodu DIW je možné používat při působení vnějšího magnetického pole, ale i bez něj (viz. Obrázky 7 a 8). Výhodou metody, kde se používá magnetické pole, je možnost cíleně orientovat magnetické domény magneticky tvrdých plniv a jejich tištěných vzorů za pomoci synchronizace magnetických pólů. [10; 13]

Aby bylo možné používat při tomto tisku inkousty, je třeba znát reologické vlastnosti používaných inkoustů. Tyto materiály musejí vykazovat změnu (pokles) viskozity při průchodu tryskou a po nanesení této původní viskozity opět nabýt. [10; 13]

5.3.4 The fused deposition modelling (FDM)

Tento způsob zpracování MSM je využíván primárně pro termoplastické polymery, protože celý proces se zakládá na řízeném tavení filamentu a jeho nanášení na tiskovou podložku. Během tisku se filament zahřívá na teplotu, při které přechází do tekutého stavu, což umožňuje jeho extruzi skrze tiskovou trysku. Následně je nanášen ve vrstvách na podložku, kde postupně chladne a tuhne, čímž vytváří pevnou a stabilní strukturu. [10; 16]

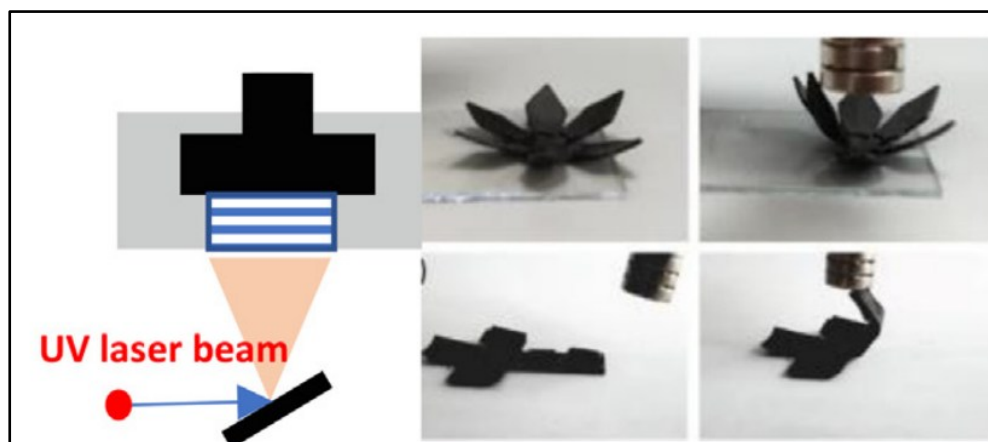


Obrázek 9 Metoda FDM [10]

Použité filamenty jsou již před tiskem opatřeny magnetickými plnivými, například částicemi feritů nebo kovových prášků. Tato plniva zajišťují, že výsledný výtisk vykazuje požadované magnetické vlastnosti, jako je citlivost na vnější magnetická pole nebo možnost tvarové změny pod jejich vlivem. Kromě magnetických plniv mohou být do filamentu přidány i další přísady zlepšující mechanické vlastnosti, tepelnou odolnost nebo pružnost materiálu. [10; 16]

5.3.5 Digital light synthesis (DLS)

DLS využívá principu přeměny kapalně pryskyřice obsahující monomer nebo oligomer do pevného stavu použitím světla. Dosud je tento proces kvůli velikosti částic, které by mohly vytvářet nehomogenní inkoust, omezen pouze na fotopolymerizovatelné pryskyřice, ve kterých se magnetoaktivní prvky vyskytují jako magnetické nanočástice. [10; 23; 24]



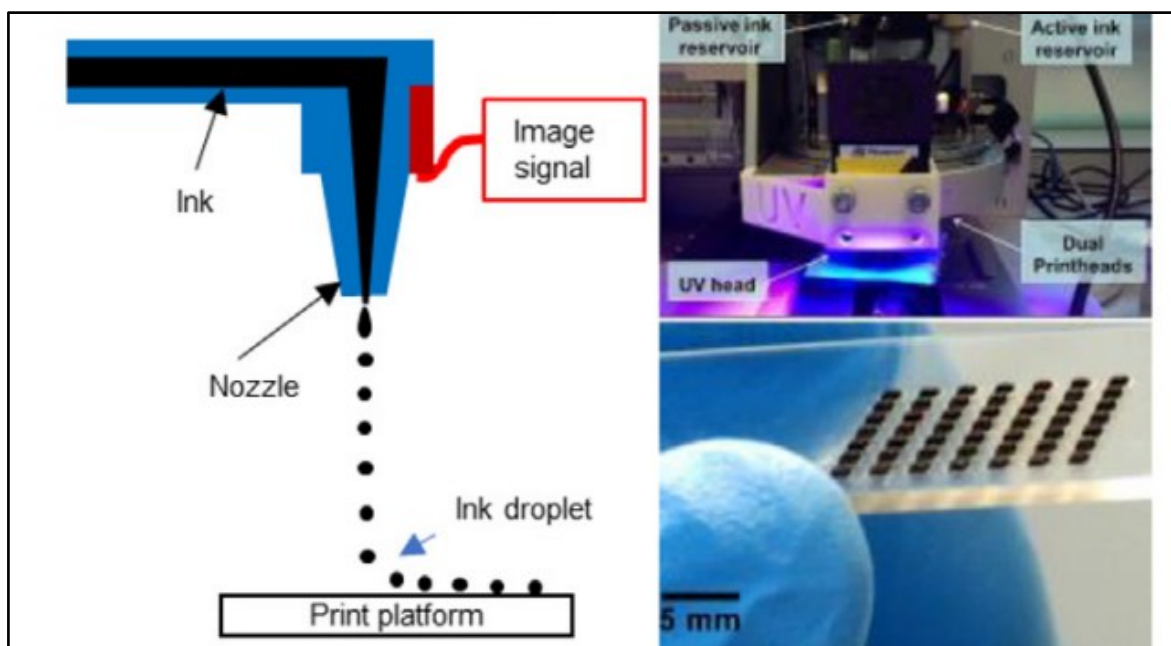
Obrázek 10 Metoda DLS [10]

U metody DLS hraje velkou roli vztah mezi dávkou UV záření a šířkou vrstvy vytvrzované pryskyřice. Dalším podstatným parametrem, který ovlivňuje proces,

je procentuální obsah magnetického plniva a doba působení záření na jednotlivou vrstvu. DLS se od ostatních tiskových metod zásadně liší v tom, že při této metodě dochází k vytvrzování celé vrstvy najednou na rozdíl od ostatních, kde dochází k vytvrzování bodovému. [10; 23; 24]

5.3.6 Material jetting (MJ)

Tryskání inkoustu se řadí mezi nejvýkonnější tiskové metody, zejména pro 2D tisk. Při této metodě dochází k nanášení nízkoviskózního inkoustu pomocí mikronových trysek přímo na substrát. Díky těmto tryškám lze vyrábět produkty z magneticky aktivních materiálů v mikro až milimetrovém měřítku. Nespornou výhodou MJ je schopnost současného nanášení více druhů inkoustů. Na druhou stranu je zde riziko tvorby kapek inkoustu, které je ovlivněno fyzikálními vlastnostmi, jako je viskozita a povrchové napětí onoho inkoustu. Z tohoto důvodu je potřeba dbát na volbu použitého inkoustu, jelikož by při neadekvátní volbě mohlo docházet k nezhodnocování výrobků z MSM. [10; 25]



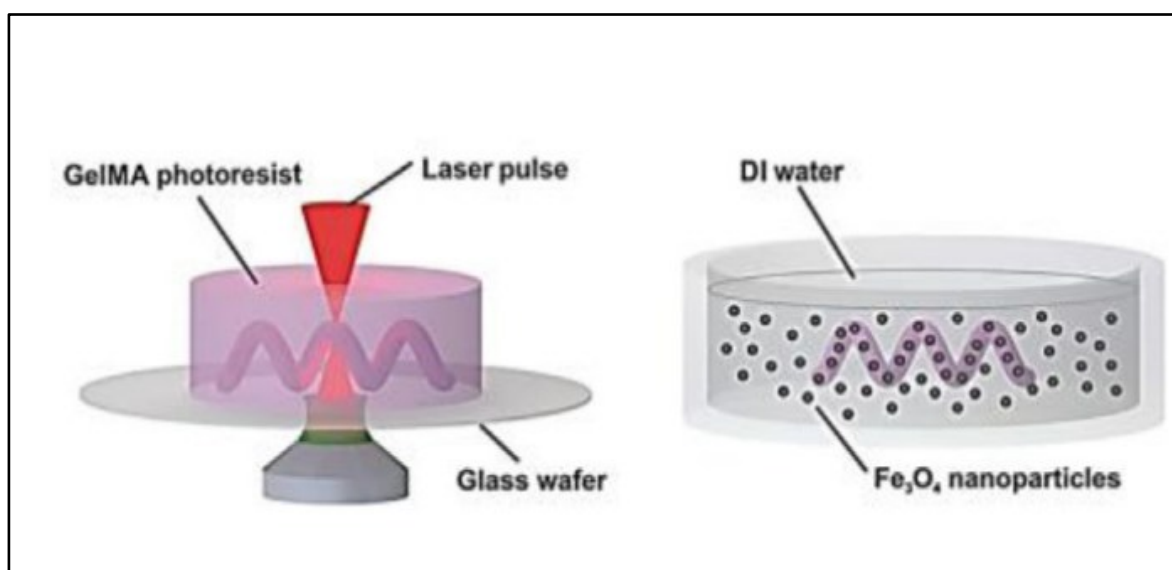
Obrázek 11 Metoda MJ [10]

5.3.7 Two photon polymerization (TPP)

Jedna z nejpoužívanějších metod na bázi lázně pro výrobu struktur v mikrometrových měřítkách je vícefotonová polymerizace. Tato metoda používá laserové pulzy o vlnové délce 800 nm, které jsou zaměřeny na fotopolymerizovatelné pryskyřice (fotoreziny) v lázni, kde dochází k jejich vytvrzení. [10; 26]

Když laserový paprsek zaměří malé množství fotorezinu, fotoiniciátor obsažený v materiálu absorbuje dva fotony o vlnové délce 800 nm, které se spojí a vytvoří foton o vlnové délce 400 nm, což odpovídá UV záření. Tento fotoiniciátor pak spustí křížové spojování mezi monomery, iniciátory a činidly. V metodě TPP je laser zaměřen pouze na malou oblast fotosenzitivní pryskyřice, což umožňuje vytváření 3D objektu, aniž by ovlivnil okolní oblasti mimo zaměřený bod. [10; 27; 26]

V oblasti výroby nanoskopických struktur se TPP stává jednou z nejvíce využívaných 3D tiskových technik pro výrobu mikro a nanoskopických MSM zařízení z magneticky měkkých a tvrdých polymerních kompozitů. [10]

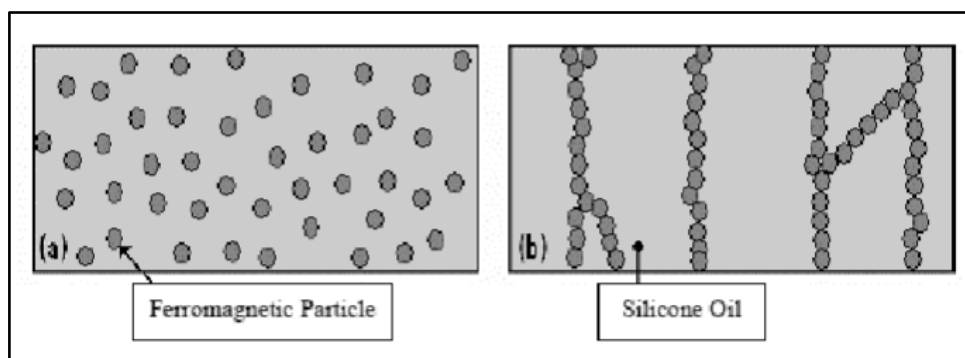


Obrázek 12 Metoda TPP [10]

6 DALŠÍ TYPY MAGNETOREOLOGICKÝCH MATERIÁLŮ

6.1 Magnetoreologické kapaliny

Magnetoreologické kapaliny jsou inteligentní materiály, které vykazují reverzibilní (vratný) a velmi rychlý přechod z kapalného do téměř pevného stavu (kvazi-pevného stavu) v přítomnosti vnějšího magnetického pole (magnetoreologický efekt). Díky této vlastnosti se dají tyto kapaliny využít v mechanických systémech, kde je požadováno aktivní řízení vibrací nebo přenos točivého momentu. [3; 28]



Obrázek 13 Struktura MR kapaliny: a) bez působení magnetického pole; b) v přítomnosti magnetického pole [28]

Obrázek 13 ilustruje strukturu MR kapalin a jejich reakci na přítomnost či absenci magnetického pole. Tyto změny nastávají během méně než 10 milisekund. Magnetoreologické kapaliny si uchovávají své charakteristické vlastnosti v teplotním rozmezí od -40 do 150 °C, přičemž jejich mez kluzu se pohybuje mezi 50 a 100 kPa. [28]

V praxi se aplikují v tlumičích nárazů, brzdných systémech, seizmických tlumičích vibrací, regulačních ventilech nebo dokonce také v umělých kloubech. [3]

Významným problémem MR kapalin je jejich odolnost a životnost. Železné částice uvnitř kapaliny oxidují, což vede k nevratné změně viskozity a celkovému selhání systému. Z tohoto důvodu se do MR kapalin přidávají látky na ochranu proti korozi a sedimentaci.

