

Vliv struktury magnetoreologických elastomerů na jejich aktuaci

Bc. Martin Musil

Diplomová práce
2019



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2018/2019

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Martin Musil**

Osobní číslo: **T17372**

Studijní program: **N3909 Procesní inženýrství**

Studijní obor: **Výrobní inženýrství**

Forma studia: **kombinovaná**

Téma práce: **Vliv struktury magnetoreologických elastomerů na jejich aktuaci**

Zásady pro vypracování:

1. Vypracování literární rešerše na zadané téma
2. Příprava magnetoreologických elastomerů lišících se typem, koncentrací a orientací magnetického plniva v elastomerní matici
3. Analýza připravených systémů (piezoresistivita, magnetoreologie)
4. Vyhodnocení a srovnání získaných výsledků.

Rozsah diplomové práce: **cca 60 stran**
Rozsah příloh: **dle pokynů VDP**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

1. **CARLSON, J.D. MR fluid, foam and elastomer devices, Mechatronix, 2000, 10(4-5), 555?569.**
2. **SCHWARTZ, M. Encyclopedia of Smart Materials, John Wiley & Sons Inc., 2002, New York, USA. ISBN 0-471-17780-6**
3. **Literární zdroje dostupné v rámci knihovny UTB**

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Robert Moučka, Ph.D.**
Externí
Datum zadání diplomové práce: **2. ledna 2019**
Termín odevzdání diplomové práce: **17. května 2019**

Ve Zlíně dne 7. února 2019

L.S.

doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.
děkan

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

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby¹⁾;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3²⁾;
- beru na vědomí, že podle § 60³⁾ odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60³⁾ odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně 16.5.2019

.....

¹⁾ zákon č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, § 47 Zveřejňování závěrečných prací:

(1) Vysoká škola nevydělečně zveřejňuje disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce, u kterých proběhla obhajoba, včetně posudků oponentů a výsledku obhajoby prostřednictvím databáze kvalifikačních prací, kterou spravuje. Způsob zveřejnění stanoví vnitřní předpis vysoké školy.

(2) Disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce odevzdané uchazečem k obhajobě musí být též nejméně pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněny k nahlédnutí veřejnosti v místě určeném vnitřním předpisem vysoké školy nebo není-li tak určeno, v místě pracoviště vysoké školy, kde se má konat obhajoba práce. Každý si může ze zveřejněné práce pořizovat na své náklady výpisy, opisy nebo rozmnoženiny.

(3) Platí, že odevzdáním práce autor souhlasí se zveřejněním své práce podle tohoto zákona, bez ohledu na výsledek obhajoby.

²⁾ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 35 odst. 3:

(3) Do práva autorského také nezasahuje škola nebo školské či vzdělávací zařízení, užíje-li nikoli za účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obchodního prospěchu k výuce nebo k vlastní potřebě díla vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacímu zařízení (školní dílo).

³⁾ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 60 Školní dílo:

(1) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení mají za obvyklých podmínek právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla (§ 35 odst. 3). Odpírá-li autor takového díla udělit svolení bez vážného důvodu, mohou se tyto osoby domáhat nahrazení chybějícího projevu jeho vůle u soudu. Ustanovení § 35 odst. 3 zůstává nedotčeno.

(2) Není-li sjednáno jinak, může autor školního díla své dílo užit či poskytnout jinému licenci, není-li to v rozporu s oprávněnými zájmy školy nebo školského či vzdělávacího zařízení.

(3) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení jsou oprávněny požadovat, aby jim autor školního díla z výdělku jím dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence podle odstavce 2 přiměřeně přispěl na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložily, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přihlédne k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

ABSTRAKT

Předložená diplomová práce se zabývá vlivem struktury magnetoreologických elastomerů na jejich piezorezistivitu. V teoretické části jsou popsány druhy kompozitních materiálů, jejich rozdělení, používaná plniva a jejich klíčové vlastnosti. Dále se zabývá rozdělením, použitím a typickými vlastnostmi magnetoreologických materiálů a metodami měření piezorezistivity. V praktické části jsou vybrány vhodné materiály a z nich připraveny magnetoreologické kompozity s vnitřní strukturou. Připravené kompozitní vzorky jsou podrobeny měření elektrické vodivosti v závislosti na jejich deformaci v tlaku. V závěru je diskutován vliv struktury kompozitu a koncentrace plniva na piezorezistivitu studovaných materiálů.

Klíčová slova: kompozitní materiály, magnetoreologické elastomery, piezorezistivita, percolační teorie, percolační práh, konduktivita

ABSTRACT

This thesis deals with the influence of the structure of magnetorheological elastomers on their piezoresistivity. The theoretical part describes the types of composite materials, their distribution, used fillers and their key properties. It also focuses on the distribution, use and typical properties of magnetorheological materials and methods of piezoresistivity measurement. In the practical part suitable materials are selected from which magnetoreological composites with internal structure are prepared. So obtained composite samples are subjected to electrical conductivity measurements while being deformed in compression. In conclusion, the influence of composite structure and filler concentration on piezoresistivity of studied materials is discussed.

Keywords: composite materials, magnetorheological elastomers, piezoresistivity, percolation theory, percolation threshold, conductivity

Rád bych poděkoval Ing. Robertovi Moučkovi, Ph.D. za odborné vedení, cenné rady a vstřícnost při vypracovávání mé diplomové práce. Zároveň bych chtěl poděkovat Ing. Ericce Kutákové a Ing. Martinu Cvekovi, Ph.D. za odbornou pomoc při výrobě a měření vzorků k diplomové práci.

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

Ve Zlíně, 16. 5. 2019

.....

Podpis

OBSAH

ÚVOD.....	10
I TEORETICKÁ ČÁST.....	11
1 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY	12
1.1 ÚČEL POUŽITÍ KOMPOZITŮ V TECHNICE A PRŮMYSLU.....	12
1.1.1 Změna mechanických vlastností	12
1.1.2 Změna elektromagnetických vlastností.....	12
1.2 ROZDĚLENÍ KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ	13
1.2.1 Rozdělení podle geometrického tvaru a orientace výztuže.....	13
1.2.2 Rozdělení podle struktury	14
1.2.3 Rozdělení podle povahy matrice	14
1.3 POLYMERNÍ MATRICE	15
1.3.1 Termoplastová matrice.....	15
1.3.2 Reaktoplastová matrice	15
1.3.2.1 Elastomerní matrice	16
1.4 ČÁSTICOVÁ PLNIVA.....	18
1.4.1 Štíhlostní poměr	18
1.4.2 Stupeň plnění a distribuce plniva v matrici.....	19
2 MAGNETOREOLOGICKÉ MATERIÁLY	20
2.1 DĚLENÍMAGNETOREOLOGICKÝCHMATERIÁLŮ	20
2.2 POUŽITÍ MAGNETOREOLOGICKÝCHMATERIÁLŮ.....	20
2.3 DĚLENÍ MAGNETOREOLOGICKÝCH ELASTOMERŮ	21
2.3.1 Izotropní MRE	21
2.3.2 Anizotropní MRE.....	22
3 PERKOLAČNÍ TEORIE	23
4 PIEZOREZISTIVITA	27
II PRAKTICKÁ ČÁST	29
5 MATERIÁLY	30
5.1 PDMS - MATRICE.....	30
5.2 CI-SL.....	31
6 PŘÍPRAVA VZORKŮ.....	32
7 DVOUBODOVÁ METODA MĚŘENÍ ELEKTRICKÉ VODIVOSTI	35
8 VYHODNOCENÍ DISKUZE NAMĚŘENÝCH DAT	38

8.1	MORFOLOGIE MRE	38
8.2	VLIV KONCENTRACE PLNIVA NA ELEKTRICKOU VODIVOST ANIZOTROPNÍCH MRE	42
8.3	VLIV DEFORMACE	45
8.4	VLIV ORIENTACE PLNIVA.....	48
ZÁVĚR		50
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....		51
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....		55
SEZNAM OBRÁZKŮ		57
SEZNAM TABULEK.....		59

ÚVOD

Diplomová práce je zaměřena na speciální typ kompozitního materiálu, magnetoreologické elastomery (MRE). Tento kompozit se v posledních letech těší stále vyšší pozornosti díky širokému spektru aplikací. Často jsou tyto materiály také nazývány jako chytré nebo inteligentní. Nejen, že jejich mechanické vlastnosti mohou být ovládány vnějším magnetickým polem, ale při použití správného typu plniva mohou mít materiály zcela nové kombinace fyzikálních vlastností.

Jako běžné materiály jsou i magnetoreologické elastomery tvořeny maticí a plnivem. Jako matrice se používá převážně termoplastický nebo síťovaný elastomer s vysokou elasticitou. Ke změně mechanických vlastností, snížení hmotnosti nebo ceny se využívá vhodných plniv. V případě magnetoreologických elastomerů je nutno použít plnivo s vhodnými magnetickými vlastnostmi, tak aby plnivo reagovalo na podnět vyvolaný vnějším magnetickým polem. Reakce může vyvolat změnu tuhosti či být použita pro vytvoření organizované vnitřní struktury kompozitu, čímž lze získat při minimální koncentraci plniva jinak nedosažitelných vlastností (např. elektrická vodivost).

Magnetoreologické elastomery nacházejí uplatnění v mnoha oblastech, mimo jiné ve formě izolace a tlumení vibrací, ale díky získané vodivosti jsou důležitou oblastí využití i piezorezistivní systémy, které se často využívají např. pro tlakové senzory.

Cílem diplomové práce je vyhodnotit vliv struktury (tj. orientace, hmotnostní podíl plniva, typ matrice) v piezorezistivním systému na bázi magnetoreologických elastomerů na výsledné elektrické vlastnosti.

Teoretická část se věnuje rozdělení kompozitů a dále bližšímu popisu plniv a matic. Nezanedbatelná část se rovněž zabývá MRE, piezorezistivitou a perkolační teorií, jakožto nástroji pro exaktní popis jevů zkoumaných v praktické části.