6.2 Magnetoreologické elastomery

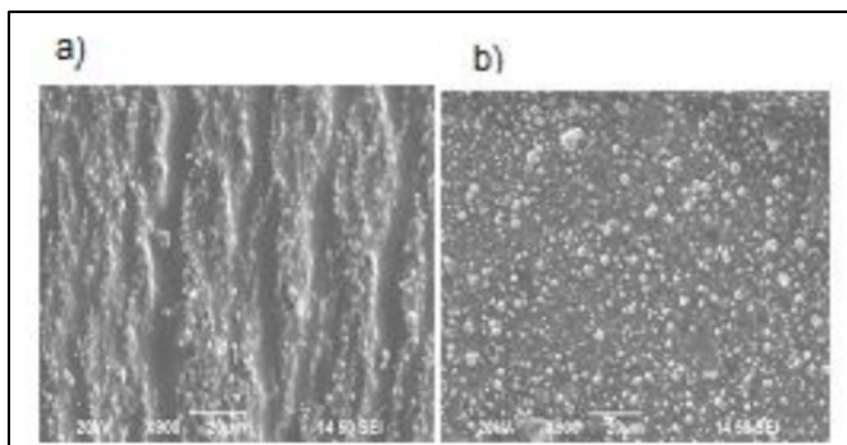
Magnetoreologické elastomery (MRE) tvoří matrice z přírodního nebo syntetického kaučuku, do níž jsou zakomponovány feromagnetické částice o velikosti několika mikrometrů (obvykle 3 až 5 mikrometrů). Kaučuk a podobné elastomery se používají kvůli své měkkosti a schopnosti deformace při pokojové teplotě. V závislosti na konkrétním složení mohou některé elastomery dosahovat reverzibilního prodloužení v rozmezí

5 až 700 %. Speciální struktura materiálu zajišťuje, že magnetické částice zůstávají pevně ukotvené v matici a nemohou se volně pohybovat, čímž se eliminuje riziko sedimentace. [28; 29; 21]

Působení magnetického pole vyvolává nelineární a reverzibilní změny některých vlastností. Omezená pohyblivost částic vede k rychlejší odezvě na magnetické pole ve srovnání s magnetoreologickými kapalinami. [28; 29; 21]

Magnetoreologické elastomery se dělí na dva základní typy: polarizované (anizotropní), které se vyznačují pravidelně uspořádanou vnitřní strukturou, a izotropní elastomery. Hlavním rozdílem mezi nimi je, že při výrobě anizotropních elastomerů se používá vnější magnetické pole, které ovlivňuje jejich vnitřní uspořádání. [28; 29; 21]

Hlavním rozdílem mezi anizotropními MRE a MR kapalinami je to, že anizotropní struktura elastomerů přetrvává i po odstranění vnějšího magnetického pole. Při návrhu MRE je hlavním cílem maximalizovat změnu jejich vlastností při působení magnetického pole. Reologický efekt významně ovlivňuje velikost a tvar magnetických částic i jejich objemový podíl v matici materiálu. [28; 29; 21]



Obrázek 14 Struktura MR elastomerů: a) anizotropní MRE; b) izotropní MRE [28]

7 PRINCIP RADIOABSORPCE

Při procesu radioabsorpce dochází k dopadu elektromagnetického vlnění na materiál, který v závislosti na své charakteristice přicházející vlnění rozdělí do tří částí. Část elektromagnetických vln je materiálem pohlcena, část odražena zpět a část vlnění je přenesena skrz materiál. [30; 31]

Odražené vlnění je způsobeno rozdílem impedančního přizpůsobení mezi absorbujícím materiálem a volným prostorem. Dále vlny, které pronikají do vnitřní struktury materiálu, mohou interagovat s materiálem. Absorbující materiál může způsobovat disipaci energie tím, že přemění elektromagnetickou energii z pohlceného vlnění na tepelnou nebo jinou formu energie. [32; 33]

Na zlepšení absorpčních vlastností materiálu existují dva způsoby. Prvním způsobem je zajištění, aby elektromagnetické vlnění bylo materiálem spíše pohlcováno, než aby došlo k jejímu odrazu od povrchu materiálu. Druhým způsobem je změna elektromagnetických parametrů. Elektromagnetické vlny jsou spojovány s oscilujícími elektrickými a magnetickými poli a v případě interakce materiálu s těmito poli může materiál takto vlnění tlumit. Tato interakce elektromagnetického pole s materiálem mění odezvu druhého pole, což vede k útlumu a ztrátě elektromagnetických vln. Pro hodnocení schopnosti materiálu absorbovat elektromagnetické vlny se obvykle používá dielektrická konstanta a magnetická permeabilita materiálu. [34; 35; 36]

Pro hodnocení radioabsorpčních vlastností různých materiálů se používá výpočet pro ztráty odrazem (RL) dle teorie přenosové linky:

$$RL = 20 \cdot \log \left| \frac{Z_{in} - 1}{Z_{in} + 1} \right| \quad (3)$$

$$Z_{in} = \sqrt{\frac{\mu_r}{\varepsilon_r}} \cdot \tan \left[j \cdot \left(\frac{2\pi f d}{c} \right) \cdot (\sqrt{\mu_r \cdot \varepsilon_r}) \right] \quad (4)$$

, kde Z_{in} je vstupní impedanční přizpůsobivost materiálu, μ_r a ε_r označují komplexní permeabilitu a permitivitu, f představuje frekvenci mikrovln, d je tloušťka materiálu a c je rychlost světla ve vakuu. Z toho vyplývá, že velikost absorpce mikrovln je spojena se schopností dielektrické a magnetické ztráty a impedancí. [37]

7.1 Vliv porézní asymetrické struktury

Z běžně dostupných polymerů je možné vyrobit porézní kompozit pro elektromagnetické stínění. Porézní asymetrická struktura pěn efektivně prodlužuje dráhu šíření elektromagnetických vln a tím přispívá k absorpci. [38]

Při vrstvení pěn z rozdílných směsí je možné získat vodivostní gradient, který zvyšuje absorpci elektromagnetických vln. Takto vytvořená asymetrická struktura vytváří při průchodu elektromagnetického vlnění odrazy, které prodlužují dráhu vln a vlnění je tak porézní strukturou absorbováno. [38; 38]

8 SHRNUÍ TEORETICKÉ ČÁSTI

V teoretické části byly popsány magnetické materiály a efekt vyvolaný vystavením těchto materiálů elektromagnetickému poli. Dále byly charakterizovány elastomery, magneticky měkké materiály a samotné magnetoaktivní pěny, u kterých jsou uvedeny způsoby jejich přípravy. Závěrem byl zmíněn princip stínění materiálů (radioabsorpce) a vliv asymetrie (např. porézní struktura u pěn) na tento efekt.

II PRAKTICKÁ ČÁST

9 CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE

V praktické části bude namíchána kaučuková směs dle zadané receptury, která bude sloužit ke zhotovení několika směsí s různým poměrem exfoliovaného grafitu a obdobných směsí, kde budou navíc přimíchány železné částice ve formě železného prášku.

Z namíchaných směsí se vyrobí vulkanizací v uzavřené formě vzorky, u kterých se bude zkoumat potřebná tloušťka materiálu před vulkanizací. Z těchto zvulkanizovaných a napěněných vzorků se dále vyrobí zkušební tělesa pro měření stínících vlastností pěny a další tělesa pro zhodnocení mechanických vlastností.

V závěru práce budou vyhodnoceny dosažené výsledky.

10 PŘÍPRAVA KAUČUKOVÉ SMĚSI

Pro účely měření vlastností magnetoaktivních materiálů byla zvolena standardní kaučuková směs na bázi ethylen-propylen-dienového kaučuku (EPDM), která slouží jako základní složka pro zkušební vzorky s rozdílným podílem železných a grafitových částic.

Tabulka 2 Složení kaučukové směsi (masterbatch)

Komponent	DSK	Váha [g]	Odchylka [g]
EPDM Keltan 4869C	200	779,3	± 1
Saze – N660	100	389,7	± 1
Stearin	2	7,8	$\pm 0,1$
ZnO	5	19,5	$\pm 0,1$
Olej – AP/E Core 600	50	194,8	± 1
Celkem	357	1391,1	-

Jednotlivé složky masterbatche lze charakterizovat následovně.

EPDM Keltan 4869

Etylen-propylen-dienový termoplastický elastomer charakteristický středně velkou distribucí molekulové hmotnosti a schopností přijímat velké množství plniv. Mezi jeho užitečné vlastnosti patří také vysoká flexibilita při nízkých teplotách, elektricky izolační a mechanické vlastnosti vulkanizátu a odolnost vůči teplu, chemikáliím, oxidaci a povětrnostním vlivům.



Obrázek 15 EPDM Keltan 4869C

Saze N660

Typ sazí N660 se značí jemnými částicemi, které se snadno rozptýlí v kaučukové směsi, z tohoto důvodu je tento typ sazí vhodný pro všechny druhy pryží. Vulkanizát získává díky těmto sazím vysokou pevnost v tahu, odolnost a elasticitu v ohybu a také nepohlcuje velké množství tepla oproti jiným druhům sazí.



Obrázek 16 Černé saze – N660

Stearin

Součástí vulkanizačního systému gumárenských směsí, konkrétně jako aktivátor vulkanizace. Zajišťuje rovnoměrné síťování pryže při vulkanizaci. Při míchání směsi funguje také částečně jako mazivo a snižuje tak tření mezi jednotlivými složkami.



Obrázek 17 Stearin

Oxid zinečnatý – ZnO

Spolu se stearinem tvoří aktivátor vulkanizace a urychlují proces a účinnost síťování pryže. Oxid zinečnatý navíc zlepšuje mechanické vlastnosti pryže, jako je pevnost v tahu

nebo odolnost proti přetržení. Dále velmi přispívá k tepelné a chemické stabilitě materiálu. V polymerní matici navíc tvoří dielektrickou část, která přispívá k absorpčním vlastnostem materiálu.



Obrázek 18 Oxid zinečnatý

Olej – AP/E Core 600

Olej plní v gumárenské směsi funkci maziva, které ulehčuje zpracovatelnost směsi a zmenšuje tření mezi složkami při míchání materiálu.

Jednotlivé složky byly pečlivě naváženy na laboratorní váze *Mettler PM4800 DeltaRange* a rozděleny do plastových obalů. Kaučuk společně s oxidem zinečnatým a stearinem byly zabaleny dohromady, protože bylo potřeba, aby byly do hnětiče vloženy současně. Stejně tak tomu bylo i v případě sazí a oleje. Míchání složek proběhlo na gumárenském hnětiči od firmy *Everplast* (Obrázky 19 a 20), který byl schopný pojmout požadovaný objem materiálu. Míchání proběhlo za přesně daných podmínek uvedených v Tabulce 3.

Tabulka 3 Podmínky míchání kaučukové směsi

Otáčky [ot/min]	50
T_0 [°C]	80
$T_{\text{vyhození}}$ [°C]	130
$t_{\text{vyhození}}$ [min]	6,5

Dále byl dodržen následující postup:

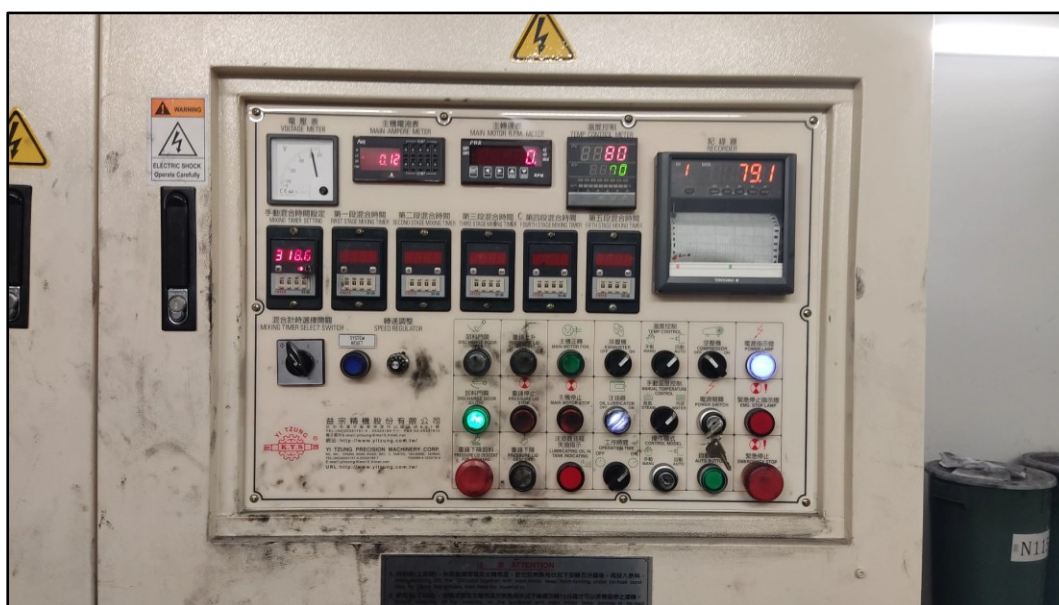
1. Míchání směsi z kaučuku, oxidu zinečnatého a stearinu po dobu 1 minuty,

2. přidání sazí s olejem,
3. míchání po dobu 5,5 minuty nebo po dosažení $T_{\text{vyhození}}$.

Směs byla míchána po stanovenou dobu a při jejím míchání byla zvyšována teplota, ale po uplynulém čase nedošlo k dosažení $T_{\text{vyhození}}$, ale pouze teploty 126 °C. Při delším míchání směsi by mohlo dojít k degradaci, a proto byla dosažená teplota uznána za dostatečnou. V případě, že by směs dosáhla $T_{\text{vyhození}}$ za kratší čas, muselo by se rovněž míchání přerušit, aby nedošlo ke spálení směsi.



Obrázek 19 Gumárenský hnětič Everplast



Obrázek 20 Ovládací panel hnětiče

Takto namíchaná směs byla dále homogenizována na dvouválci *Scientific* (Obrázky 21 a 22) při podmínkách uvedených v Tabulce 4.

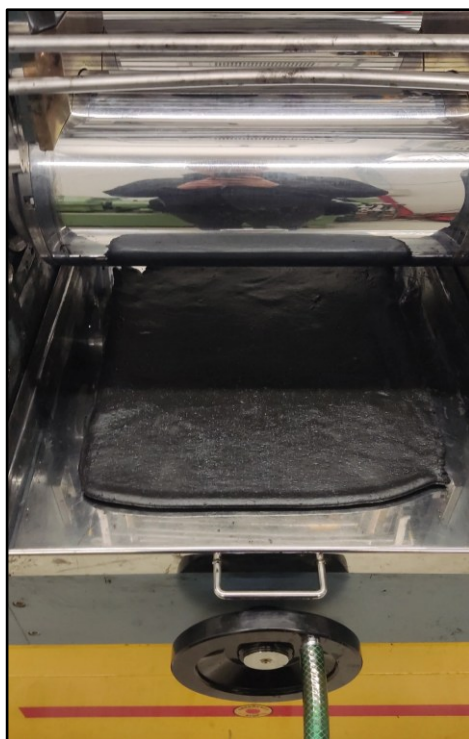
Tabulka 4 Podmínky válcování kaučukové směsi (masterbatch)

$T_v [^{\circ}\text{C}]$	60
Otáčky _{v1} [ot/s]	11,4
Otáčky _{v2} [ot/s]	14,8

Po homogenizaci směsi byla tato směs vyválcována na tloušťku 10 mm pro další použití jako masterbatch pro přípravu vzorků.