V té byly připraveny vzorky MRE se dvěma maticemi o různém stupni plnění s izotropní a anizotropní vnitřní strukturou, kdy anizotropie byla dosažena účinkem magnetického pole. Připravené vzorky byly posléze otestovány na trhacím stroji pomocí dvoubodové měřicí metody. Následně byly naměřené hodnoty převedeny do grafické podoby vyhodnoceny a diskutovány. Vyhodnocení bylo zaměřeno na volt-ampérové charakteristiky a piezorezistivitu testovaných systémů tj. vliv deformace na elektrickou vodivost. Na závěr byly zhodnoceny získané výsledky.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY

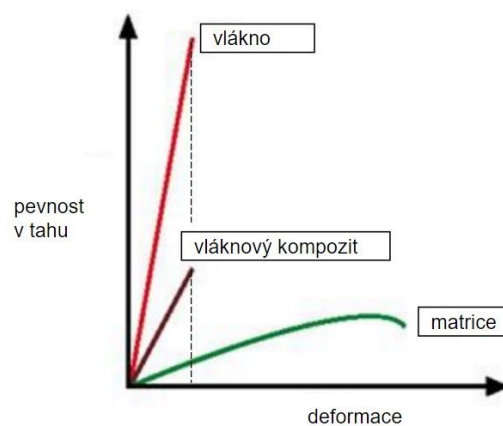
Slovo „kompozitní“ znamená „vytvořený či skládající se ze dvou nebo více odlišných částí“. Materiál mající dvě nebo více odlišných materiálových složek neboli fází je podle toho tedy složeným materiálem. Avšak jen tehdy, když mají vytvářející fáze značně rozdílné fyzikální vlastnosti a tudíž i vlastnosti složeného materiálu jsou zřetelně odlišné od vlastností jeho složek, označujeme takový materiál jako kompozit [1].

Označení některých materiálů jako kompozitů se často zdůvodňuje tak, že změny charakteristických vlastností jsou zapříčiněny kombinací složek. Tyto změny vlastností budou zvláště patrné, bude-li jedna z fází v destičkové nebo vláknenné formě a objemový podíl jedné ze složek větší než 10% a její vlastnosti mnohem výraznější (tj. ≥ 5 krát) než druhé [1].

1.1 Účel použití kompozitů v technice a průmyslu

1.1.1 Změna mechanických vlastností

Zejména díky vysokému poměru pevnosti a tuhosti k hustotě a odlišným pevnostním charakteristikám v různých směrech tj. anizotropii se kompozitní materiály využívají za účelem zvýšení mechanických vlastností (Obr. 1).



Obr. 1 Tahový diagram [2]

1.1.2 Změna elektromagnetických vlastností

Zejména u plastů, které jsou izolanty, je cílem změna elektromagnetických vlastností. Toho docílíme vytvořením částicového kompozitu, který bude obsahovat polymerní matici a

plnivo s požadovanými elektromagnetickými vlastnostmi v dostatečné koncentraci (viz. 3 PERKOLAČNÍ TEORIE).

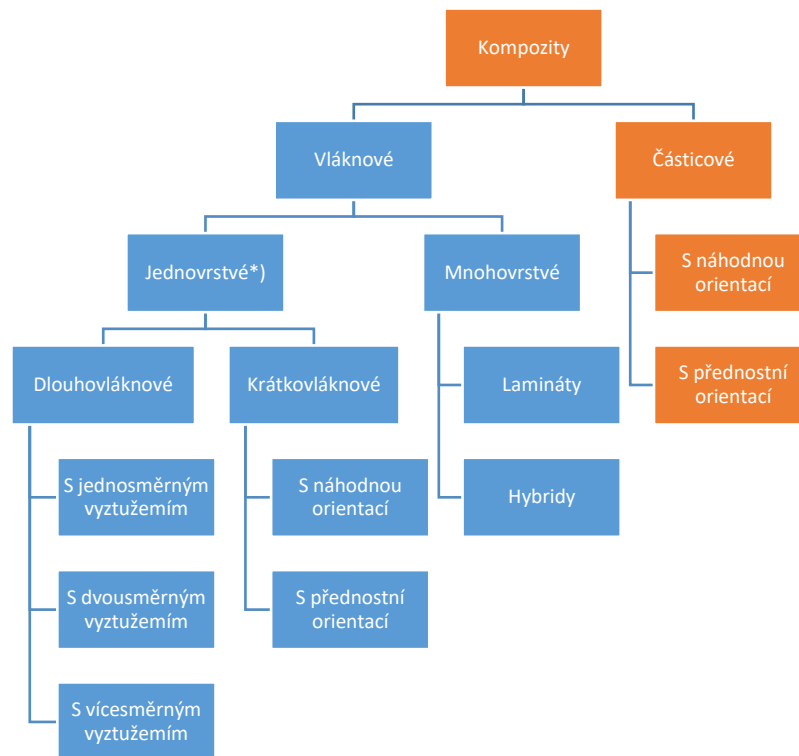
1.2 Rozdělení kompozitních materiálů

Kompozitní materiály můžeme dělit podle mnoha kritérií. Mezi nejpoužívanější dělení patří:

- podle povahy výztuže
- podle struktury
- podle povahy matrice [2]

1.2.1 Rozdělení podle geometrického tvaru a orientace výztuže

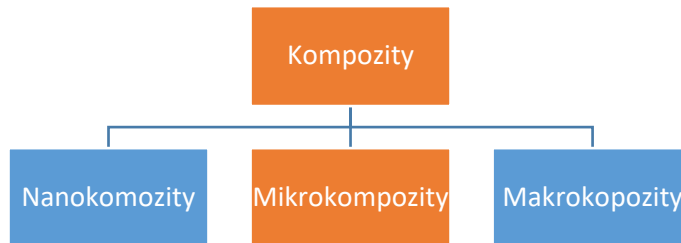
Kompozitní materiály můžeme dle geometrického tvaru a orientace výztuže dělit dle následujícího schématu (Obr. 2).



Obr. 2 Rozdělení podle výztuže [3]

1.2.2 Rozdělení podle struktury

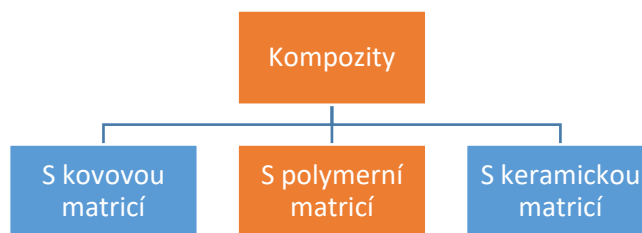
Kompozitní materiály můžeme dle struktury dělit dle následujícího schématu (Obr. 3).



Obr. 3 Rozdělení podle struktury [3]

1.2.3 Rozdělení podle povahy matrice

Kompozitní materiály můžeme dle typu matrice dělit dle následujícího schématu (Obr. 4).



Obr. 4 Rozdělení kompozitů podle matrice [3]

Kompozity **s kovovou maticí** (z angl. metal matrix composites – MMCs) – jsou známe především tvárností a houževnatostí. Nejvýznamnějšími zástupci jsou lehké slitiny hliníku, hořčíku a titanu. Pro velmi vysoké teploty jsou vyráběny kompozity s maticemi z niklových slitin a pro elektrotechnické účely kompozity s měděnými případně se stříbrnými maticemi [2].

Kompozity **s polymerní maticí** (polymer matrix composites – PMCs) – mají nízkou hustotu, a proto je jednou z hlavních oblastí jejich využití konstrukce letadel. Částečnou nevýhodou je nízká tepelná stabilita polymerů. Tyto nejvýznamnější kompozity mají matrice z reaktoplastů (polyesterové, epoxidové pryskyřice) [2].

Kompozity **s keramickou maticí** (ceramic matrix composites – CMCs) - jsou materiály lehké a většinou velmi tvrdé, avšak poměrně křehké. Kompozity s keramickými maticemi

patří mezi vysokoteplotní materiály. Keramické matrice mohou být oxidické povahy (Al_2O_3 , ZrO_2 , oxidická skla atd.) i neoxidické povahy (SiC , Si_3N_4 , C atd.) [2].

1.3 Polymerní matrice

Polymerní matrice plní hlavně funkci pojiva a ochrany plniv. Vyznačuje se vyšší poddajností a houževnatostí oproti ostatním typům matric. Obecně je lze rozlišovat jako termoplast, nebo reaktoplast [2].

1.3.1 Termoplastová matrice

Termoplastické materiály jsou již zcela zpolymerované. Jejich viskozita, i když je převedeme do taveniny, je značně vysoká. Obecně je mnohem vyšší, než u většiny pryskyřic [4].

Složení termoplastů se liší od termosetů. U termosetů závisí tuhost materiálu na zesíťování mnoha malých molekul, u termoplastů je výsledná pevnost dána délkou řetězců. V důsledku toho mají termoplasty určité výhody:

- dlouhá doba skladovatelnosti bez výrazné změny vlastností
- krátká doba zpracování, řádově otázka minut (oproti až hodinám u termosetů)
- vyšší tažnost a lomová houževnatost
- možnost recyklace

Existuje velké množství termoplastů používaných pro kompozity, lze je rozdělit do dvou základních kategorií [4].

První skupinu tvoří termoplasty běžně používané v průmyslu. Jsou to např. polyetylen (PE), polypropylen (PP), polyvinylchlorid (PVC), polystyren (PS), polymethylmetakrylát (PMMA), polyakrylonitrilbutadienstyren (ABS) [4].

Druhá skupina je pak tvořena vysoce odolnými termoplasty, které byly vyvinuty pro pokročilé aplikace. Jako příklad lze uvést polyéteréterketon (PEEK) nebo termoplastický polyamid [4].