Obrázek 21 Dvouválec Scientific



Obrázek 22 Zhomogenizovaná směs

Pro validaci tloušťky materiálu po válcování a po vulkanizaci byl použit analogický tloušťkoměr *Käfer K200* (Obrázek 23) s rozsahem měření až do 30 mm.



Obrázek 23 Analogický tloušťkoměr Käfer K200 [39]

11 PŘÍPRAVA VZORKŮ

Pro zkoumání stínících a mechanických vlastností materiálů bylo potřeba zhotovit z kaučukové směsi dostatečný počet vzorků. Kaučuková směs byla v této fázi smíchána s vulkanizačním systémem a každý vzorek navíc obsahoval různý poměr částic exfoliovaného grafitu (ES 500; zvyšuje při zahřátí svůj objem) a železných mikročástic karbonylového železa (typ CN, >99,5 % Fe, D50 = 6,5–8,0 μm). Grafitové částice jsou ve směsích v poměrech 5/10/15/40 DSK. Pro každý poměr grafitových částic jsou 2 vzorky. Jeden obsahující železné částice a druhý bez nich.

Potřebným efektem vulkanizace je v tomto případě napěnění struktury materiálu. Toto napěnění podporuje právě podíl grafických částic obsažených ve směsi.

Směs vzorků prošla procesem míchání na laboratorním hnětiči *Brabender* (Obrázek 24) s objemem 0,05 l při teplotě 50 °C, přičemž byly jednotlivé složky postupně přidávány po fázích.

1. Fáze – Hnětení masterbatche po dobu 2 minut při 15 ot/min
2. Fáze – Přidání železných částic a následné míchání po dobu 3 minut při 40 ot/min
3. Fáze – Vmíchání vulkanizačního systému a grafitových částic po dobu 1 minuty při 50 ot/min



Obrázek 24 Laboratorní gumárenský hnětič Brabender

Pro homogenizaci směsi byl použit dvouválec *Farrel G-2603 150x330 mm* (Obrázek 25), který je určen pro přípravu kaučukových směsí o hmotnosti až 0,6 kg. Pracovní podmínky byly nastaveny stejně jako při přípravě masterbatche (viz. Tabulka 4).



Obrázek 25 Laboratorní gumárenský dvouválec Farrel G-2603 150x330 mm

11.1 Vzorky obsahující železné částice

V následující části bude popsána příprava a strukturní charakterizace vzorků obsahujících magnetické mikročástice, tj. magnetoktivních pěn.

11.1.1 Vzorek č. 1

Vzorek č. 1 byl použit jako první pro zjištění potřebné tloušťky materiálu před vulkanizací, aby výsledný vzorek zaplnil celou formu, tj. tloušťka 5,5 mm. Z této směsi byla rovněž určena doba vulkanizace na reometru *Monsanto 100*.

Tabulka 5 Složení vzorku č. 1

Vzorek č. 1		
Komponent	DSK	Váha [g]
Masterbatch	357	56,31
DPG – DENAX	1	0,16
Železné částice Fe85Si15	150	23,66
Síra – Crystex OT33	2	0,32
Exfoliovaný grafit – ES 500	5	0,79
CTP – 200R	0,5	0,08
Celkem	515,5	81,3

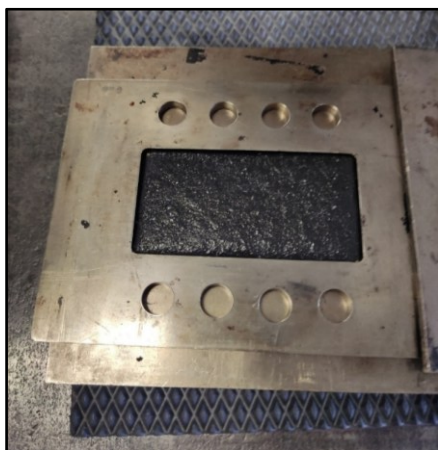
Zjištěná doba vulkanizace byla 7 minut při teplotě 200 °C. Tyto hodnoty byly použity pro všechny vzorky. Vzorek č. 1 byl vyválnčován na tloušťku 2,5 mm, ze kterého byl vyříznut obdélník o velikosti 5×10 cm. Tento obdélník odpovídá tvaru formy, do které byl následně také vložen.

Pro vulkanizaci vzorku byl použit ruční lis (Obrázek 26) přehřátý na teplotu 200 °C. Do přehřáté formy (Obrázek 27) byl umístěn vzorek a uzavřená forma byla vložena do lisu po dobu 7 minut.



Obrázek 26 Ruční lis

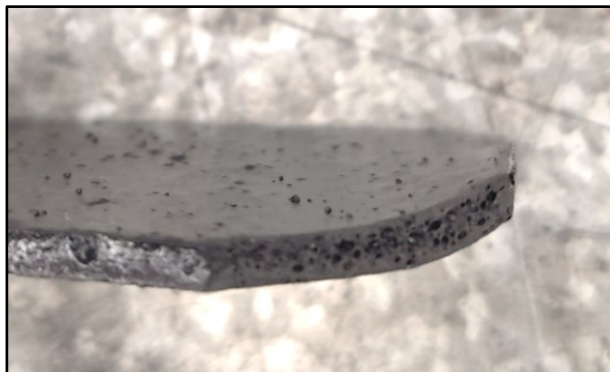
Po 7 minutách byla forma vytažena z lisu, ale výsledný vzorek bohužel nedokázal zaplnit celou formu.



Obrázek 27 Vzorek č. 1 – 2,5 mm po vulkanizaci

Tloušťka povrchu zvulkanizovaného vzorku byla nerovnoměrná a tloušťka byla v nejširším místě 3,75 mm. Avšak po provedení řezu bylo zjevné kýžené napětí vzorku (Obrázek 28).

Pro další pokus byl vzorek vyválcován na tloušťku 3 mm a následoval opět proces vulkanizace při stejných podmínkách. Výsledný vzorek dokázal zaplnit celou formu při zachování velikosti pórů.



Obrázek 28 Napěněná struktura vzorku č. 1 – 2,5 mm



Obrázek 29 Vzorek č. 1 + řez

11.1.2 Vzorek č. 2

Tabulka 6 Složení vzorku č. 2

Vzorek č. 2		
Komponent	DSK	Váha [g]
Masterbatch	357	55,89
DPG – DENAX	1	0,16
Železné částice Fe85Si15	150	23,48
Síra – Crystex OT33	2	0,31
Exfoliovaný grafit – ES 500	10	1,57
CTP – 200R	0,5	0,08
Celkem	520,5	81,48

Tento vzorek byl již podle předchozí zkušenosti vystřižen z plátu vyválcovaného na tloušťku 3 mm. Jelikož obsahuje dvakrát tolik exfoliovaného grafitu, lze předpokládat, že dojde k většímu napětí.



Obrázek 30 Vzorek č. 2 + řez

Ve srovnání s prvním vzorkem došlo ke vzniku struktury s hustějším výskytem pórů.

11.1.3 Vzorek č. 3

Tabulka 7 Složení vzorku č. 3

Vzorek č. 3		
Komponent	DSK	Váha [g]
Masterbatch	357	55,48
DPG – DENAX	1	0,16
Železné částice Fe85Si15	150	23,31
Síra – Crystex OT33	2	0,31
Exfoliovaný grafit – ES 500	15	2,33
CTP – 200R	0,5	0,08
Celkem	525,5	81,66

Jelikož tento vzorek obsahuje 3x tolik exfoliovaného grafitu oproti vzorku č. 1, tak je možné předpokládat, že napětí bude mnohem značnější. Z tohoto důvodu byl proveden pokus o zaplnění formy materiálem vyválcovaným na tloušťku 2,5 mm. Výsledný vzorek však po vulkanizaci formu stále nedokázal zaplnit. V nejširším místě byla naměřena tloušťka 5 mm. Je to však přesně 2× větší napětí než u vzorku č. 1.

Pro kvalitní vzorky byla nakonec použita tloušťka materiálu před vulkanizací 3 mm.



Obrázek 31 Vzorek č. 3 + řez

Napětí oproti předchozímu vzorku se nijak nezměnilo. Zvětšily se pouze póry což je pro tuto práci vyhovující.

11.1.4 Vzorek č. 7

Jelikož se velikost pórů u předchozích vzorků nejevila dostatečně velká, byl navrhnut další vzorek obsahující značně větší podíl exfoliovaného grafitu. Vzorky s tímto poměrem grafitu byly opět vytvořeny ve verzi se železnými částicemi a ve verzi bez nich.

Tabulka 8 Složení vzorku č. 7

Vzorek č. 7		
Komponent	DSK	Váha [g]
Masterbatch	357	54,03
DPG – DENAX	1	0,15
Železné částice Fe85Si15	150	22,7
Síra – Crystex OT33	2	0,3
Exfoliovaný grafit – ES 500	40	6,05
CTP – 200R	1	0,15
Celkem	551	83,39

Velikost pórů se nijak nezměnila (Obrázek 32), ale došlo k lehkému nahuštění těchto pórů. Ze vzorků obsahující železné částice by tedy měly být hodnoty stínění z tohoto vzorku nejprůzračnější.



Obrázek 32 Vzorek č. 7 + řez

11.2 Vzorky neobsahující železné částice

Jako komparativní k výše diskutovaným magnetoaktivním pěnám jsou v následující části diskutovány vzorky bez obsahu magnetických mikročástic, avšak se zachovanou přítomností částic exfoliovaného grafitu.

11.2.1 Vzorek č. 4

Stejně jako vzorek č. 1, byl i tento vzorek nejprve odzkoušen na tloušťce materiálu 2,5 mm. Ani v tomto případě nebyl vzorek vhodně odformován. Tloušťka vzorku byla srovnatelná se vzorkem č. 1. Z toho vyplývá, že železné částice nemají vliv na napětění materiálu při vulkanizaci.

Tabulka 9 Složení vzorku č. 4

Vzorek č. 4		
Komponent	DSK	Váha [g]
Masterbatch	357	59,47
DPG – DENAX	1	0,17
Železné částice Fe85Si15	0	0
Síra – Crystex OT33	2	0,33
Exfoliovaný grafit – ES 500	5	0,83
CTP – 200R	0,5	0,08
Celkem	365,5	60,89



Obrázek 33 Vzorek č. 4 + řez

Na obrázku 33 je zvulkanizovaný vzorek vyrobený z plátu o tloušťce 3 mm. Materiál dokázal formu zaplnit celou a z řezu lze vidět, že materiál bez železných částic dokáže vytvořit napěněnou strukturu i při nízkém obsahu grafitu. Výsledný vzorek je rovněž značně lehčí.

11.2.2 Vzorek č. 5

Výsledná struktura (Obrázek 34) má menší póry oproti vzorku číslo 4, ale jejich hustota je podstatně vyšší. Na tomto vzorku vznikla povrchová vada vlivem špatného umístění do přehřáté formy. Tato vada je však zanedbatelná, jelikož dojde k vystřížení zkušebních tělísek v místech, kde se tato vada nevyskytuje a pro další experimenty byl vždy připraven také druhý zkušební vzorek za stejných parametrů přípravy.

Tabulka 10 Složení vzorku č. 5

Vzorek č. 5		
Komponent	DSK	Váha [g]
Masterbatch	357	59
DPG – DENAX	1	0,17
Železné částice Fe85Si15	0	0
Síra – Crystex OT33	2	0,33
Exfoliovaný grafit – ES 500	5	1,65
CTP – 200R	0,5	0,08
Celkem	370,5	61,24



Obrázek 34 Vzorek č. 5 + řez

11.2.3 Vzorek č. 6

V řezu (Obrázek 35) je opět zjevné zhuštění výskytu pórů a jejich další zmenšení.

Tabulka 11 Složení vzorku č. 6

Vzorek č. 6		
Komponent	DSK	Váha [g]
Masterbatch	357	58,55
DPG – DENAX	1	0,16
Železné částice Fe85Si15	0	0
Síra – Crystex OT33	2	0,33
Exfoliovaný grafit – ES 500	15	2,46
CTP – 200R	0,5	0,08
Celkem	375,5	61,58



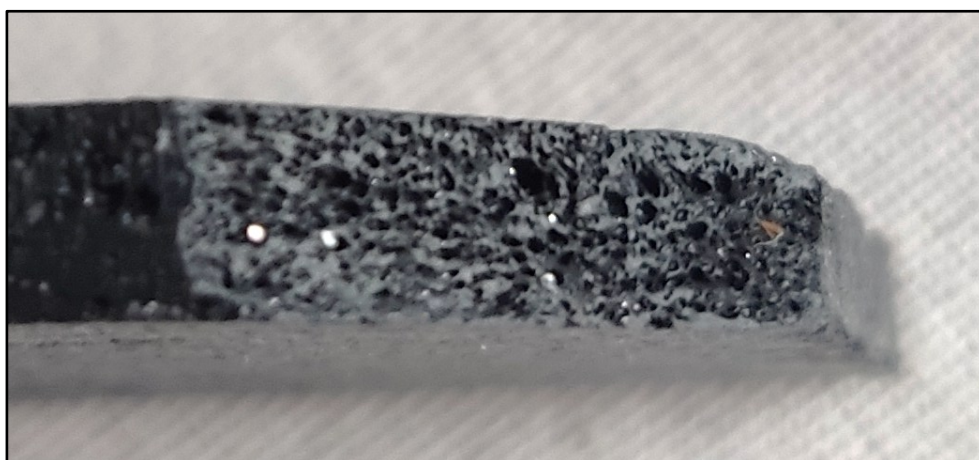
Obrázek 35 Vzorek č. 6 + řez

11.2.4 Vzorek č. 8

Tabulka 12 Složení vzorku č. 8

Vzorek č. 8		
Komponent	DSK	Váha [g]
Masterbatch	357	56,94
DPG – DENAX	1	0,16
Železné částice Fe85Si15	0	0
Síra – Crystex OT33	2	0,32
Exfoliovaný grafit – ES 500	40	6,38
CTP – 200R	1	0,16
Celkem	401	63,95

Vzorek o tloušťce 2 mm z této směsi, která má značně větší podíl exfoliovaného grafitu, byl použit na otestování potřebné tloušťky materiálu vkládaného do formy pro vzorky s takto vysokým podílem grafitu. Po vulkanizaci vzorek dokázal napěnit na hodnotu 4,7 mm (tj. zvětšil svůj objem 2,35×), což však není dost na zaplnění formy.



Obrázek 36 Řez vzorku č. 8 – 2 mm

Další pokus byl proveden na tloušťce materiálu 3 mm. V tomto případě byl zaplněn celý objem formy. Na stisk se jeví ze všech zhotovených vzorků jako nejměkčí. Je to způsobeno velmi hustě napěněnou strukturou, ačkoliv došlo ke zmenšení pórů vlivem většího stlačení materiálu ve formě.



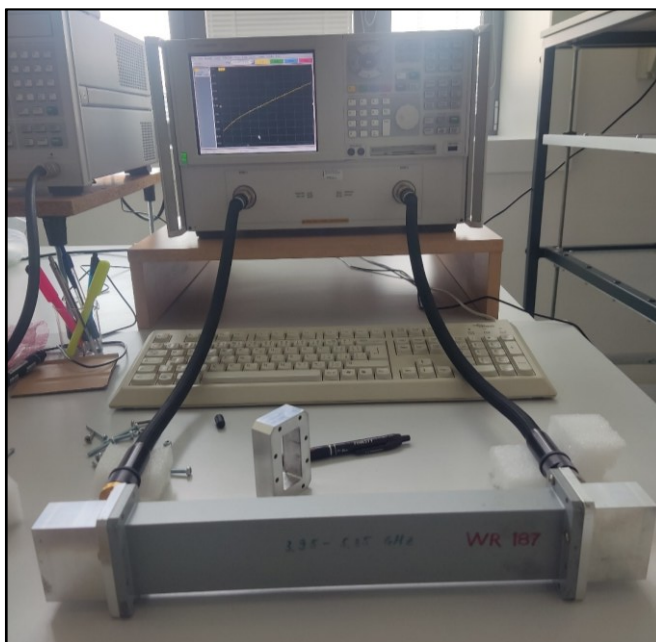
Obrázek 37 Vzorek č. 8 + řez

12 RADIOABSORPČNÍ VLASTNOSTI MAGNETOAKTIVNÍCH PĚN

Měření stínících vlastností je hlavním tématem této diplomové práce. Měření proběhlo za asistence Ing. Roberta Moučky Ph.D., který zkalibroval přístroj a asistoval při měření.

Přístrojem pro měření stínění zkoumaných materiálů vůči elektromagnetickému záření byl vektorový analyzátor *N5230A* (Obrázek 38) od společnosti *Agilent Technologies*. Tento přístroj generuje vlnění o zvolené frekvenci, a to v rozsahu 10 MHz – 20 GHz, které se v závislosti na nastavení odráží zpět do portu (S_{11} , S_{22}), ze kterého bylo vysláno, nebo je přenášeno z jednoho portu na druhý (S_{21} , S_{12}).

V tomto případě bylo použito nastavení S_{21} a byla sledována změna rozptylového parametru při průchodu signálu přes zkušební tělísko ve 3 různých frekvenčních pásmech.



Obrázek 38 Vektorový analyzátor Agilent N5230A s připojeným rektangulárním vlnovodem WR187

12.1 Příprava zkušebních tělísek

Z jednotlivých vzorků bylo potřeba vyseknout obdélníky dle průřezů vlnovodů mikrovlnného záření, ve kterém vložený vzorek bude procházející vlnění tlumit. Pro toto vyseknutí byly použity přesné nože (Tabulka 13) a hydraulický lis (Obrázek 39).



Obrázek 39 Hydraulický lis REDATS

Tabulka 13 Rozměry těles pro měřená frekvenční pásma

Pásmo	Rozměr [mm]	Frekvenční rozsah [GHz]
WR248	72x34	2,6 – 3,95
WR187	47,5x22	3,95 – 5,85
WR137	34,8x15,8	5,85 – 8,2

12.2 Výsledky měření

V této kapitole jsou zpracovány výsledky dosažené měřením stínících vlastností magnetoaktivních pěn při jednosměrném průchodu mikrovlnného záření (S_{21}).

Výsledky rozptylového parametru jsou uváděny jako záporné hodnoty z toho důvodu, že jde o logaritmické hodnoty podle rovnice:

$$S_{21} = 20 \cdot \log \frac{I_1}{I_2} \quad (5)$$

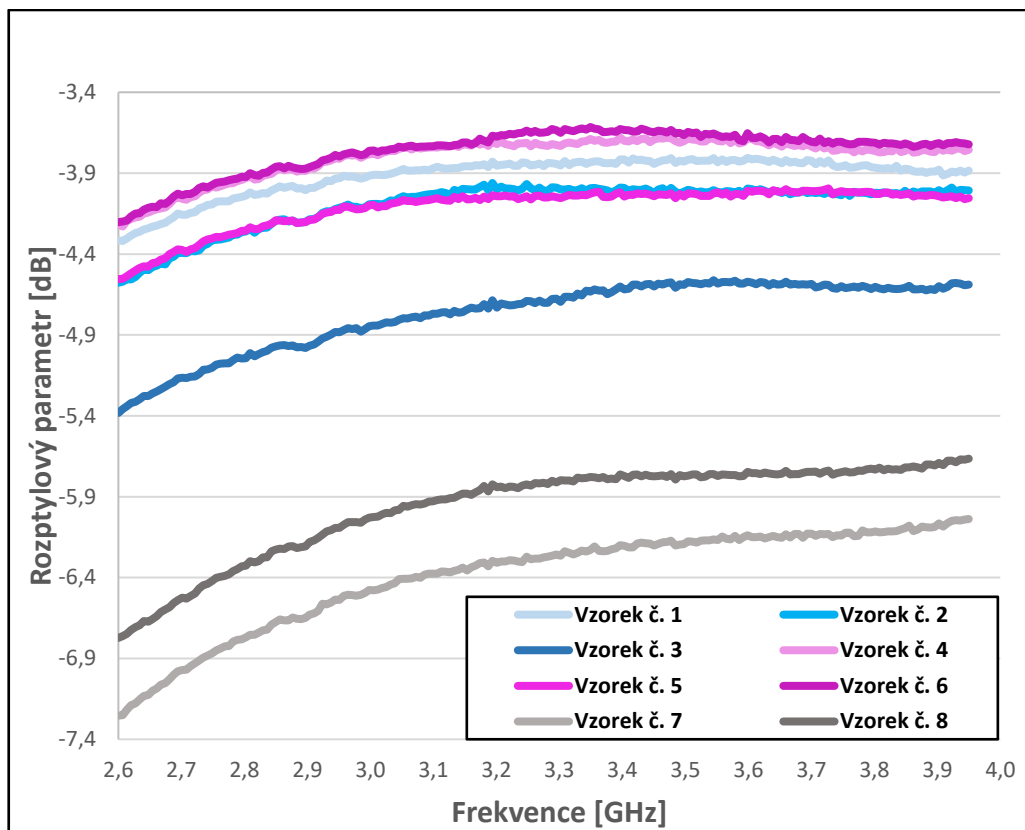
, kde I_1 je signál vyslaný portem 1 a I_2 signál přijatý portem 2.

12.2.1 WR248

V tomto vlnovém pásmu se frekvence mikrovlnného záření pohybuje v rozmezí 2,6 – 3,95 GHz. Při této frekvenci fungují všechny mobilní sítě od LTE až po 5G.

Z grafu č. 1 je zjevné, že vzorky 1, 2 a 3, které obsahují železné částice, vykazují lepší stínící vlastnosti. Avšak jde zde pouze o rozdíl v desetinných místech, který by byl v praxi považován za zanedbatelný.

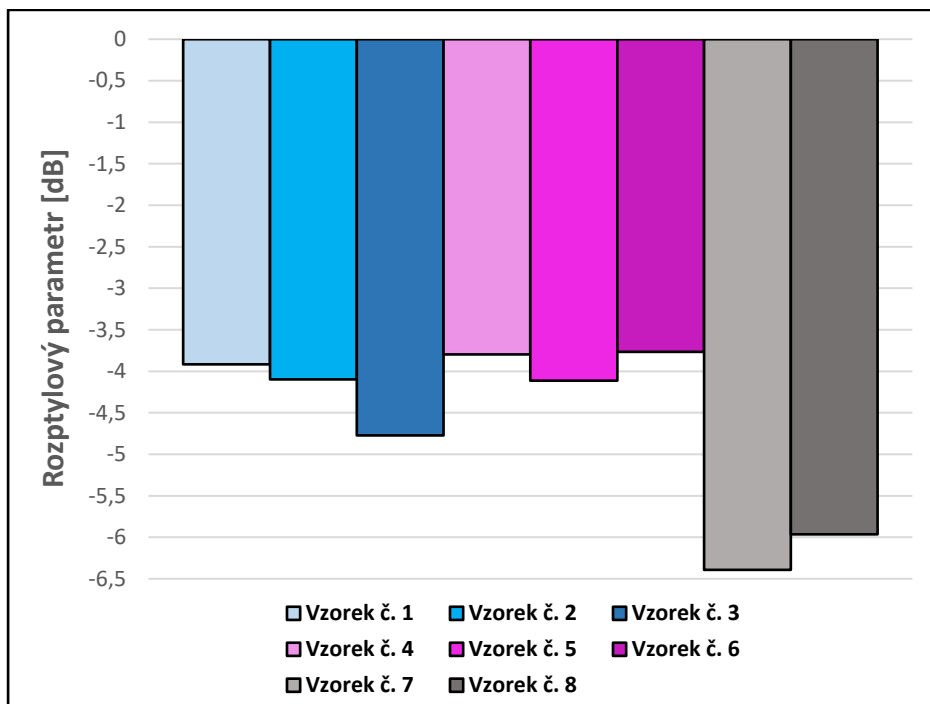
Za účinný stínící efekt materiálu lze považovat takový, který by se pohyboval okolo hodnoty -10 dB. Při této hodnotě materiál totiž pohlcuje právě 90 % mikrovlnného záření.



Graf 1 Srovnání průběhu stínění (rozptylový parametr S21) v pásmu WR284

Dalším poznatkem, který je možný z tohoto grafu vyčíst, je, že vzorek č. 6, který obsahuje větší podíl exfoliovaného grafitu než vzorky 4 a 5, vykazuje nejhorší stínící efekt. Mohlo by to být způsobeno velikostí pórů, která byla ve vzorku č. 6 z neželezných vzorků nejmenší.

Vzorky č. 7 a 8, které obsahují značně větší podíl exfoliovaného grafitu, se chovají dle předpokladů. Jejich stínící efekt se oproti ostatním vzorkům zlepšil v řádech jednotek, což je zřejmě způsobeno hustou sítí rozměrově menších pórů, které způsobují mnohonásobný odraz vstupujícího elektromagnetického záření a tím jeho výraznější utlumení. Stále se však nepodařilo dosáhnout kýžené hodnoty -10 dB.



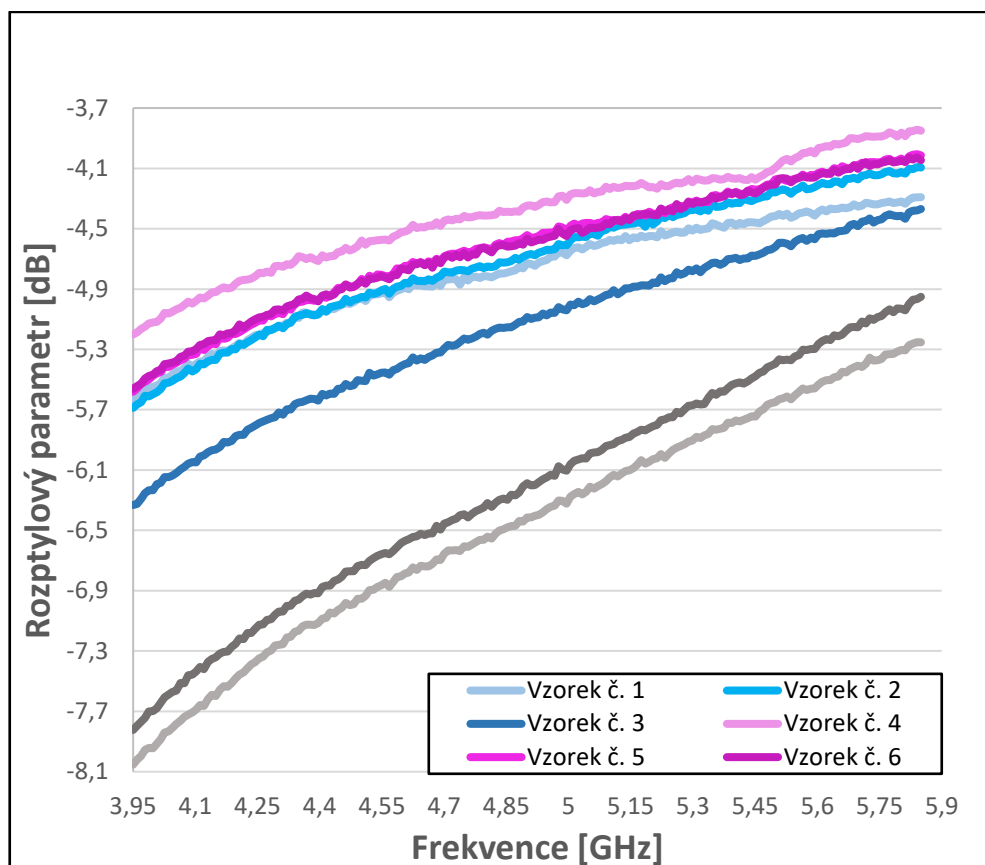
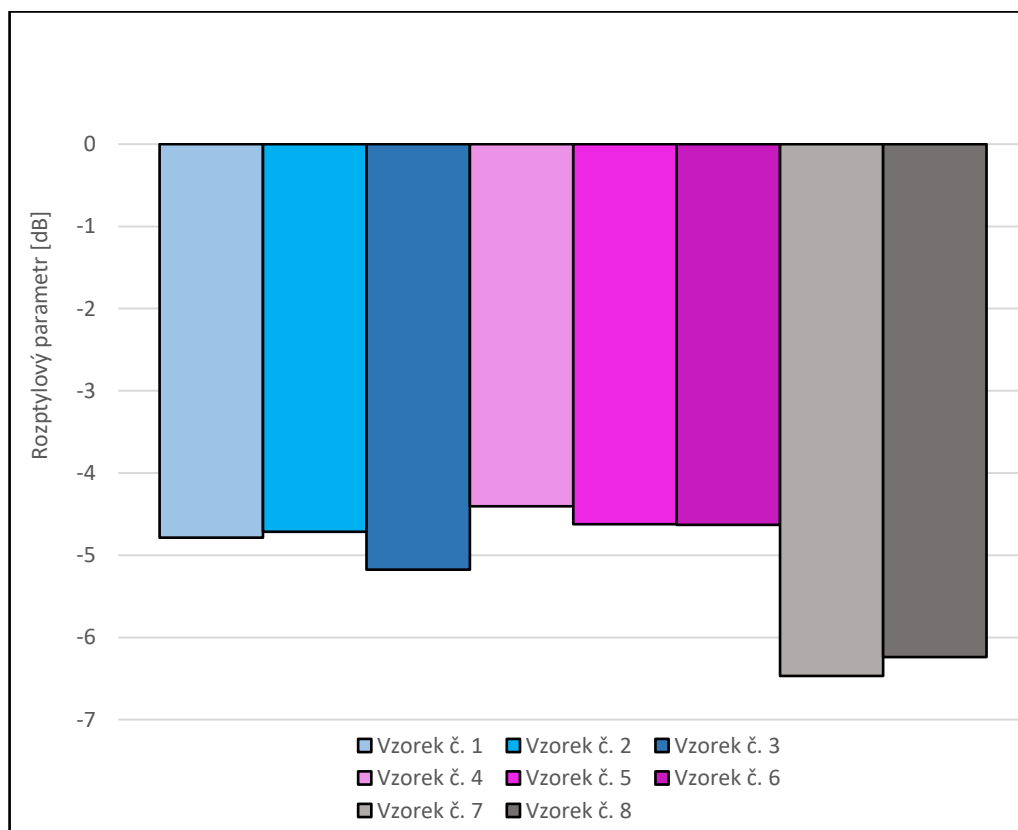
Graf 2 Srovnání průměrného rozptylového parametru S_{21} pro vlnovod WR284