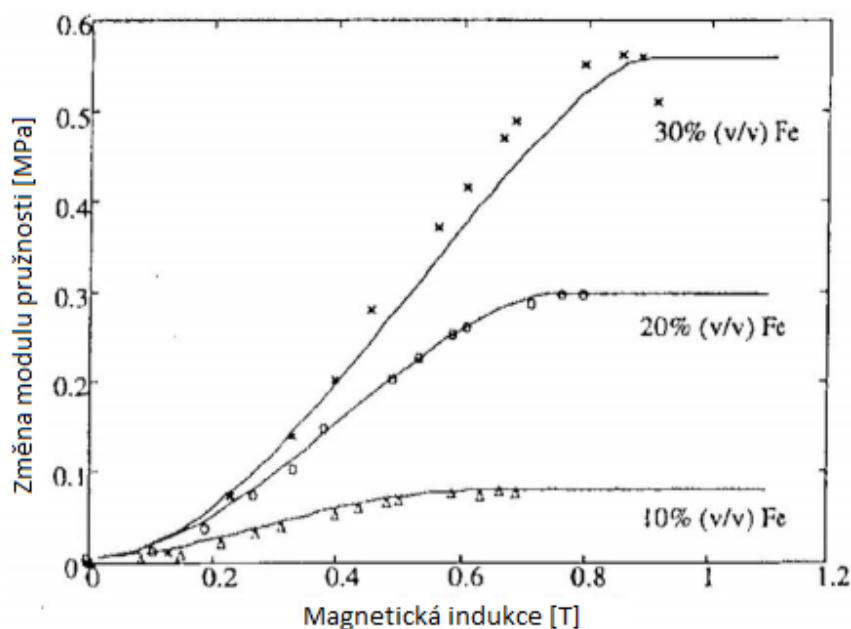
1.3.2 Reaktoplastová matrice

Jedním z hlavních důvodů pro použití reaktoplastů jako matrice namísto termoplastů je jejich mnohem nižší viskozita. To přináší výhody v kombinaci s dlouhými a spojitými vlákny a u strukturních kompozitů s vysokou pevností a modulem. Termosetové polymery

jsou připravovány pomocí chemické reakce jednoho či více kapalných pre-polymerů, za přítomnosti katalyzátoru nebo tvrdidla. Kapalné pre-polymery jsou pomocí tzv. zesítní nebo vytvrzení převedeny na pevný polymer. Termosetové polymery vykazují ve vytvrzeném stavu oproti většině běžných termoplastů vyšší chemickou i tepelnou odolnost a menší kríp. Při využití reaktoplastů jako matrice existuje však i několik omezení. Jednak je doba vytvrzení závislá na použitém vytvrzovacím systému a pracovní teplotě, může tak být několik minut až několik hodin. To je čas podstatně delší, než pro zpracování termoplastů. Dalším omezením je, že reaktoplasty nemohou být znovu převedeny do tekutého stavu, což znemožňuje jejich znovupoužití či recyklaci [4].

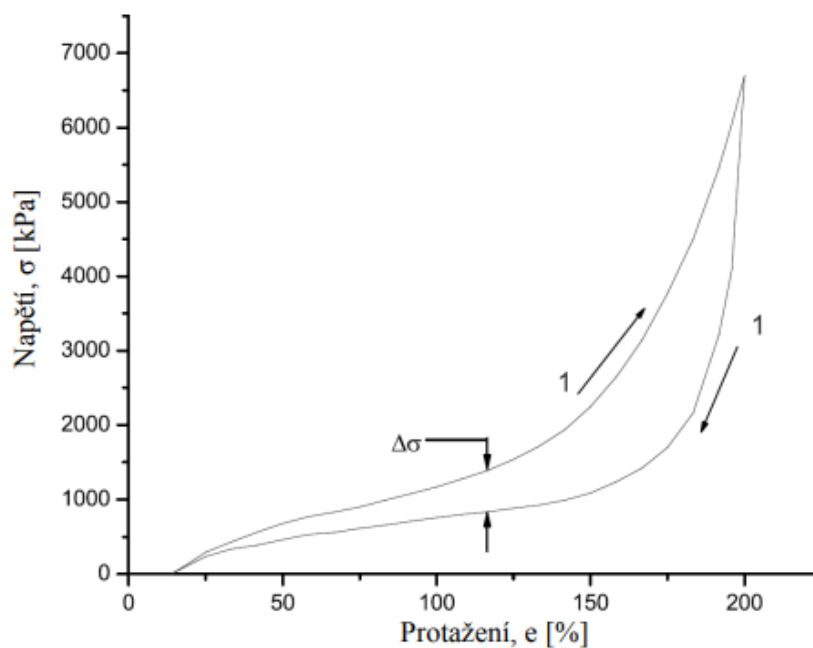
1.3.2.1 Elastomerní matrice

Polymery vzniklé zesíťováním kaučuků nazýváme elastomery. Jejich teplota skelného přechodu (T_g) je hluboko pod teplotou, při které je běžně používáme. Nad T_g vykazují při namáhání velké deformace, aniž by došlo k jejich porušení. V oblasti malých deformací vykazují modul pružnosti v tahu v rozmezí 10 až 100 MPa. Tyto matrice s kovovým plnivem mohou měnit svůj modul pružnosti v závislosti na intenzitě magnetického toku, který na ně působí (Obr. 5). Deformace jsou vratné [4].



Obr. 5 Závislost modulu pružnosti na magnetickém toku [5]

Na Obr. 6 je typická tahová křivka elastomeru, kdy bylo měřeno napětí i při návratu zkušebního zařízení do výchozí polohy. Rozdíl v napětí, označený $\Delta\sigma$, je hystereze. Ta je způsobena vnitřním třením, její velikost je závislá na druhu elastomeru. Minimální je u nevytluženého přírodního kaučuku a vyšší pak ve většině ostatních elastomerů. Zvyšuje se s množstvím plniva a s rychlostí deformace. Na tahové křivce je také patrný kríp, kdy křivka začíná nad nulovou hodnotou protažení a křivka smrštění opět končí nad nulovou hodnotou protažení [4].



Obr. 6 Tahové prodloužení a smrštění elastomeru vykazující hysterezi [4]

Oproti kompozitům s reaktoplastovou maticí vykazují kompozity s elastomerní maticí vyšší rázovou houževnatost a dokáží lépe pohltit dopadovou energii. Toho se využívá při konstrukci a optimalizaci kompozitních dílů odolných proti nárazu [4].

Jejich elasticita je klíčová vlastnost pro piezorezistivní systémy, které se využívají například jako tlaková čidla. Tento systém mění svoji vodivost v závislosti na stlačení bez trvalých deformací.

1.4 Částicová plniva

Polymerní materiály jsou obecně široce využívány pro jejich snadnou modifikaci při výrobě složitých dílů. Jejich předností jsou také mechanické či fyzikální vlastnosti, jako např. rázová houževnatost, nízká měrná hmotnost a jiné. Nicméně jejich izolační vlastnosti jsou nevýhodou, pokud požadujeme zvýšenou tepelnou nebo elektrickou vodivost. Pro překonání tohoto nedostatku, lze do polymeru začlenit elektricky vodivé částice. Ve skutečnosti je elektrická vodivost kovových částic o 8 až 10 řádů vyšší, než u ostatních plniv, kromě uhlíkových vláken. Rozdíl v tepelné vodivosti je menší, pouze 2 až 3 řády. Konečné vlastnosti polymerních kompozitů s kovovými částicovými plnivy budou záviset na koncentraci, velikosti a tvaru plniva, mikrostruktura kompozitu, procesních podmínkách a na podmínkách fázového rozhraní. Velmi častá výzva je vyrobit co nejvíce elektricky a tepelně vodivý kompozit při současné minimalizaci negativních dopadů na mechanické vlastnosti, hustotu, nebo cenu. V obecnějším porovnání jsou kovem plněné kompozity ve srovnání s kovy levnější a lehčí, mají lepší odolnost vůči korozi a obvykle snadnější proces výroby. Kromě toho může být lépe navržena hustota, koeficient objemové roztažnosti a další vlastnosti tak, aby lépe vyhovovaly požadavkům zákazníka a dané aplikaci. Je však velice obtížné změnit jedinou vlastnost, aniž by měla vliv na vlastnosti jiné. Proto je velmi často nutné nalézt mezi požadavky vzájemný kompromis. Kovové částice se prakticky nepoužívají pro zpevnění kompozitu, ale výhradně pro zvýšení elektrické a tepelné vodivosti. Z tohoto důvodu existuje mnoho aplikací kovem plněných polymerů: vedení tepla [35], elektromagnetické stínění [36], mikrovlnné absorbery, magnety, antistatické vybavení, magnetický záznam, elektrické topení, termistor nebo chemický senzor [37]. Aplikace vedení tepla jsou především v elektronickém, elektrotechnickém nebo automobilovém průmyslu (kryty elektrozařízení, termoplastické hadice pro cirkulaci horkého vzduchu, výměníky tepla, autobaterie atd.) [1, 29].

1.4.1 Štíhlostní poměr

U výztuží definujeme štíhlostní poměr jako podíl největšího a nejmenšího rozměru neboli l/d . Získáváme tak číslo, pomocí kterého, můžeme snadno rozdělit plniva podle velikosti a tvaru. Důležitou hodnotou pro základní rozdělení je štíhlostní poměr $l/d = 10$. Výztuže, které mají štíhlostní poměr větší než 10, se nazývají vláknové. Naopak částicové plniva se vyznačují štíhlostním poměrem menším než 10.

Dále se pak částicové plniva dělí na:

- izometrické (tvar koule nebo elipsoidu): $l/d = 1$
- anizometrické (tvar destiček nebo jehlic): $l/d > 1$

Na tvaru částice závisí modul i elektrická vodivost kompozitu (kulové částice < destičkové částice < skelná vlákna), z toho vyplývá, že zpevnění i elektrická vodivost rostou se zvyšující se anizotropií částic při nižší koncentraci plniva [30].

1.4.2 Stupeň plnění a distribuce plniva v matrici

Stupeň plnění neboli koncentrace plniva (objemová je z hlediska vlastností relevantnější než hmotnostní) má rozhodující vliv na vlastnosti kompozitu, ať už se jedná o mechanické vlastnosti (pevnost, modul pružnosti), magnetoreologický efekt či transportní (např. elektrické) vlastnosti. Zatímco se stupněm plnění typicky rostou transportní vlastnosti (el. a tepelná vodivost) kompozitu, mechanické vlastnosti procházejí maximem dříve a následuje jejich zhoršení, tudíž je nutno volit kompromis mezi těmito dvěma efekty [31].

Kromě stupně plnění je klíčová i jeho distribuce v objemu matrice zejména pak na transportní vlastnosti kompozitního systému. Zatímco rovnoměrné (izotropní) distribuce se při účinném míchání dosáhne vlivem nahodilé povahy procesu, pro kompozit s anizotropní distribucí plniva je třeba použít stacionární pole (např. magnetické v případě železných částic), které zapříčiní přeskupení/orientaci částic v přednostním směru. Účinek homogenního magnetického pole při výrobě MRE docílíme anizotropního uspořádání magnetického plniva v matrici do shluků/klastrů ve směru mag. pole. Tím zajistíme např. významný MR efekt či kvalitativní změnu transportních veličin při několikanásobně nižším stupni plnění. Při čemž nedochází k výraznější změně modulu pružnosti. Čím zvolíme matrici s nižší viskozitou, tím snadněji dochází k vytváření tzv. řetízků z plniva vlivem magnetického pole a téměř dokonalé dispergaci plniva v matrici bez tvorby agregátů. Tím může být stupeň plnění tak nízký [31].

2 MAGNETOREOLOGICKÉ MATERIÁLY

Je to třída inteligentních materiálů, u kterých je možné jejich reologické vlastnosti i reverzibilně řídit pomocí magnetického pole. Magnetoreologické (dále jen MR) materiály se typicky skládají z magnetických částic o velikosti mikronů suspendovaných v nemagnetické matici [5]. Magnetické interakce mezi částicemi v těchto kompozitech závisí na magnetických vlastnostech jednotlivých částic a jejich prostorových vztahů spojením magnetických a deformačních polí v těchto materiálech [6-14].

2.1 Dělení magnetoreologických materiálů

MR materiály dělíme zejména na:

1. **MR kapaliny**- magnetické částice, jako jsou železné nebo částice karbonylu železa a jsou suspendovány v kapalně nosné tekutině [5].
2. **MR pěny** – zde je tekutina obsažena v absorbentu matrice nebo jsou magnetické částice rozptýleny v pěnové matici. Tyto materiály mají v pevném stavu velmi nízkým vnitřní modul [5].
3. **MR elastomery** (dále jen MRE) - jsou kompozity, kde jsou magnetické částice uloženy v nemagnetické pevné nebo gelovité matici. Částice uvnitř elastomeru mohou být homogenně distribuované nebo mohou být seskupeny (například do řetězových struktur) [6-14].

2.2 Použití magnetoreologických materiálů

Ačkoli MR materiály mají mnoho analogických mechanických chování, MRE jsou svými jedinečnými mechanickými vlastnostmi odlišné od jiných materiálů. Jejich modul je závislý na magnetickém poli, zatímco MR kapaliny a MR pěny mají závislé na magnetickém poli napětí. Tímto se ale obě skupiny materiálů spíše doplňují, než vylučují [5].

Rozdílnost v mechanickém chování MR materiálů způsobila, že se liší jejich oblast použití. MR tekutiny jsou široce používány k vývoji poloaktivních tlumicích zařízení, jako jsou tlumiče, spojky a brzdy [5].

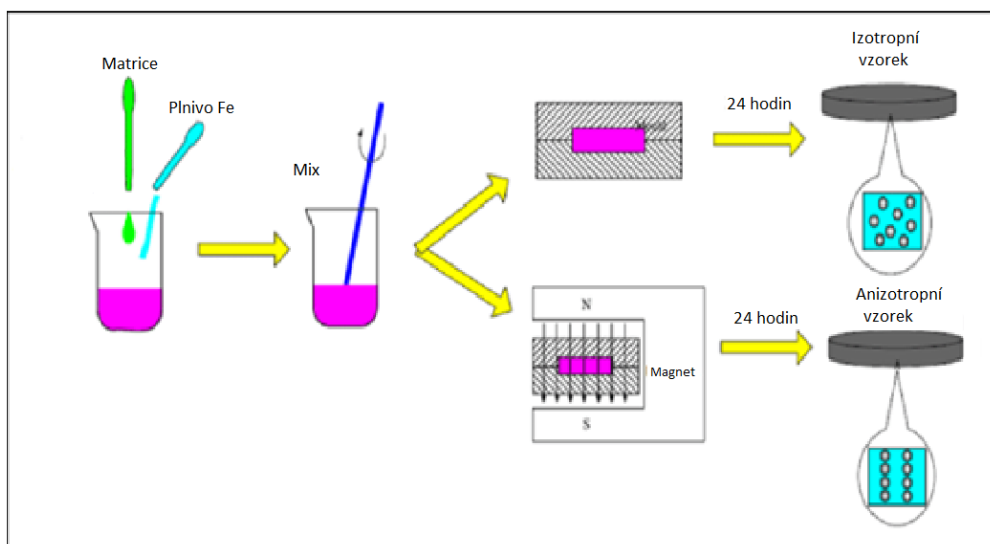
MRE našly aplikace třeba ve vývoji adaptivně laděném tlumiči vibrací. Navíc mají další zřejmé výhody jako například, že částice v MRE nejsou schopné se časem usazovat, a proto není nutné udržovat MR materiál na svém místě. Doba odezvy MRE je velmi krátká

(několik milisekund), protože částice jsou uzamčené v matrici a nemají možnost se přesunout, zatímco na MRE působí externí magnetické pole. Všechny tyto vlastnosti způsobily, že MRE mají obrovský tržní potenciál [15-19].

Použitím el. vodivých plniv v MR systému v dostatečném množství docílíme el. vodivosti celého elastomeru. Ten dodá systému elasticitu. Kombinace těchto vlastností je velmi zajímavá, jelikož takový elastomer mění při deformaci svůj odpor bez trvalých deformací (tzv. piezorezistivní systémy na bázi anizotropních MRE). Toho se hojně využívá pro tlakové senzory.

2.3 Dělení magnetoreologických elastomerů

MRE dělíme podle struktury (typu výroby) na izotropní a anizotropní. Výroba těchto dvou druhů MRE závisí na tom, zda je použito vnější magnetické pole nebo nikoliv (Obr. 7).

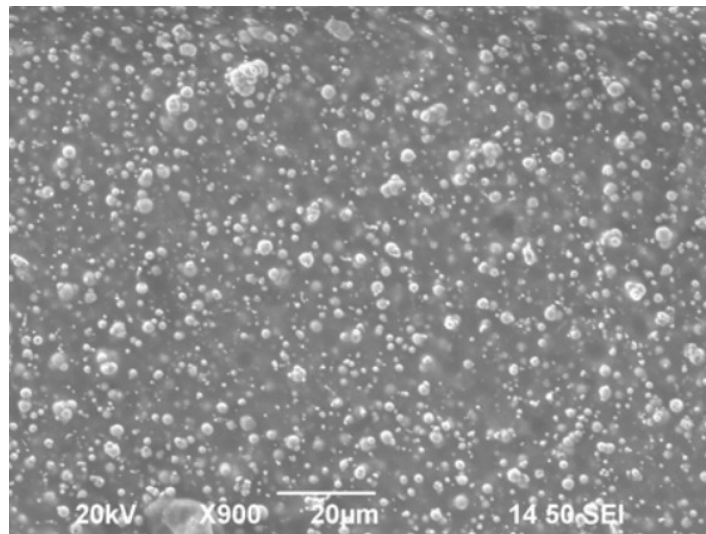


Obr. 7 Schéma výrobních metod

2.3.1 Izotropní MRE

Izotropní MRE je druh nestrukturovaných magnetických elastomerů. Během vytvrzování nebylo na směs aplikováno žádné vnější magnetické pole a částice netvoří řetězy nebo sloupcové struktury (Obr. 8). Proto je nestrukturovaný MRE označován jako izotropní.

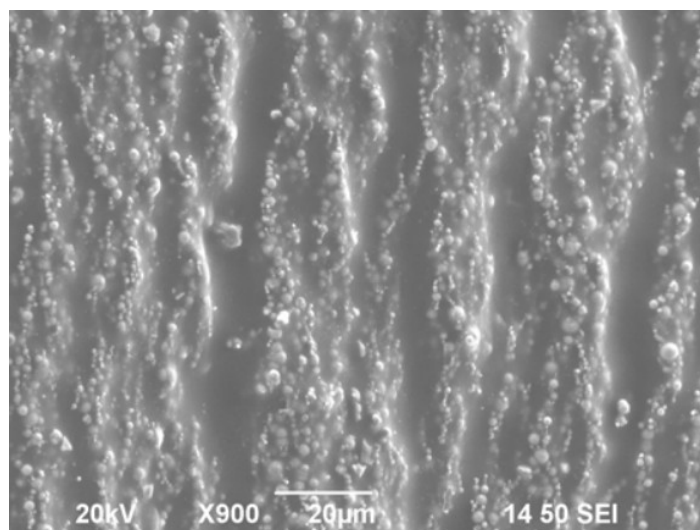
Vytvrzení bez magnetického pole může výrazně zjednodušit proces výroby, což je a významná výhoda pro výrobu ve velkých množstvích v průmyslu [13, 14, 20, 21].