Grafy srovnání průměrného rozptylového parametru S_{21} vychází vždy přímo z grafu srovnání průběhu stínění. Tyto hodnoty jsou pouze informační a neměly by být používány k volbě absorbéru.

12.2.2 WR187

Pro zjištění, zdali se stínící efekt neprojevuje lépe při vyšších frekvencích, byly vzorky podrobeny zkoušce v pásmu WR187, jehož frekvenční rozsah je 3,95 – 5,85 GHz. Toto pásmo se částečně používá u radarových systémů, ale také se ve vyšších hodnotách tohoto pásma pohybují Wi-Fi sítě a v nižších částech této frekvence zase v některých regionech satelitní komunikace.

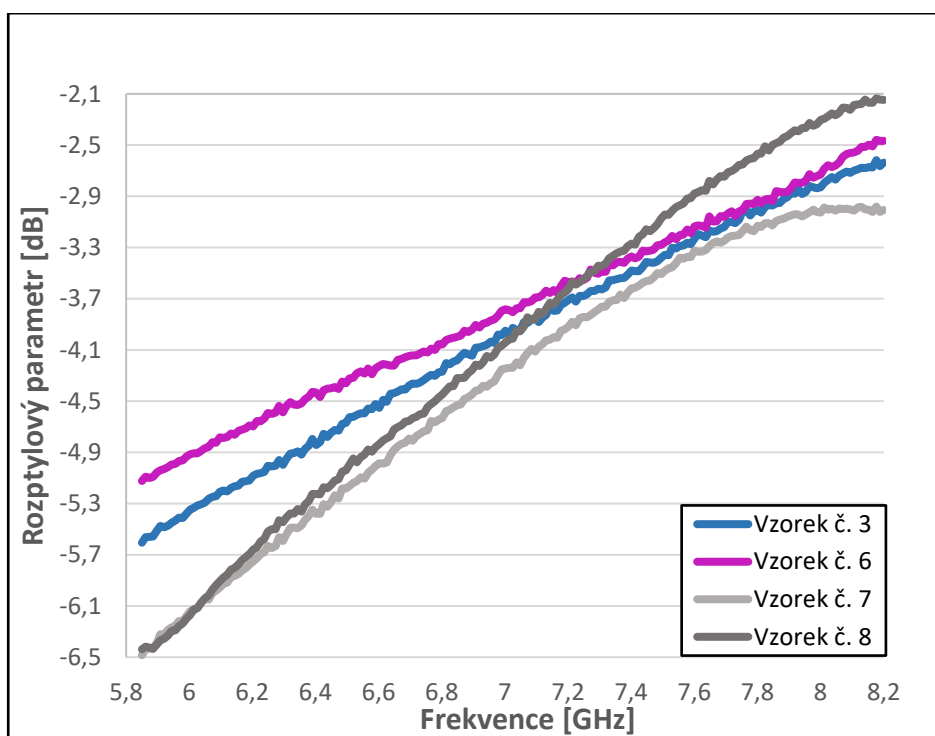
V tomto pásmu se skutečně stínící vlastnosti projevují lépe, a to u všech vzorků. Největší změna proběhla u vzorku č. 6, který se již chová více dle předpokladů. Naopak efekt se u vzorku č. 2 při frekvencích vyšších než 4,85 GHz zhoršuje.

Graf 3 Srovnání průběhu stínění (rozptylový parametr S_{21}) v pásnu WR187Graf 4 Srovnání průměrného rozptylového parametru S_{21} pro vlnovod WR187

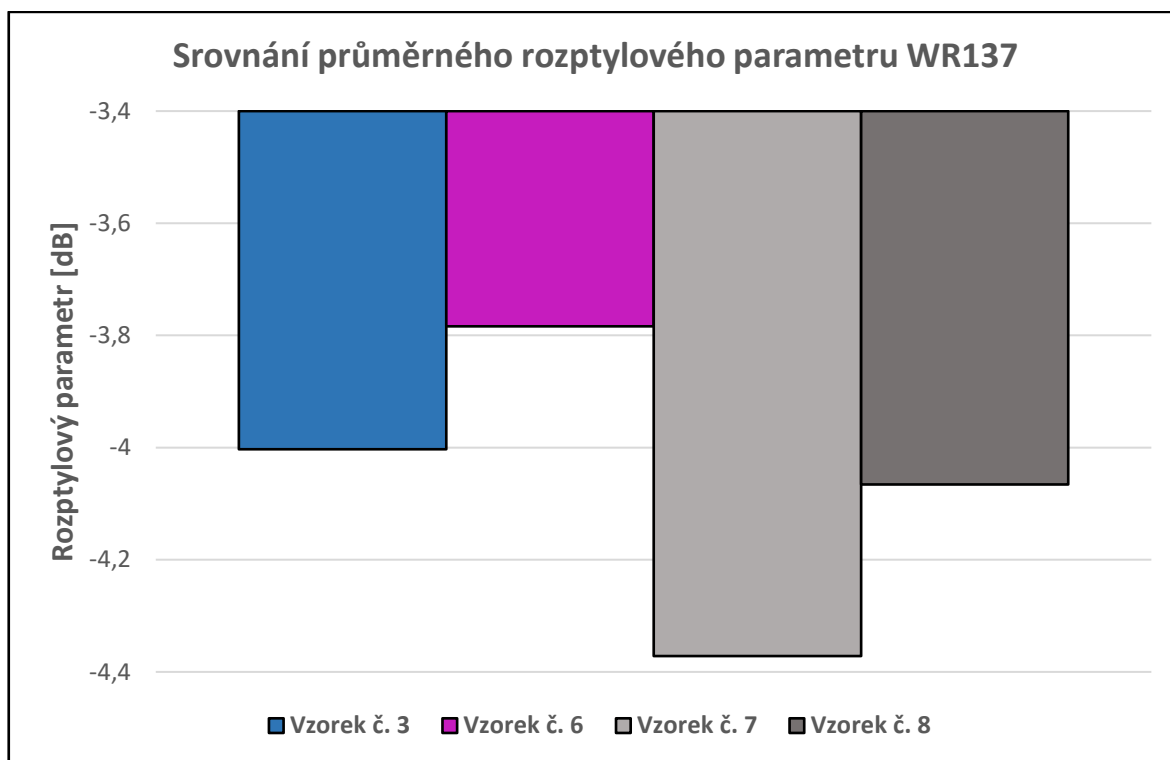
12.2.3 WR137

Jelikož nedocházelo v předchozích pásmech mezi jednotlivými vzorky k výrazným změnám nebo odlišnostem, byly v tomto pásmu změřeny pouze 4 vzorky s největším podílem exfoliovaného grafitu. Toto pásmo se pohybuje v rozmezí 5,85 – 8,2 GHz. Tato frekvence není běžně používána, jelikož je toto pásmo používáno zejména v radarových systémech vojenských, meteorologických a také letištních.

Na první pohled je v Grafu 5 zjevný rapidní pokles stínících vlastností vzorků 7 a 8. Tento pokles mohl způsobit vysoký podíl grafitu ve směsi, ze které jsou tyto vzorky vyrobeny, a tím vyšší hustota pórů. Je známo, že vlnová délka elektromagnetického vlnění je nepřímo úměrná jeho frekvenci, což znamená, že když se frekvence zvyšuje, vlnová délka se zkracuje, čím v daném frekvenčním pásmu nemusí být již dosaženo optimálního násobného odrazu elektromagnetické vlny ve zkoumaných vzorcích, a tedy dochází k výraznému poklesu stínící účinnosti. U zbylých dvou vzorků nebyl grafit v příliš velkém poměru a stínící efekt tak mohly způsobovat samotné saze, které rovněž přispívají ke stínícím vlastnostem.



Graf 5 Srovnání průběhu stínění (rozptylový parametr S_{2I}) v pásmu WR137



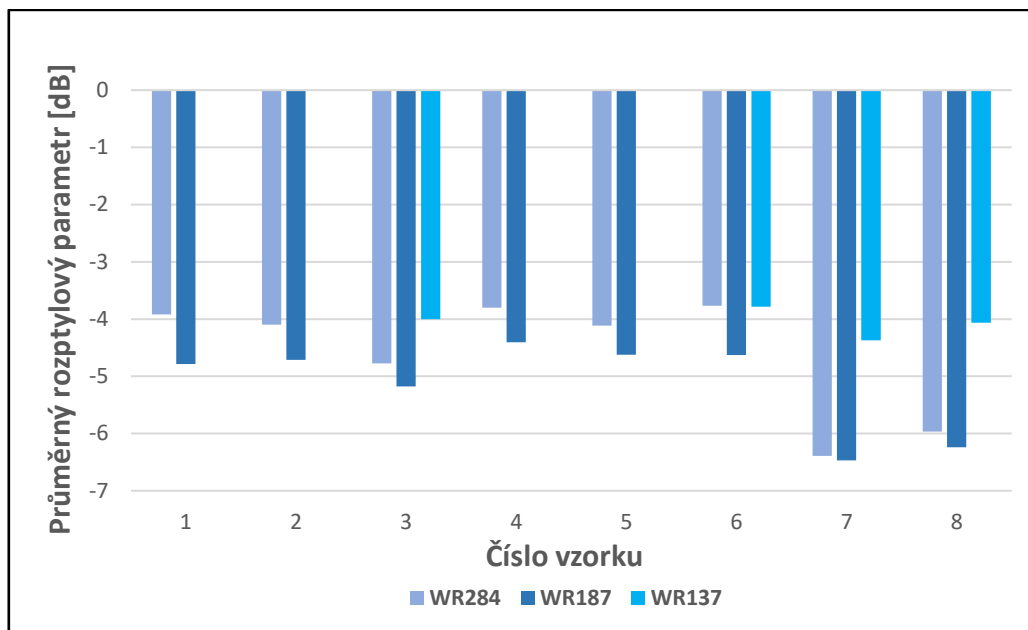
Graf 6 Srovnání průměrného rozptylového S_{21} pro vlnovod WR137

Z grafu č. 6 je rovněž zjevné, že při takto vysokých frekvencích, se stínící vlastnosti, způsobené napěněním díky grafitu, již příliš neprojevují, jelikož průměrný rozptylový parametr S_{21} se od vzorků s nižším podílem grafitu skoro neliší.

Srovnání průměrného rozptylového parametru je pouze informační, jak je materiál flexibilní pro používání v daném frekvenčním pásmu. V grafu 5 je totiž zjevné, že vzorky 7 a 8 stíní výrazně lépe v nižších frekvencích tohoto pásma, ale ve vyšších už tak účinné nejsou. Z tohoto důvodu je průměrná hodnota těchto vzorků vyšší. Při reálné aplikaci je proto nutné znát frekvenci vlnění pro aplikaci vhodného absorbéru.

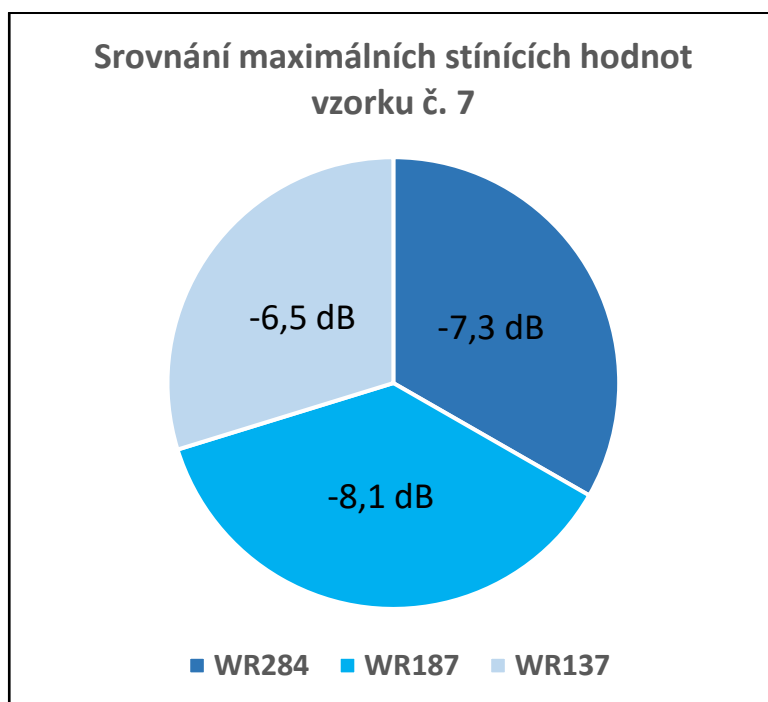
12.2.4 Srovnání výsledků frekvenčních pásem

Pro určení ideálního vlnového pásma pro používání těchto elastomerních magnetoaktivních pěn byl vytvořen graf č. 7, ze kterého lze srovnat výsledky průměrného rozptylového parametru.



Graf 7 Srovnání průměrného rozptylového parametru ve všech pásmech

Ze všech grafů je zjevné, že nejlepších hodnot dosahoval vzorek č. 7, který obsahuje železné částice a má tak ze všech použitých vzorků nejlepší radioabsorpční vlastnosti. Další vzorek, který dosahoval dobrých výsledků byl vzorek č. 8, který je obdobou vzorku 7, s rozdílem absence železných částic. Z těchto dosažených výsledků lze prohlásit, že podíl grafitových částic, ale také podíl železných částic má kladný vliv na radioabsorpční vlastnosti materiálu.



Graf 8 Maximální stínící hodnoty vzorku č. 7 v jednotlivých pásmech

V grafu 8 jsou zobrazeny maximální stínící hodnoty vzorku č. 7. Tyto hodnoty se však nachází vždy na počátečních frekvenčních daného pásma.

Dle dosažených výsledků lze usoudit, že použití těchto materiálů je nejvhodnější ve vlnovém pásmu WR187, jehož frekvence je 3,95 – 5,85 GHz. Avšak jak již bylo zmíněno, pro konkrétní aplikace je nutné znát konkrétní frekvenci, při které bude absorbér použit.

13 MECHANICKÉ VLASTNOSTI MAGNETOAKTIVNÍCH PĚN

Napěnění kaučukové směsi má za následek také změnu v mechanických vlastnostech. Z tohoto důvodu bylo provedeno měření některých základních mechanických vlastností pryžových materiálů.

13.1 Tvrdost Shore A – ČSN EN ISO 868

Tvrdost materiálu určuje odolnost materiálu vůči vniknutí standardizovaného trnu pod předem definovanou silou. Mechanická zkouška tvrdosti Shore A je metoda používaná k určení tvrdosti měkkých elastomerů a polymerních materiálů.

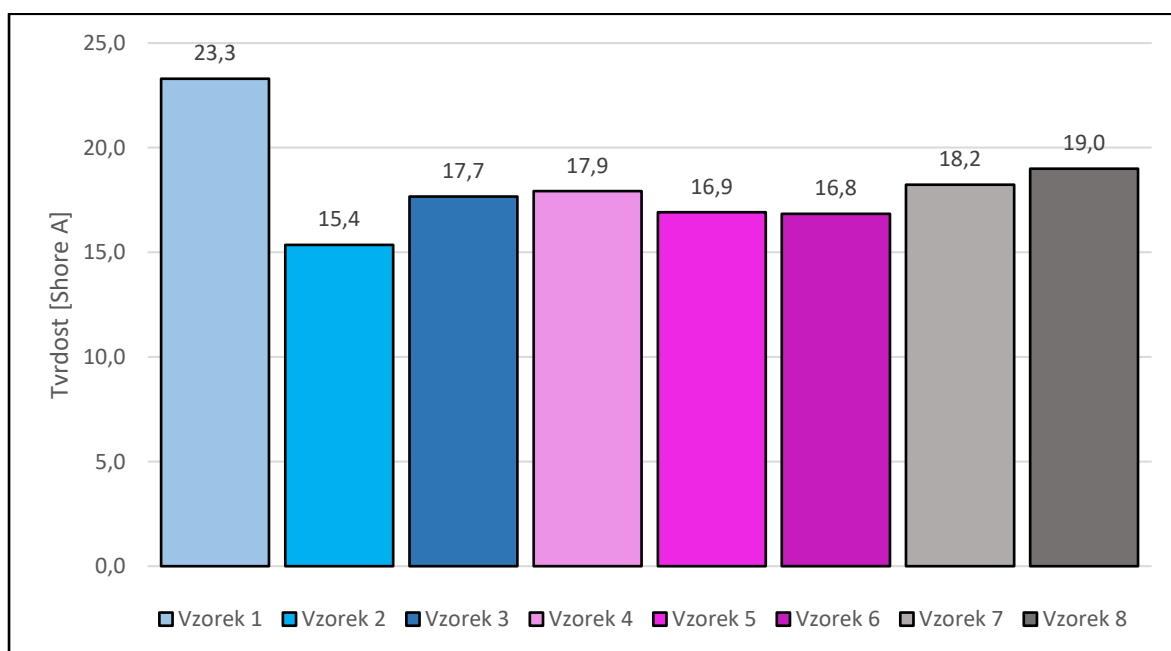
Zkouška je vykonávána na přístroji zvaném tvrdoměr, jehož trn je v případě Shore A kuželovitého tvaru s plochým zakončením. Působící síla, kterou je trn vtlačěn do měřeného tělesa, je 8,05 N. Čím nižší je hodnota na displeji tvrdoměru, tím je materiál měkkší a trn dokázal proniknout hlouběji. Každý vzorek byl změřen celkem 5x v různých částech vzorku v souladu s normou ČSN EN ISO 868.



Obrázek 40 Tvrdoměr Shore A Bareiss

Tabulka 14 Naměřené hodnoty Shore A

Tvrdość Shore A		Číslo vzorku							
		1	2	3	4	5	6	7	8
Číslo měření	1.	24,3	11,9	19	16,6	13,8	16,6	18,2	18,8
	2.	22,5	16,9	18,4	19,2	18,2	14,9	18,9	18
	3.	23,5	14,7	15,9	17,8	16,2	14,8	18,8	19,1
	4.	23,5	15,8	18,8	18,7	17,4	17,4	17,2	19,8
	5.	22,7	17,5	16,2	17,3	19	20,5	18,1	19,2
Průměr [Shore A]		23,3	15,4	17,7	17,9	16,9	16,8	18,2	19,0
Směrodatná odchylka		0,7	2,2	1,5	1,0	2,0	2,3	0,7	0,7



Graf 9 Grafické srovnání tvrdosti Shore A

Z tabulky č. 14 si lze v některých případech všimnout značnému rozdílu naměřených hodnot. Tento rozdíl je způsoben porézní strukturou pěny, kdy v místech výskytu pórů jsou zaznamenávány nižší hodnoty Shore A, a naopak v místech s menšími póry či žádnými může být tvrdost vzorku vyšší.

V grafu č. 9 je zobrazeno srovnání průměrné tvrdosti vzorků. Vzorky bez železných částic (4, 5 a 6) mají tvrdost relativně srovnatelnou, zatímco velké výkyvy jsou u vzorků se železnými částicemi (1, 2 a 3). Vzorek č. 2 je ze všech vzorků dle této zkoušky nejměkčí,

ale v tabulce č. 14 je vidět, že mohlo dojít k měření v místě, kde se vyskytoval velký pór. Při eliminaci příliš rozdílných hodnot by vzorky č. 2 až 8 měly srovnatelnou tvrdost.

13.2 Odrazová pružnost – ČSN EN ISO 4662

Tato zkouška probíhá prostřednictvím kyvadla dopadajícího na zkušební vzorek. Vzorek je pevně uchycen a z určité výšky na něj dopadá kulovité zakončení kyvadla. Po odrazu se změří výška odrazu kyvadla od zkušebního vzorku a určí se tak % z původní výšky pádu kyvadla.

Na každém vzorku bylo provedeno měření 3x na jednom místě z obou stran. Výsledná odrazová pružnost byla následně určena dle následujícího vzorce:

$$R = \frac{med_1 + med_2}{2} \quad (6)$$

, kde med_1 a med_2 jsou mediány jednotlivých stran.

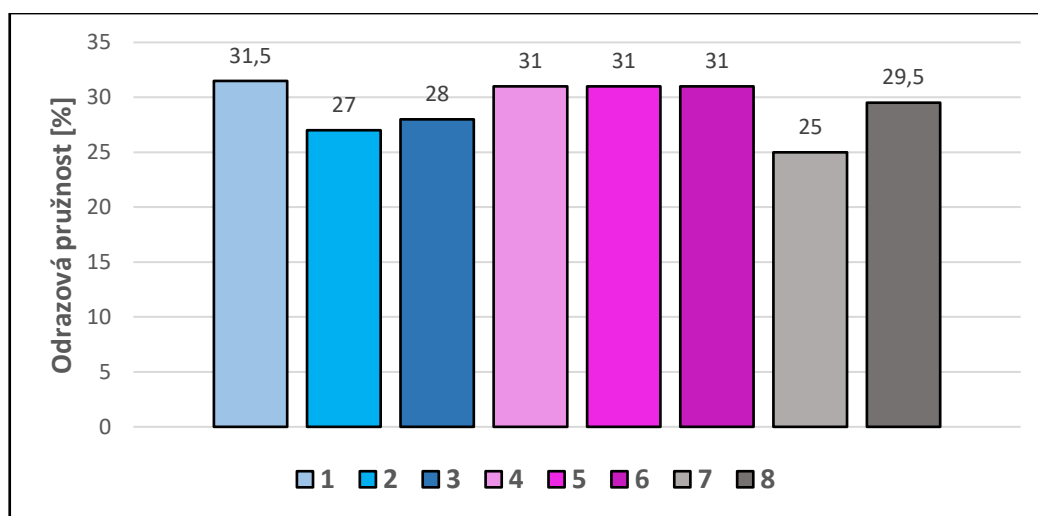


Obrázek 41 Kladívkové kyvadlo

Tabulka 15 Naměřená odrazová pružnost

	Číslo vzorku							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Strana 1								
1.	30	29	29	30	32	32	26	30
2.	31	28	29	30	32	32	26	29
3.	32	29	29	30	32	32	26	29
Med₁	31	29	29	30	32	32	26	29
Strana 2								
1.	29	24	25	32	30	30	24	30
2.	32	25	27	32	30	31	24	30
3.	32	26	28	33	30	30	25	30
Med₂	32	25	27	32	30	30	24	30
R [%]	32	27	28	31	31	31	25	30

U vzorků obsahujících železné částice je zjevné, že jejich odrazová pružnost je nižší v porovnání se vzorky bez těchto částic. Zajímavý je vzorek č. 1, u kterého by se dalo předpokládat, že v závislosti na nejméně napěněné struktuře a podílu železných částic bude jeho odrazová pružnost nejmenší. Naopak vzorek č. 7 by na základě stejných předpokladů měl být ze vzorků se železnými částicemi nejpružnější, avšak při přípravě vzorků je zmíněno, že tento vzorek by formu dokázal pravděpodobně zaplnit i při menším objemu materiálu vloženém do formy. Tímto způsobem by dokázal efektivněji napěnit a odrazová pružnost by byla rovněž lepší.



Graf 10 Srovnání odrazové pružnosti

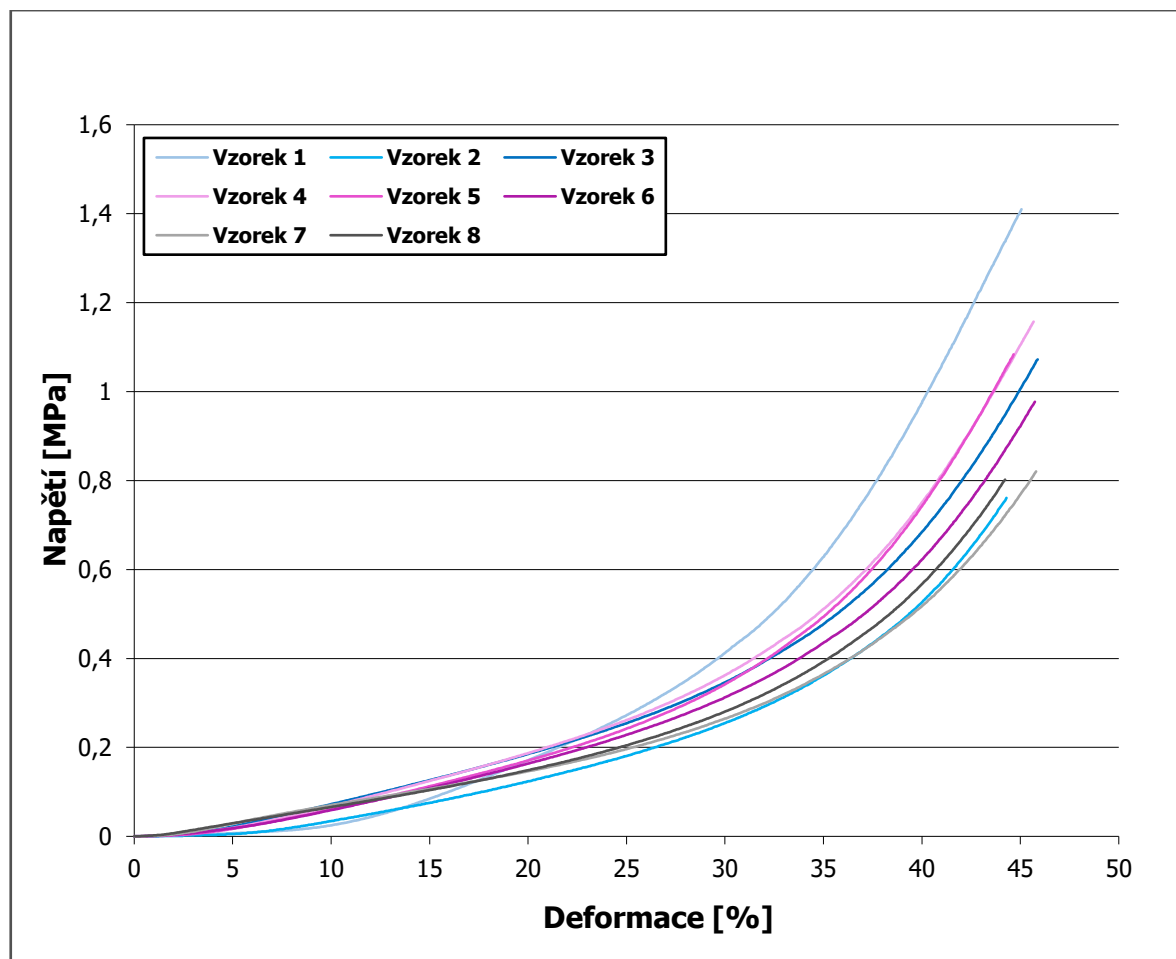
13.3 Tlaková zkouška – ISO 3386

Zkouška probíhá na vzorcích se stejným rozměrem, přičemž poměr velikosti stran a tloušťky materiálu nesmí být menší než 2:1. V našem případě měla všechna zkušební tělesa rozměr 50×49 mm. Zkouška probíhala při rychlosti stlačování 5 mm/min. Velikost deformace byla přednastavena na 50 %.