Obr. 8 *Struktura izotropního MRE* [20]

2.3.2 Anizotropní MRE

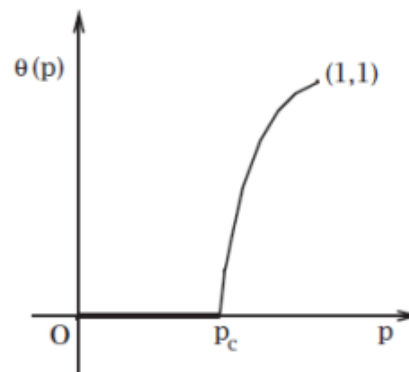
Anizotropní MRE je druh předstrukturovaného magnetického elastomeru. Během vytvrzování je vnější magnetické pole aplikované na směs elastomerní matrice a magnetických částic. Před vytvrzením matrice nepůsobí magnetické pole na částice a ty se v kapalině mohou volně pohybovat. Pak se směs vystaví magnetickému poli a magnetické částice železa se vyrovnají v jeho směru, čímž se vytvoří řetězová nebo sloupková struktura (Obr. 9). Po vytvrzení tyto struktury zůstanou uzamčeny v matrici. Přestrukturovaný MRE se označuje jako anizotropní, jelikož má ve směru působení mag. pole (a výsledné orientace řetízků) diametrálně odlišné vlastnosti od směrů ostatních [13, 14, 20, 21].



Obr. 9 *Struktura anizotropního MRE* [20]

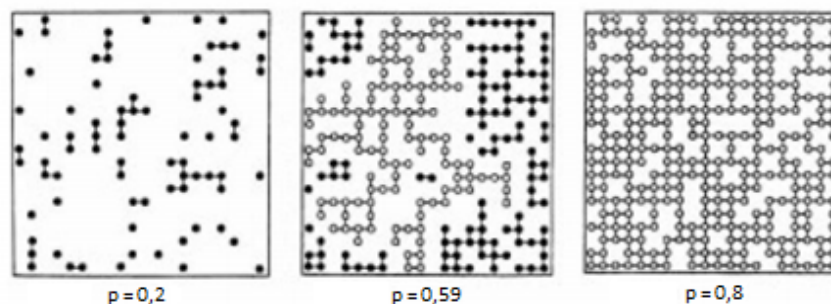
3 PERKOLAČNÍ TEORIE

Perkolační teorie je pravděpodobnostní matematický model, který se zabývá kvalitativní změnou transportních vlastností (kompozitního) systému v závislosti na hodnotě parametru (p) majícího vztah k plnění/konektivitě tohoto systému. Kritická hodnota tohoto parametru se nazývá perkolační práh a značí se p_c . Na Obr. 10 je znázorněn typický perkolační graf, kdy do dosažení hodnoty perkolačního prahu p_c nedochází téměř k žádné změně transportní veličiny θ a naopak ihned po jejím dosažení k jejímu skokovému (řádovému) nárůstu označovaném jako perkolaci. Další nárůst s parametrem p je už pozvolnější [23].



Obr. 10 Charakteristický tvar perkolační závislosti [23]

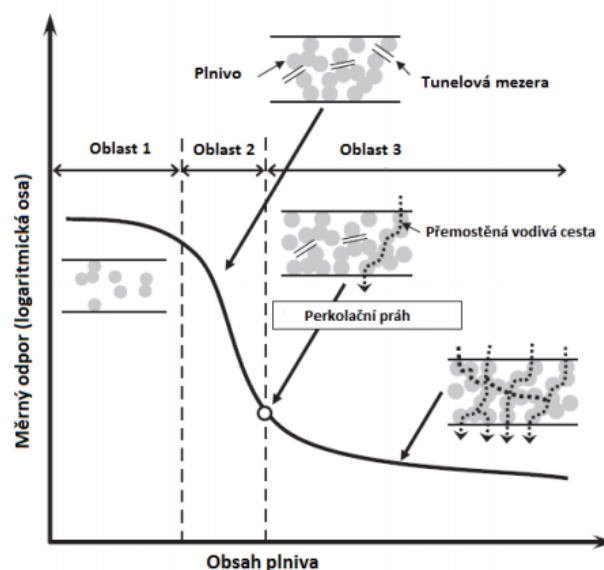
Perkolační teorii lze aplikovat v nejrůznějších oborech od šíření lesních požárů, přes distribuci pórů v pěnách až právě pro popis elektrické vodivosti kompozitních materiálů. Jeden z možných příkladů je 2D perkolace (Obr. 11).



Obr. 11 Obsazení čtvercové mřížky pro různé hodnoty pravděpodobnosti obsazení pole [26]

Jednou z praktických aplikací perkolační teorie je změna el. vodivosti (transportní veličina) kompozitních materiálů s objemovým plněním φ (kritický parametr p charakterizující konektivitu systémů)(viz Obr. 12). Prázdné body objevující se s pravděpodobností $1 - p$ znázorňují izolant, zatímco obsazené místa mřížky s pravděpodobností p představují částice elektricky vodivého plniva. Elektrický proud může protékat pouze mezi vodivými místy, která jsou v kontaktu. Při malých koncentracích p se celý systém chová jako izolant, protože je málo zaplněných míst, případně se tvoří malé skupiny (ostrůvky) propojených bodů, které ale jsou izolovány a nejsou dostatečné k propojení protilehlých stran a tedy jejich vodivému spojení a vytvářejí konečnou skupinu. Naproti tomu při vysokých koncentracích p vzniká mnoho „nekonečných“ klastrů napříč objemem kompozitu a systém se chová jako vodič [26].

Toto platí pro nízké a vysoké koncentrace. Pro koncentrace mezi nimi musí platit, že existuje taková koncentrace, označovaná jako perkolační práh (případně kritická koncentrace pokud dochází k oddělení dvou různých fází), při které dojde k prvnímu elektricky vodivému propojení stran (první „nekonečný“ klastř). Pod touto hodnotou je systém izolantem a nad ní vodičem [26]. U většiny polymerních materiálů z nich získáme vodivé přidáním vodivého plniva a tedy vytvořením kompozitu. Pokud zvyšujeme podíl vodivého plniva, tak pravděpodobnost propojení částic a vzniku vodivého spojení vzrůstá až do kritického objemového plnění φ_c tj. dosažení perkolačního prahu.



Obr. 12 Perkolační křivka pro závislost měrného odporu na obsahu plniva

Kritický objemový zlomek udává kritický objem plniva, při kterém dojde k vodivému spojení stran. Vodivost kompozitu nezávisí pouze na objemu vodivého plniva, ale i na štíhlostním poměru částic, jejich velikosti, tvaru a poměru stran, kterými je možné ovlivnit perkolační práh. Díky tomu lze dosáhnout vysokých hodnot vodivosti při malém množství plniva, protože například při použití částic s větším štíhlostním poměrem se snižuje perkolační práh. Elektrickou vodivost nad perkolačním prahem lze popsat vztahem (1),

$$\sigma = \sigma_0 (V - V_c)^S \quad (1)$$

kde σ_0 značí vodivost plniva, V je obj. podíl plniva, V_c je kritický (perkolační) obj. podíl plniva, při kterém dojde k dosažení perkolačního prahu a velikost exponentu s , je závislá na počtu dimenzí mřížky [27]. Tento vztah patří mezi statistické perkolační modely, které jsou jedny ze čtyř hlavních vodivostních modelů spolu s termodynamickým, geometrických a strukturně orientovaným.

Statistické obvykle předpokládají pravděpodobnost kontaktu částic uvnitř kompozitu a vztah 1 není úplně přesný. Následovalo tedy zpřesnění, při kterém se využilo tohoto modelu. Jedním z nově vytvořených modelů, které zachovaly stejnou formu, je model, který navrhl McLachlan:

$$\frac{(1-V)\left(\rho_m^{\frac{1}{t}} - \rho_h^{\frac{1}{t}}\right)}{\rho_m^{\frac{1}{t}} + \left(\frac{1-V_c}{V_c}\right)\rho_h^{\frac{1}{t}}} + \frac{V\left(\rho_m^{\frac{1}{t}} - \rho_l^{\frac{1}{t}}\right)}{\rho_m^{\frac{1}{t}} + \left(\frac{1-V_c}{V_c}\right)\rho_l^{\frac{1}{t}}} = 0 \quad (2)$$

kde opět V značí objemovou koncentraci plniva, V_c perkolační práh, ρ_h měrný odpor plniva, ρ_l měrný odpor polymeru a t je kritický exponent.

Dalším modelem je termodynamický, který se zabývá interakcí mezi polymerní maticí a materiálem plniva, především povrchovým napětím a energií složek. V tomto modelu došlo ke studiu vodivosti v závislosti na objemové koncentraci plniva pro různé polymery takovým způsobem, aby bylo možno zhodnotit vliv ostatních faktorů, jako například povrchové energie plniva a matrice nebo viskozity taveniny na vodivost a díky tomu se došlo k modelu, který zahrnuje závislost perkolace na interakci plniva a matrice spolu s velikostí a množstvím plniva.

Geometrický model byl původně určen pro odvození vodivosti slinutých materiálů z vodivých a nevodivých prášků. Nejznámější model patřící do této skupiny byl vytvořen jako dvě rovnice, pro různé objemové koncentrace. První byla pro výpočet perkolačního prahu a

druhá pro konec nárůstu vodivosti, ale tyto rovnice se později experimentálně prokázaly jako nepřesné pro určení objemové koncentrace.

Až McLachlan představil model předpovídající vodivost pro široký rozsah systémů, který je přesný a platí pro všechny objemové koncentrace, když bere vodivost směsi jako funkci vodivosti, objemových množství a parametrů závislých na velikosti a tvaru částic.