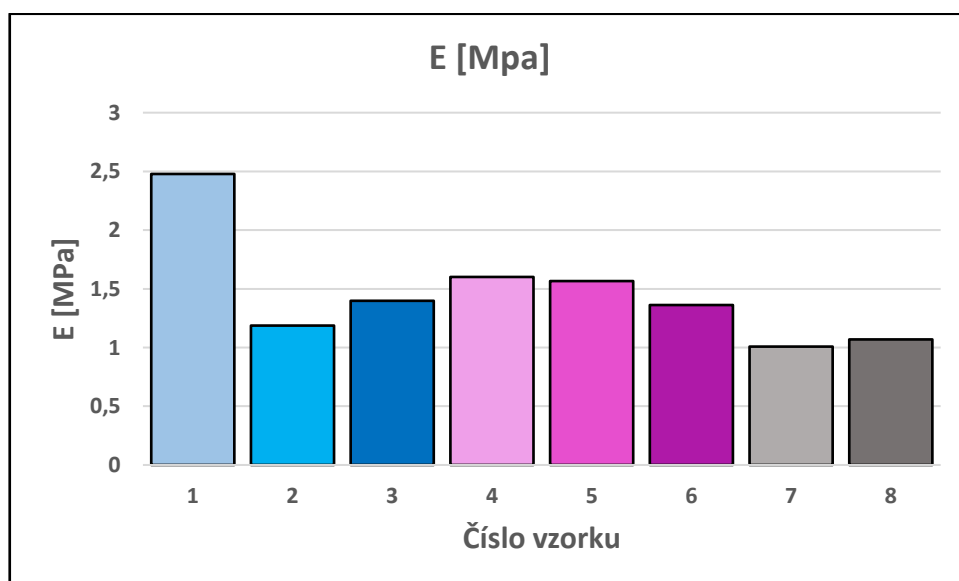


Obrázek 42 Přístroj na jednoosé namáhání Testometric M350-5CT

13.3.1 Naměřená data a výsledky



Graf 11 Průběh tlakové deformace materiálu

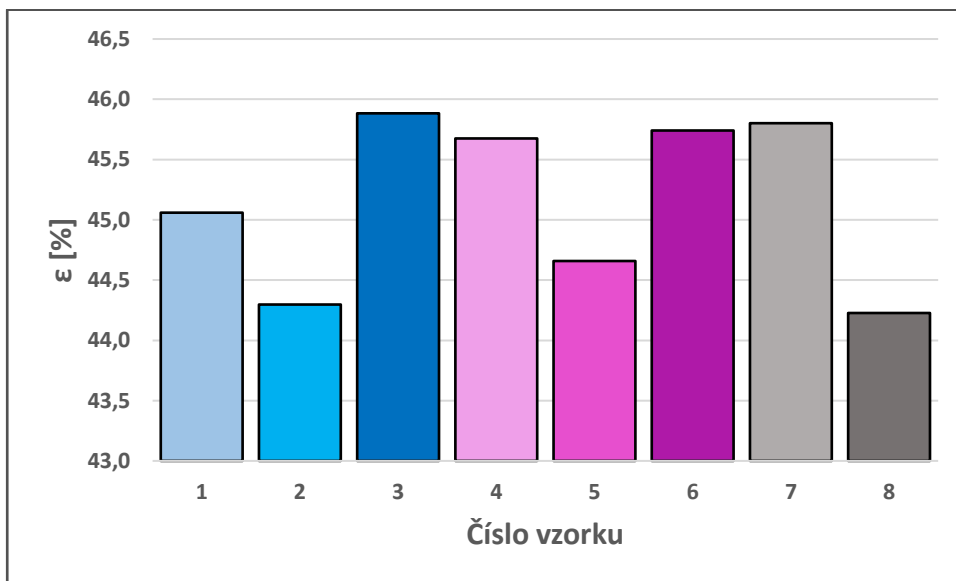


Graf 12 Grafické srovnání Youngova modulu

Youngův modul vyjadřuje tuhost materiálu,

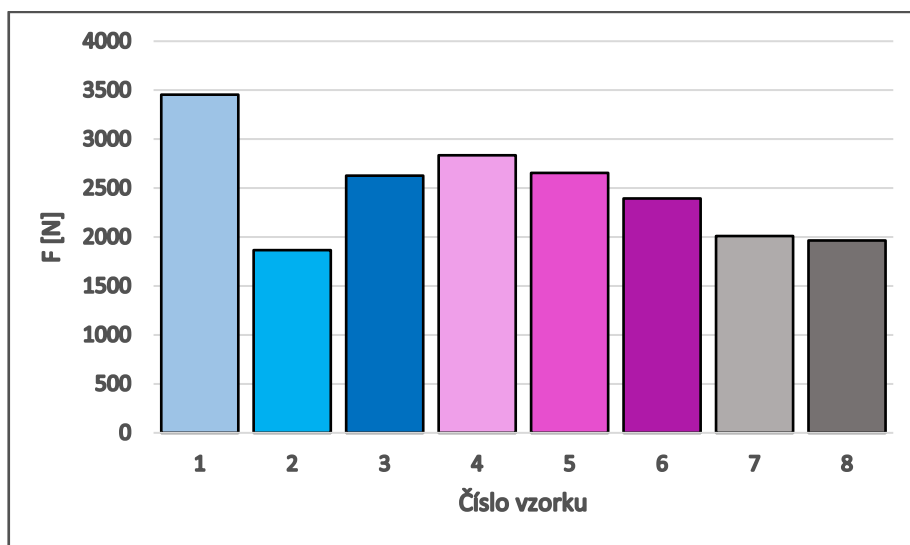
$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (7)$$

tudíž je-li hodnota E vyšší, znamená to, že je daný materiál tvrdší a má menší tendenci se deformovat. Kromě vzorku č. 1 se všechny vzorky s podílem železných částic jeví jako poddajnější.



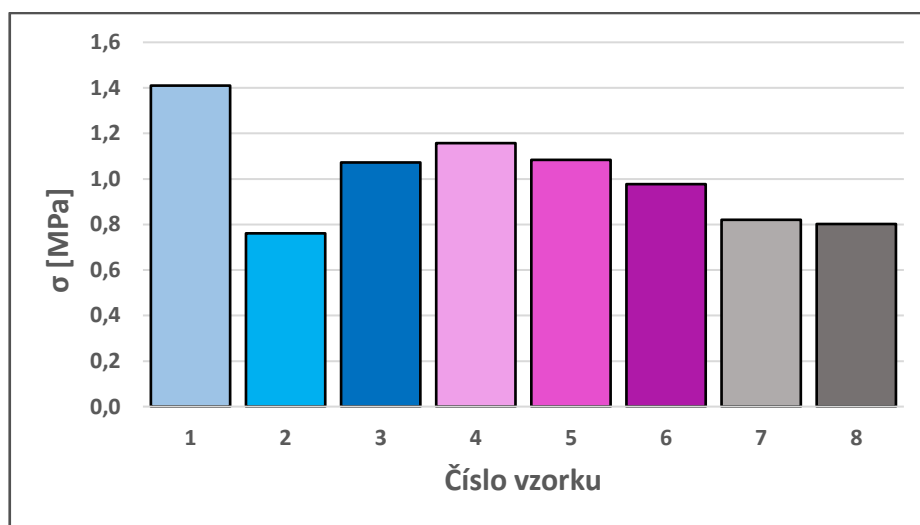
Graf 13 Grafické srovnání maximální dosažené deformace

Z grafu č. 45 je vidět, že nedošlo k dosažení hranice stlačení 50 %, což může znamenat, že materiál není dostatečně tažný. Vzorek č. 3 je díky dosažení nejvyšší hodnoty deformace nejtažnější. I když na první pohled jsou zjevné rozdíly, reálné deformace nedosahují ani rozdílu 2 %.



Graf 14 Grafické srovnání maximální síly stlačení

Graf 15 porovnává maximální sílu stlačení materiálů, ze kterého je vidět, že vzorek č.1 je schopný vydržet největší sílu při stlačování a je tak ze všech vzorků nejpevnější. Naopak díky vysoce napěštěné struktuře vzorků 2, 7 a 8 se tyto jeví jako nejméně pevné.



Graf 15 Grafické srovnání maximálního napětí

Jelikož hodnota napětí σ je počítána jako síla působící na plochu a plocha všech vzorků byla stejná, je průběh grafu napětí stejný jako průběh síly.

$$\sigma = \frac{F}{S} \quad (8)$$

, kde S je plocha stlačovaného vzorku.

U vzorku č. 1 nedošlo ke vzniku tak porézní struktury jako u jiných vzorků a z tohoto důvodu se při stlačení na vzorek vyvinul tak vysoký tlak.

ZÁVĚR

V teoretické části byla provedena rešerše související s radioabsorpcí magnetoaktivních materiálů a příprava jejich směsí.

V praktické části byl připraven masterbatch, který dále sloužil k míchání směsí s rozdílným složením pro analýzu radioabsorpčních a mechanických vlastností.

Pomocí vektorového analyzátoru byly změřeny stínící vlastnosti vzorků, přičemž nejlepších stínících výsledků dosahoval vzorek č. 7. Směs vzorků 7 a 8 by se tedy dala v praxi použít i díky své nízké váze a pružnosti materiálu v satelitních a radarových systémech právě v rozsahu od 4 do 6 GHz, kde dosahoval tento materiál nejlepších výsledků. Dále byly provedeny mechanické zkoušky, které prokázaly, že napětí materiálu přispívá k větší tažnosti materiálu, ale snižuje jeho pevnost a tuhost. S ohledem na dobré výsledky mechanických vlastností by bylo možné použít směs vzorku číslo 3 avšak v aplikacích, kde je stínění vyžadováno jen částečně.

Všechny výsledky jsou uvedeny v grafech a tabulkách.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] X HUI, Liu a Xingyan YAO. *Performance of Magnetorheological Fluids Flowing Through Metal Foams* [online]. 144-148 [cit. 2025-02-05]. Dostupné z: doi:10.2478/v10048-011-0028-8
- [2] SCHÜMANN, Malte, Stefan GÜNTHER a S. ODENBACH. *The effect of magnetic particles on pore size distribution in soft polyurethane foams* [online]. 1-10 [cit. 2025-02-05]. Dostupné z: doi:10.1088/0964-1726/23/7/075011
- [3] DE VICENTE, Juan, Daniel J. KLINGENBERG a Roque HIDALGO-ALVAREZ. *Magnetorheological fluids: a review* [online]. 1-10 [cit. 2025-02-05]. Dostupné z: doi:10.1039/c0sm01221a
- [4] *Dimorphic magnetorheological fluid with improved rheological properties* [online]. 3246-3250 [cit. 2025-02-05]. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmmm.2011.07.024
- [5] KRÁLOVÁ, Magda. TECHMANIA SCIENCE CENTER. *Magnetické látky* [online]. 2007 [cit. 2025-02-11]. Dostupné z: <https://edu.techmania.cz/cs/encyklopedie/fyzika/magnetismus/magneticke-latky>
- [6] FISKE, T. J., H. S. GOKTURK a D. M. KALYON. Percolation in magnetic composites. *Journal of Materials Science*. 1997, **32**(20), 5551-5560. ISSN 1573-4803. Dostupné z: doi:10.1023/A:1018620407013
- [7] GAO, Chang, Kam POON, Matilde CONCILIO, Thomas ZINN, Georgina GREGORY a Charlotte WILLIAMS. High-Performance Recyclable Polyester Elastomers Through Transient Strain-Stiffening. *Advanced Materials*. 2025/04/16. Dostupné z: doi:10.1002/adma.202416674
- [8] WANG, Kai, Hengxu LV a Zhixin LIU. Vulcanization Characteristics and Static/Dynamic Mechanical Properties of Chlorinated Butyl Rubber Matrix Materials. *Polymers*. 2025/03/07, **17**, 708. Dostupné z: doi:10.3390/polym17060708
- [9] KIM, Jeongnam, Youngki KIM a Youhee CHO. Estimation of Synthetic Rubber Lifespan Based on Ozone Accelerated Aging Tests. *Polymers*. 2025/03/20, **17**, 819. Dostupné z: doi:10.3390/polym17060819
- [10] BASTOLA, Anil K. a Mokarram HOSSAIN. The shape – morphing performance of magnetoactive soft materials. *Materials & Design* [online]. [cit. 2025-02-05]. ISSN 0264-1275. Dostupné z: doi:10.1016/j.matdes.2021.110172

- [11] MAO, Y., K. YU, M.S. ISAKOV, J. WU, M.L. DUNN a H. JERRY QI. Sequential Self-Folding Structures by 3D Printed Digital Shape Memory Polymers. *Scientific Reports*. 2015, **5**. Dostupné z: doi:10.1038/srep13616
- [12] WEI, Hongqiu, Qiwei ZHANG, Yongtao YAO, Liwu LIU, Yanju LIU a Jinsong LENG. Direct-Write Fabrication of 4D Active Shape-Changing Structures Based on a Shape Memory Polymer and Its Nanocomposite. *ACS Applied Materials & Interfaces*. American Chemical Society, 2017/01/11, **9**(1), 876-883. ISSN 1944-8244. Dostupné z: doi:10.1021/acsami.6b12824
- [13] MA, Chunping, Shuai WU, Qiji ZE, Xiao KUANG, Rundong ZHANG, H. Jerry QI a Ruike ZHAO. Magnetic Multimaterial Printing for Multimodal Shape Transformation with Tunable Properties and Shiftable Mechanical Behaviors. *ACS Applied Materials & Interfaces*. American Chemical Society, 2021/03/24, **13**(11), 12639-12648. ISSN 1944-8244. Dostupné z: doi:10.1021/acsami.0c13863
- [14] WANG, Liu, Yoonho KIM, Chuan Fei GUO a Xuanhe ZHAO. Hard-magnetic elastica. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 2020, **142**, 104045. ISSN 0022-5096. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.1016/j.jmps.2020.104045
- [15] SCHLIEPHAKE, Mia, Julia LINKE a S. ODENBACH. Magnetic characterization of magnetoactive elastomers containing magnetic hard particles using first-order reversal curve analysis. *Magnetic Hybrid Materials, Multi-scale Modelling, Synthesis, and Applications* [online]. 262-268 [cit. 2025-02-06]. Dostupné z: doi:10.1515/9783110569636-010
- [16] ZHAO, Ruike, Yoonho KIM, Shawn A. CHESTER, Pradeep SHARMA a Xuanhe ZHAO. Mechanics of hard-magnetic soft materials. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 2019, **124**, 244-263. ISSN 0022-5096. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.1016/j.jmps.2018.10.008
- [17] TIAN, J., X. ZHAO, X. D. GU a S. CHEN. Designing Ferromagnetic Soft Robots (FerroSoRo) with Level-Set-Based Multiphysics Topology Optimization. In: *2020 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. 2020, s. 10067-10074. ISSN 2577-087X. Dostupné z: doi:10.1109/ICRA40945.2020.9197457
- [18] MARZUKI, Ainaa Amirah, Nur Azmah NORDIN, Saiful Amri MAZLAN, Mohd Aidy Faizal JOHARI, Rahayu Emilia MOHAMED KHAIDIR, Michal SEDLACIK a UBAIDILLAH,. Enhancement of the rheological properties of magnetorheological foam via different constraint volumes foaming approach. *Polymer Testing*. 2023, **128**, 108235. ISSN 0142-9418. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2023.108235

- [19] SEDLACIK, M., M. MRLIK, V. BABAYAN a V. PAVLINEK. Magnetorheological elastomers with efficient electromagnetic shielding. *Composite Structures*. 2016, **135**, 199-204. ISSN 0263-8223. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.09.037>
- [20] HU, Ke, Jianfei SUN, Zhaobin GUO, Peng WANG, Qiang CHEN, Ming MA a Ning GU. A Novel Magnetic Hydrogel with Aligned Magnetic Colloidal Assemblies Showing Controllable Enhancement of Magnetothermal Effect in the Presence of Alternating Magnetic Field. *Advanced Materials*. John Wiley & Sons, 2015/04/01, **27**(15), 2507-2514. ISSN 0935-9648. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1002/adma.201405757>
- [21] MITSUMATA, Tetsu a Suguru OHORI. Magnetic polyurethane elastomers with wide range modulation of elasticity. *Polymer Chemistry*. The Royal Society of Chemistry, 2011, **2**(5), 1063-1067. ISSN 1759-9954. Dostupné z: doi:[10.1039/C1PY00033K](https://doi.org/10.1039/C1PY00033K)
- [22] BASTOLA, Anil K., Nadia RODRIGUEZ, Marc BEHL, Patricia SOFFIATTI, Nick P. ROWE a Andreas LENDLEIN. Cactus-inspired design principles for soft robotics based on 3D printed hydrogel-elastomer systems. *Materials & Design*. 2021, **202**, 109515. ISSN 0264-1275. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.109515>
- [23] DOMINGO-ROCA, R., J.C. JACKSON a J.F.C. WINDMILL. 3D-printing polymer-based permanent magnets. *Materials and Design*. 2018, **153**, 120-128. Dostupné z: doi:[10.1016/j.matdes.2018.05.005](https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.05.005)
- [24] SHAO, G., H.O.T. WARE, L. LI a C. SUN. Rapid 3D Printing Magnetically Active Microstructures with High Solid Loading. *Advanced Engineering Materials*. 2020, **22**(3). Dostupné z: doi:[10.1002/adem.201900911](https://doi.org/10.1002/adem.201900911)
- [25] JANG, Daehwan, Dongjo KIM a Jooho MOON. Influence of Fluid Physical Properties on Ink-Jet Printability. *Langmuir*. American Chemical Society, 2009/03/03, **25**(5), 2629-2635. ISSN 0743-7463. Dostupné z: doi:[10.1021/la900059m](https://doi.org/10.1021/la900059m)
- [26] LIGON, Samuel Clark, Robert LISKA, Jürgen STAMPFL, Matthias GURR a Rolf MÜLHAUPT. Polymers for 3D Printing and Customized Additive Manufacturing. *Chemical Reviews*. American Chemical Society, 2017/08/09, **117**(15), 10212-10290. ISSN 0009-2665. Dostupné z: doi:[10.1021/acs.chemrev.7b00074](https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.7b00074)
- [27] GE, Qi, Zhiqin LI, Zhaolong WANG, Kavin KOWSARI, Wang ZHANG, Xiangnan HE, Jianlin ZHOU a Nicholas X FANG. Projection micro stereolithography based 3D printing and its applications.

International Journal of Extreme Manufacturing. IOP Publishing, 2020, **2**(2), 022004. ISSN 2631-7990.
Dostupné z: doi:10.1088/2631-7990/ab8d9a

- [28] SKALSKI, Paweł a Klaudia KALITA. *Role of Magnetorheological Fluids and Elastomers in Today's World* [online]. 267-274 [cit. 2025-02-05]. Dostupné z: doi:10.1515/ama-2017-0041
- [29] CARLSON, J.David a Mark R JOLLY. MR fluid, foam and elastomer devices. *Mechatronics*. 2000, **10**(4), 555-569. ISSN 0957-4158. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.1016/S0957-4158(99)00064-1
- [30] GUO, Jiang, Shaohua XI, Yingxin ZHANG, et al. Biomass-based Electromagnetic Wave Absorption Materials with Unique Structures: A Critical Review. *ES Food & Agroforestry*. 2023, **13**, 900. Dostupné z: doi:10.30919/esfaf900
- [31] SHI, Yuxia, Baoquan LIANG, Hong GAO, et al. Research progress on spherical carbon-based electromagnetic wave absorbing composites. *Carbon*. 2024, **227**, 119244. ISSN 0008-6223. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.1016/j.carbon.2024.119244
- [32] FU, Xueqiang, Hong PAN, Lihui XU, et al. Flexible phase change film based on lignin-derived porous carbon/Eicosane for wearable thermal management and microwave absorption. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2024, **275**, 133630. ISSN 0141-8130. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.133630
- [33] CHEN, Yangbing, Ran JI, Peiwen WANG, et al. Electrically insulated C@MnxOy foams with engineered defects and heterointerfaces toward superior microwave absorption, Radar wave stealth, and thermal dissipation. *Journal of Materials Science & Technology*. 2025, **221**, 54-67. ISSN 1005-0302. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.1016/j.jmst.2024.09.028
- [34] WANG, Xiaolin, Zhe LIU, Hui WANG a Changchun ZENG. An Electro-Mechanical Coupled Model for 3D Printed Piezoelectrets: Development, Validation, and Prediction. *Engineered Science*. 2023, **24**, 899. Dostupné z: doi:10.30919/es899
- [35] ZHAO, Rui, Baoquan LIANG, Yuxia SHI, et al. Recent progress of carbon-based magnetic fibers for electromagnetic wave absorption. *Carbon*. 2024, **229**, 119513. ISSN 0008-6223. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.1016/j.carbon.2024.119513
- [36] LAN, Di, Zhenguo GAO, Zehao ZHAO, Kaichang KOU a Hongjing WU. Application progress of conductive conjugated polymers in electromagnetic wave absorbing composites. *Composites*

Communications. 2021, **26**, 100767. ISSN 2452-2139. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.coco.2021.100767>

- [37] LI, Zhaoyang, Xi CHEN, Di LIU, Yanli ZHOU, Duo PAN a Sunmi SHIN. Recent advances in polymer-based composites for thermal management and electromagnetic wave absorption. *Advanced Composites and Hybrid Materials*. 2025/03/18, **8**. Dostupné z: doi:10.1007/s42114-025-01243-y
- [38] ZHOU, Meng, Zan YU, Qiming YAN a Xinya ZHANG. Asymmetric Structural Design for Absorption-Dominated Electromagnetic Interference Shielding Composites. *Advanced Functional Materials*. 2025/01/28. Dostupné z: doi:10.1002/adfm.202423884
- [39] ENARADINASTROJE.CZ. *Tloušťkoměr Käfer K200* [online]. [cit. 2025-04-30]. Dostupné z: https://www.enaradinastroje.cz/tloustkomer-kafer-k200-hloubka-trmenu-200mm/?gad_source=1&gad_campaignid=22397644043&gclid=Cj0KCQjwIMfABhCWARIsADGXdy-tlFKZguIzQdr2qA2RvYWBhjnwZApukwTeqz_jPWVBW26ua_v_-R0aAvV_EALw_wcB

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 Závislost viskozity η na rychlosti smykové deformace při různé intenzitě magnetického pole u MR suspenzí [4].....	13
Obrázek 2 Natáčení vektorů vnitřní magnetizace při vložení feromagnetické látky do vnějšího magnetického pole [5]	16
Obrázek 3 Hysterezní křivka [5]	17
Obrázek 4 Závislost hustoty a pórovitosti pěn vyrobených při různých objemech řízeného pění [18]	25
Obrázek 5 Lití MSM do formy [10].....	26
Obrázek 6 Metoda 3D tisku [10].....	27
Obrázek 7 Metoda DIW bez působení magnetického pole [10]	28
Obrázek 8 Metoda DIW při působení magnetického pole [10]	29
Obrázek 9 Metoda FDM [10].....	30
Obrázek 10 Metoda DLS [10].....	30
Obrázek 11 Metoda MJ [10]	31
Obrázek 12 Metoda TPP [10]	32
Obrázek 13 Struktura MR kapaliny: a) bez působení magnetického pole; b) v přítomnosti magnetického pole [28].....	33
Obrázek 14 Struktura MR elastomerů: a) anizotropní MRE; b) izotropní MRE [28]	34
Obrázek 15 EPDM Keltan 4869C.....	40
Obrázek 16 Černé saze – N660.....	41
Obrázek 17 Stearin.....	41
Obrázek 18 Oxid zinečnatý.....	42
Obrázek 19 Gumárenský hnětič Everplast.....	43
Obrázek 20 Ovládací panel hnětiče	43
Obrázek 21 Dvouválec Scientific	44
Obrázek 22 Zhomogenizovaná směs	44
Obrázek 23 Analogický tloušťkoměr Käfer K200 [39]	45
Obrázek 24 Laboratorní gumárenský hnětič Brabender	46
Obrázek 25 Laboratorní gumárenský dvouválec Farrel G-2603 150x330 mm	47
Obrázek 26 Ruční lis.....	48
Obrázek 27 Vzorek č. 1 – 2,5 mm po vulkanizaci.....	48
Obrázek 28 Napěněná struktura vzorku č. 1 – 2,5 mm.....	49
Obrázek 29 Vzorek č. 1 + řez	49
Obrázek 30 Vzorek č. 2 + řez	50
Obrázek 31 Vzorek č. 3 + řez	51

Obrázek 32 Vzorek č. 7 + řez	52
Obrázek 33 Vzorek č. 4 + řez	53
Obrázek 34 Vzorek č. 5 + řez	54
Obrázek 35 Vzorek č. 6 + řez	54
Obrázek 36 Řez vzorku č. 8 – 2 mm.....	55
Obrázek 37 Vzorek č. 8 + řez	56
Obrázek 38 Vektorový analyzátor Agilent N5230A s připojeným rektangulárním vlnovodem WR187	57
Obrázek 39 Hydraulický lis REDATS.....	58
Obrázek 40 Tvrdoměr Shore A Bareiss	66
Obrázek 41 Kladívkové kyvadlo	68
Obrázek 42 Přístroj na jednoosé namáhání Testometric M350-5CT	70

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Curieova teplota vybraných látek [5].....	16
Tabulka 2 Složení kaučukové směsi (masterbatch)	40
Tabulka 3 Podmínky míchání kaučukové směsi.....	42
Tabulka 4 Podmínky válcování kaučukové směsi (masterbatch)	44
Tabulka 5 Složení vzorku č. 1.....	47
Tabulka 6 Složení vzorku č. 2.....	49
Tabulka 7 Složení vzorku č. 3.....	50
Tabulka 8 Složení vzorku č. 7.....	51
Tabulka 9 Složení vzorku č. 4.....	52
Tabulka 10 Složení vzorku č. 5.....	53
Tabulka 11 Složení vzorku č. 6.....	54
Tabulka 12 Složení vzorku č. 8.....	55
Tabulka 13 Rozměry těles pro měření frekvenční pásma	58
Tabulka 14 Naměřené hodnoty Shore A.....	67
Tabulka 15 Naměřená odrazová pružnost.....	69

SEZNAM GRAFŮ

Graf 1 Srovnání průběhu stínění (rozptylový parametr S_{21}) v pásmu WR284.....	59
Graf 2 Srovnání průměrného rozptylového parametru S_{21} pro vlnovod WR284	60
Graf 3 Srovnání průběhu stínění (rozptylový parametr S_{21}) v pásmu WR187.....	61
Graf 4 Srovnání průměrného rozptylového parametru S_{21} pro vlnovod WR187	61
Graf 5 Srovnání průběhu stínění (rozptylový parametr S_{21}) v pásmu WR137.....	62
Graf 6 Srovnání průměrného rozptylového S_{21} pro vlnovod WR137	63
Graf 7 Srovnání průměrného rozptylového parametru ve všech pásmech	64
Graf 8 Maximální stínící hodnoty vzorku č. 7 v jednotlivých pásmech.....	64
Graf 9 Grafické srovnání tvrdosti Shore A	67
Graf 10 Srovnání odrazové pružnosti	69
Graf 11 Průběh tlakové deformace materiálu	71
Graf 12 Grafické srovnání Youngova modulu	71
Graf 13 Grafické srovnání maximální dosažené deformace.....	72
Graf 14 Grafické srovnání maximální síly stlačení	73
Graf 15 Grafické srovnání maximálního napětí	73

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

MAP Magnetoaktivní pěny

MSM Magneticky měkké materiály

MR Magnetoreologický

3D 3rozměrný

4D 4rozměrný

DIW Direct ink writing

FDM Fused deposition modelling

DLS Digital light synthesis

MJ Material jetting

TPP Two photon polymerization

MRE Magnetoreologické elastomery

EPDM Ethylen-propylen-dienový kaučuk

NBR Nitrilový kaučuk

FKM Fluorovaný kaučuk

ZnO Oxid zinečnatý