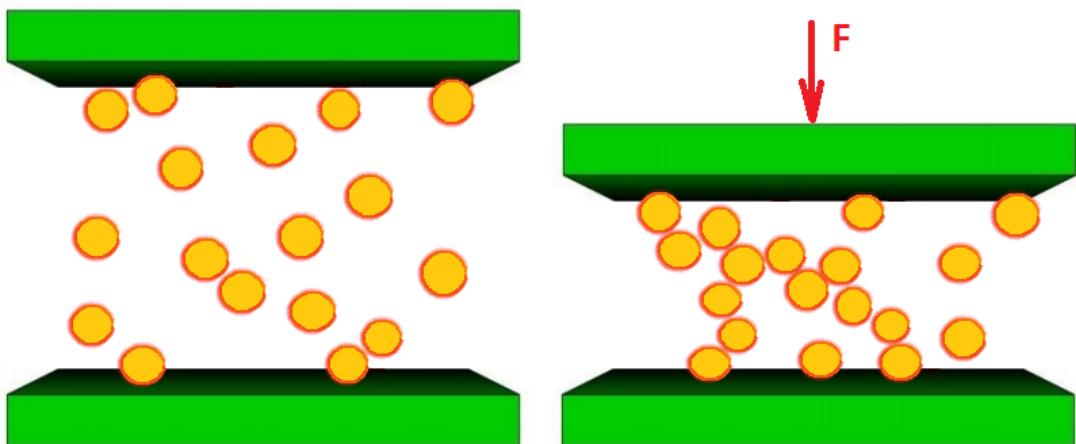
Posledním je strukturně orientovaný model zaměřený na koncový kompozit, protože díky různým technikám zpracování se může finální produkt velmi lišit, což má za následek odlišné vodivosti a perkolační koncentrace [28].

4 PIEZOREZISTIVITA

Piezorezistivita je elektrická charakteristika některých materiálů, která může být popsána jako změna odporu v reakci na mechanické namáhání (deformaci). Piezorezistivní efekt popisuje změnu elektrického odporu, ke kterému dochází, když na polovodič působí vnější síla. Tato změna ovlivňuje pouze elektrický odpor materiálu. Na rozdíl od piezoelektrického efektu nemůže být použita ke generování napětí napříč zařízením.

Působící silou vyvolané napětí ovlivňuje pásovou (angl. band) strukturu materiálu, což usnadňuje nebo ztěžuje elektronům přesun do vodivostního pásu. V důsledku toho se změní hustota proudových nosičů a změní se odpor materiálu.

V našem případě se ovšem pohybujeme v několikanásobně vyšší úrovni. Neuvažujeme o změně pásové struktury, jelikož máme kovy, které mají vodivostní pás zaplněný, tj. jsou vodivé od počátku. Jen je potřeba dostat je do fyzického kontaktu v matici napříč tloušťkou vzorku (Obr. 13).

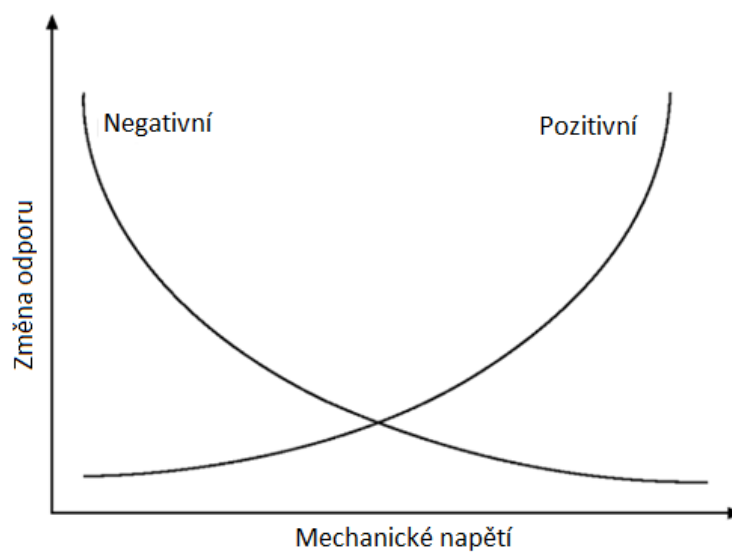


Obr. 13 Schéma piezorezistivního mechanismu

Obecně můžeme rozdělit piezorezistivitu na pozitivní a negativní.

Pozitivní piezorezistivita se týká změny elektrického odporu odpovídající změně napětí, jak je znázorněno na Obr. 14. Například při zvýšení mechanického namáhání, změna elektrického odporu se odpovídajícím způsobem zvyšuje.

Negativní piezorezistivita označuje opačný trend pozitivní piezorezistivity.



Obr. 14 Schéma pozitivního a negativního piezorezistivního chování [23]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

5 MATERIÁLY

V praktické části diplomové práce byla pro výrobu kompozitních vzorků použita elastomerní matrice SYLGARD 184. Jako částicové vodivé plnivo byly použity kulovité částice (karbonylu) železa od firmy BASF.

5.1 PDMS - matrice

Jedná se o silikonový elastomer pod obchodním názvem SYLGARD 184 od výrobce Dow Corning. Z hlediska chemického složení se jedná o polydimetylsiloxan. Jedná se o dvoukomponentní systém, s tvrdidlem se mísí v poměru 10:1.

Mezi základní přednosti PDMS patří:

- nízká viskozita
- možnost vytvrzování při pokojové i zvýšené teplotě
- dobré dielektrické vlastnosti
- rychlý, univerzální způsob zpracování kontrolovatelný teplotou
- vysoká transparentnost

Praktické aplikace PDMS:

- zapouzdření LED osvětlení
- zdroje
- konektory
- snímače
- relé
- obal rezistorů pro vysoké napětí
- adhesivum/enkapsulant pro solární články [35]

Elastomer PDMS je často využíván také pro měkké litografické replikace mikrostruktur v mikroskopických a mikro-inženýrských aplikacích. Vyznačuje se vysokou pružností, čehož se využívá pro výrobu mikrofluidních systémů a pro použití v mikro elektromechanických systémech (MEMS). Hlavními výhodami systémů na bázi PDMS je nízká cena, rychlá, jednoduchá výroba a optická transparentnost přes viditelné spektrum až do 240 nm. Má však také určitá omezení, především je to špatná chemická kompatibilita, kdy ve styku s organickými rozpouštědly dochází k bobtnání. Další nevýhodou je nízká tvrdost, což brání použití k vysokotlakým aplikacím [36].

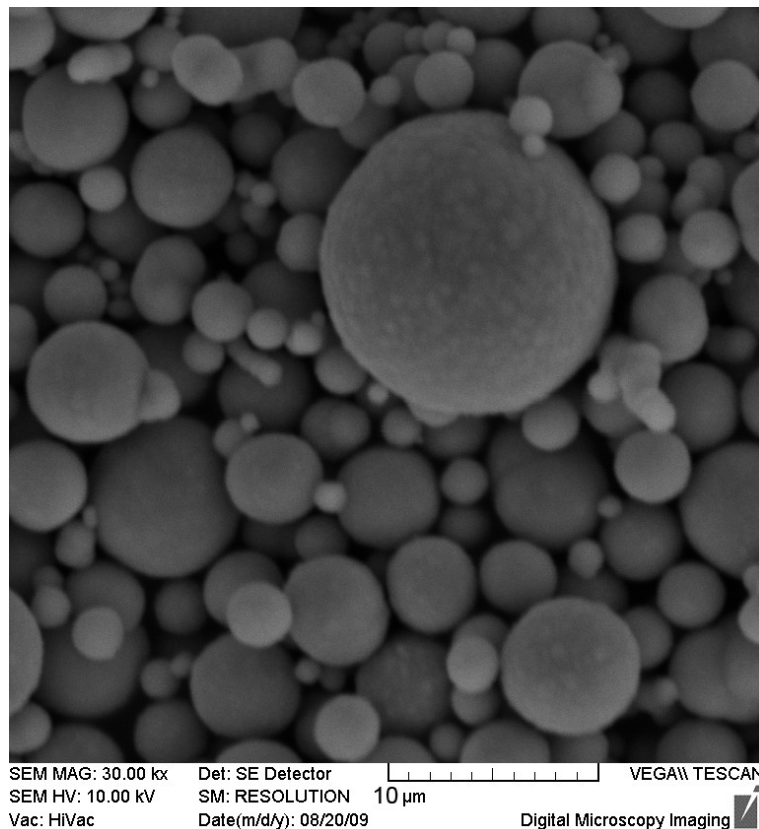
5.2 CI-SL

Jedná se o částice karbonylového železa s označením SL-GRADE od výrobce BASF. Distribuce částic je d_{90} (90 % částic je menších) = 9 μm .

Tyto částice se mají chem. složení:

obsah Fe 99,5 %, obsah C max. 0,03 %, obsah N max. 0,01 %, obsah O max. 0,1 – 0,25 %.

Tvar je kulovitý, povrch není modifikovaný [37].



Obr. 15 SEM snímek částic plniva

6 PŘÍPRAVA VZORKŮ

Bylo postupně připraveno několik typů vzorků o průměru 25 mm a tloušťce 4 mm s izotropní i s anizotropní strukturou plniva a různým stupněm plnění. Navažování a míchání jednotlivých složek směsi probíhalo při pokojové teplotě na analytických vahách. Nejprve se do třecí misky navázil pomocí stříkačky silikonový elastomer SYLGARD 184, následně se do něj nakapalo stříkačkou s jehlou tvrdidlo v hmotnostním poměru 10:1 dle údajů výrobce. Poté se ke směsi přidalo vypočtené množství příslušného CI-SI prášku.

Tab. 1 Přehled připravených vzorků

Označení	Struktura	Plnění [hm%]	Matrice	Plnivo
SYL 1 ANISO	Anizotropní	1	Sylgard 184	CI-SL
SYL 3 ANISO		3		
SYL 5 ANISO		5		
SYL 7 ANISO		7		
SYL 10 ANISO		10		
SYL 40 ANISO		40		
SYL 50 ANISO		50		
SYL 70 ANISO		70		
SYL 80 ANISO		80		
SYL 70 ISO		Izotropní		
SYL 80 ISO	80			

Směs putovala do vakuového míchadla značky Renfert, kde byla promíchána po dobu 5 minut při otáčkách 450 ot. /min (Obr. 16). Dále byla směs nalita do připravených forem (Obr. 17), které byly vloženy do elektromagnetu (Obr. 19). Elektromagnet byl umístěn v sušárně, která byla temperována na teplotu vytvrzování matrice, a sice 80 °C. Jako zdroj stejnosměrného napětí pro cívku elektromagnetu byl použit běžný laboratorní elektrický zdroj. Proud protékající cívkou činil 1 A, přičemž generoval mezi póly elektromagnetu magnetické pole o indukci 300 mT. Tato hodnota byla ověřena teslametrem. Po vložení vzorku do elektromagnetu byl spuštěn napěťový zdroj a generované magnetické pole zorientovalo částice železa. Vzorek byl ponechán v sušárně při teplotě 80 °C po dobu 2 hodin, během kterých došlo k jeho vytvrzení (Obr. 18). Poté byla forma vyjmuta a z kompozitu byl vyseknut vzorek o požadovaném průměru (15 mm) odpovídajícím průměru pozlacených elektrod (upevněných v čelistech trhačického stroje).



Obr. 16 *Michadlo Renfert*



Obr. 17 *Připravená zalitá forma*



Obr. 18 Sestava zdroje, elektromagnetu a sušárny



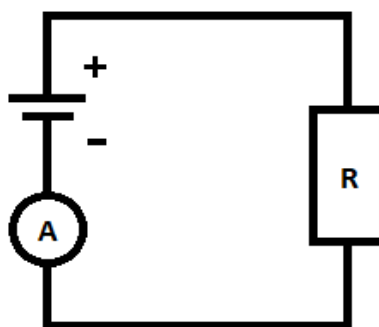
Obr. 19 Elektromagnet pro vytvoření anizotropní struktury MRE

7 DVOUBODOVÁ METODA MĚŘENÍ ELEKTRICKÉ VODIVOSTI

Měření elektrické vodivosti probíhalo dvoubodově na vzorcích tvaru disku (válece) o průměru 15 mm a tloušťce 4 mm. Vzorek byl umístěn mezi dvě elektrody a připojen k přesnému elektrometru Keithley 6517B (Obr. 20), který sloužil jako zdroj stejnosměrného napětí i jako ampérmetr; elektrické schéma tohoto jednoduchého obvodu, kdy vzorek představuje rezistor je na Obr. 21. Nastavení podmínek měření a sběr dat byl realizován přes připojené PC.



Obr. 20 Programovatelný elektrometr Keithley 6517B v sestavě

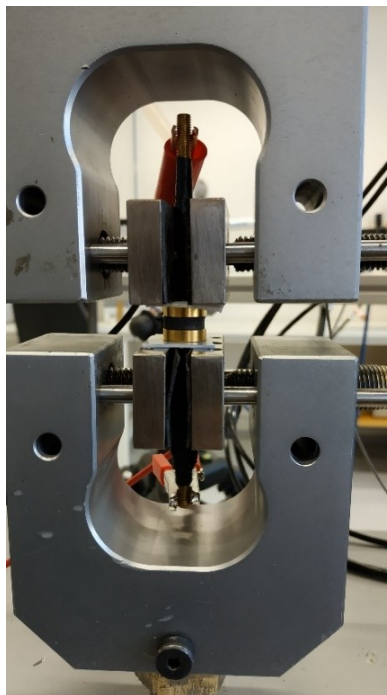


Obr. 21 Elektrické schéma zapojení sestavy

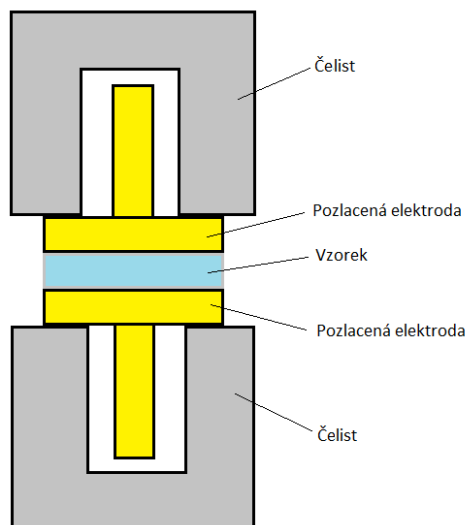
V tomto uspořádání byly změřeny volt-ampérové (V-A) charakteristiky, tj. závislosti proudu na napětí, v rozsahu 0 až 10 V. Z těch byla následně vypočtena konduktivita σ (měrná elektrická vodivost) jako podíl proudu protékajícího obvodem a budicího napětí. Vzhledem k tomu, že obecně VA charakteristiky nebyly lineární, bylo zvoleno referenční napětí U_0 (zvoleno 10 V) při kterém byla konduktivita počítána:

$$\sigma = \frac{I}{U_0} \frac{t}{S} [\text{S/cm}] \quad (3)$$

Pro měření piezorezistivity tj. závislosti el. odporu (resp. el. vodivosti) na deformaci vzorku v tlaku byly elektrody uchyceny mezi čelisti trhačího stroje. Elektrody byly na místech, která přicházela do kontaktu s kovovými čelistmi odizolována tak, aby proud tekla pouze elektrodami a vloženým vzorkem (Obr. 22).



Obr. 22 Foto uspořádání pro měření piezorezistivity

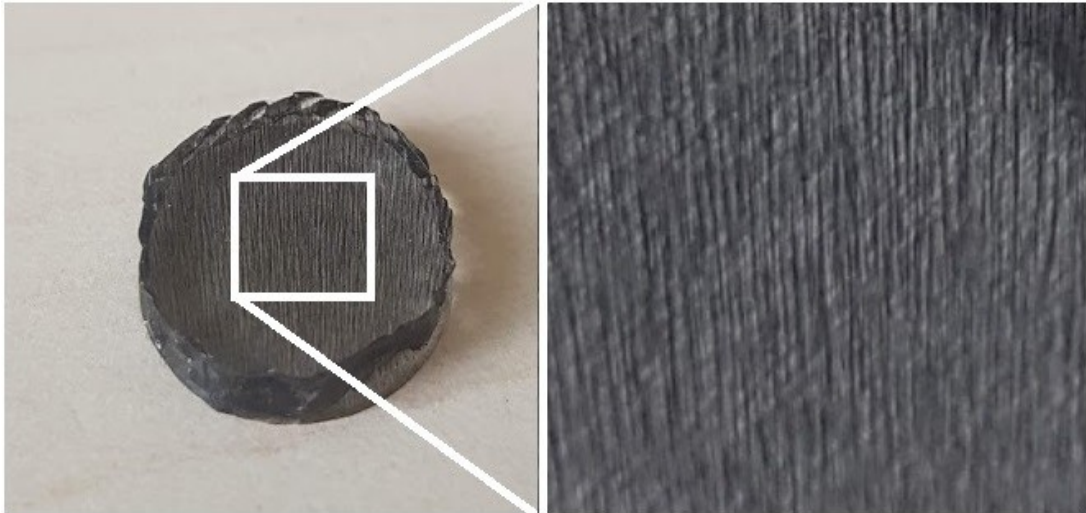


Obr. 23 Schéma set-up upevnění vzorku

Na vzorek, který byl upnutý mezi pozlacenými elektrodami v čelistech trhačky, byla vyvozena tlaková deformace. Kdy nejprve bylo potřeba zajistit dostatečné „nakontaktování“ mezi elektrodami a vzorkem. Aby byla zajištěna standardizace měření, muselo být při každém stejné počáteční zatížení vzorku. V ideálním případě by to bylo 0 N. To v našem případě nebylo možné, jelikož každý vzorek měl různý povrch. Proto jsme zvolili minimální předpětí 1 N pro dostačující kontakt, který umožnil přesné měření. Při tomto zatížení byla změřena první V-A charakteristika. Následovalo přiblížení čelistí o 1,25% tloušťky vzorku, kdy byla změřena další V-A charakteristika. Toto měření se opakovalo u každého vzorku pro deformace o hodnotách 0% (1 N), 1,25%, 2,5%, 3,75, 5%, 6,25%, 7,5%, 8,75% a 10%. Tj. 0 mm, 0,05 mm, 0,1 mm, 0,15 mm, 0,2 mm, 0,25 mm, 0,3 mm, 0,35 mm a 0,4 mm.

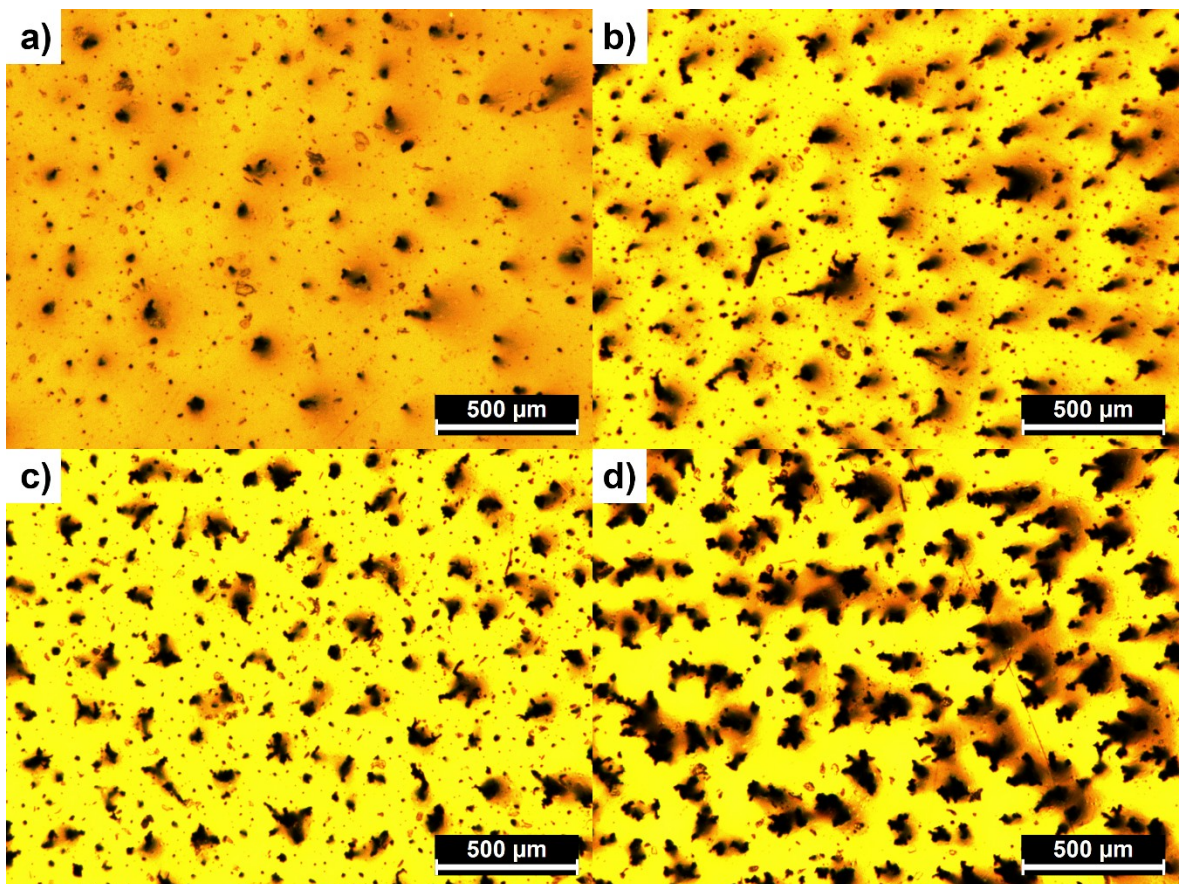
8 VYHODNOCENÍ DISKUZE NAMĚŘENÝCH DAT

8.1 Morfologie MRE



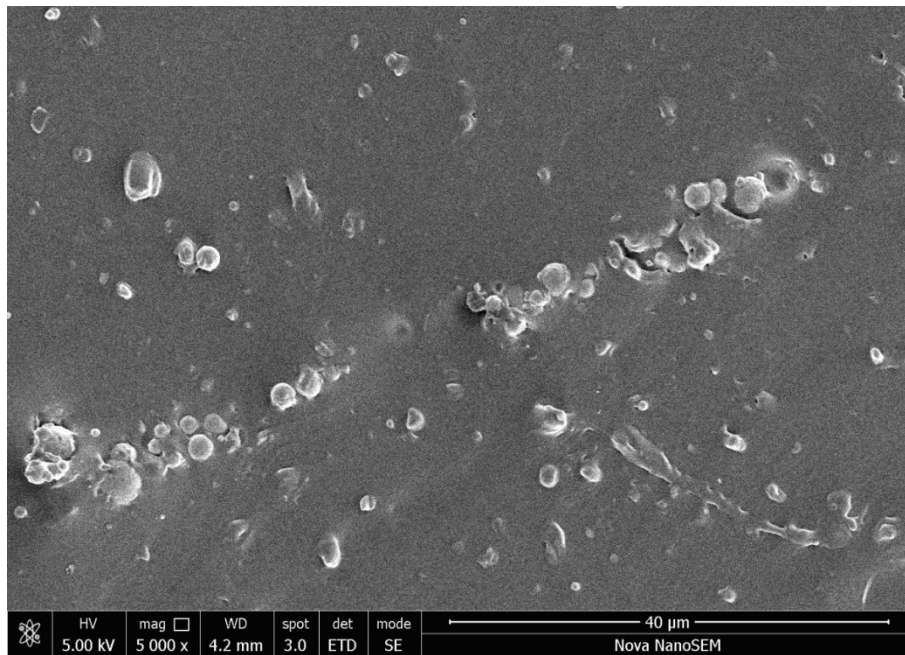
Obr. 24 Vyseknutý anizotropní vzorek s viditelnými „řetízky“

Morfologie anizotropních MRE závisí do značné míry na koncentraci plniva v systému. Nejméně koncentrované anizotropní vzorky MRE vykazují „jehlovitou“ strukturu orientovanou paralelně se směrem magnetického pole, jež ji vyvolalo (Obr. 24). Při bližším pohledu na tyto řetízky/protáhlé klastry, jež ji vytvářejí, lze odhalit, že se nejedná o perfektní řetízky ale spíše o shluky částic protáhlé ve směru magnetického pole, tj. kolmo k podstavě vzorků. Tyto, v projekci ve směru orientace klastrů (Obr. 25), navíc vykazují značnou diverzitu co do tloušťky klastrů při nízkých plněních (Obr. 25a), která postupně s rostoucí koncentrací plniva klesá a posouvá se ve prospěch tlustších řetízků (Obr. 25d).

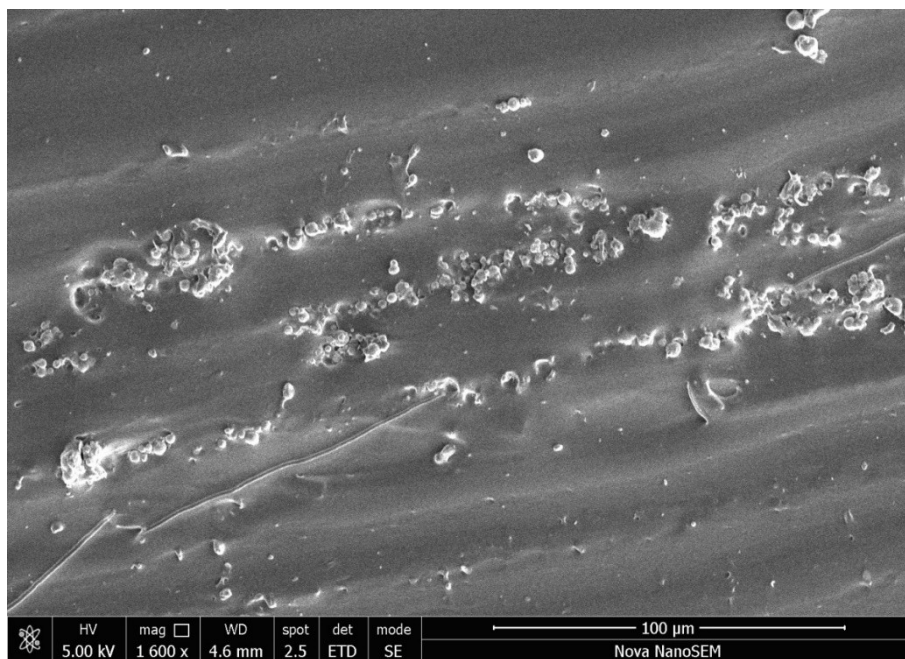


Obr. 25 Snímek z optického mikroskopu anizotropních elastomerů o různé koncentraci (hm.) plniva: a) 1 % b) 3 % c) 5 % d) 10 %; klastry plniva jsou orientovány kolmo k nákresně

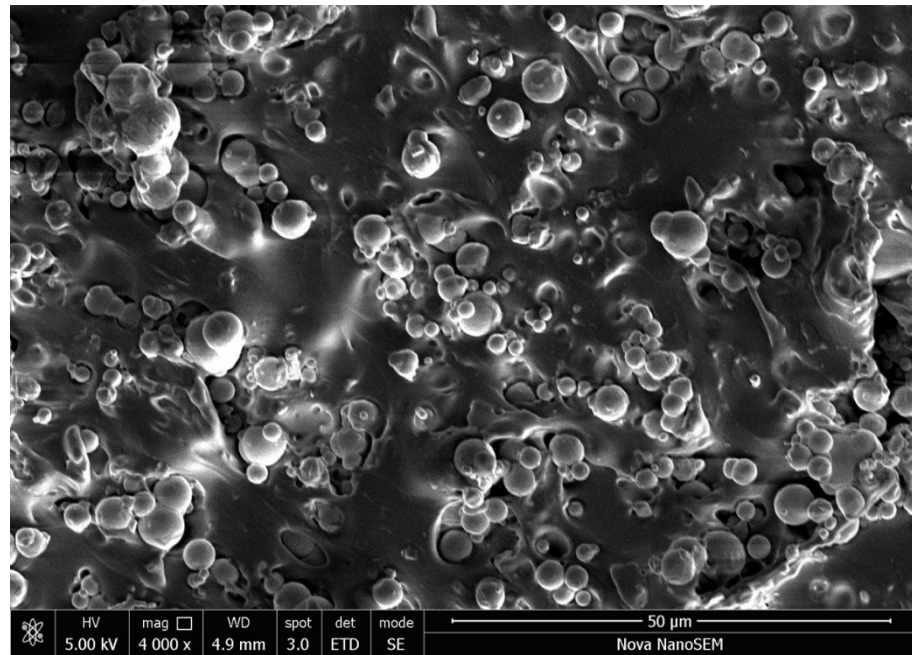
Tytéž závěry podporují i snímky ze SEM zobrazující vnitřní strukturu MRE v řezu vedeném paralelně s orientací řetízků. Některými připravenými vzorky byl proveden řez a byly vloženy pod rastrový elektronový mikroskop (SEM) a byly pořízeny snímky vnitřní struktury a povrchu kompozitů. Na Obr. 26 můžeme vidět klastr při 1 hm. % koncentrace plniva s matricí Sylgard. Klastr je tenký a osamocený. Na Obr. 27 je struktura při 7 hm. % plniva. Hustota klastrů je vyšší a tvoří se větší shluky. Diametrálně odlišná vnitřní struktura je patrná na vzorku se 70 hm. % plniva (Obr. 28), kdy už nejsou zcela zřetelně vidět jednotlivé řetízky, ale jen shluky plniva orientované do přednostního směru daného magnetickými siločarami. Toto lze vysvětlit díky prostorovým poměrům panujícím v kompozitu při takto vysokých plněních, které neumožňují volný pohyb částic plniva tak jako tomu je u plnění nízkých.



Obr. 26 SEM struktura vzorku Syl 1 ANISO

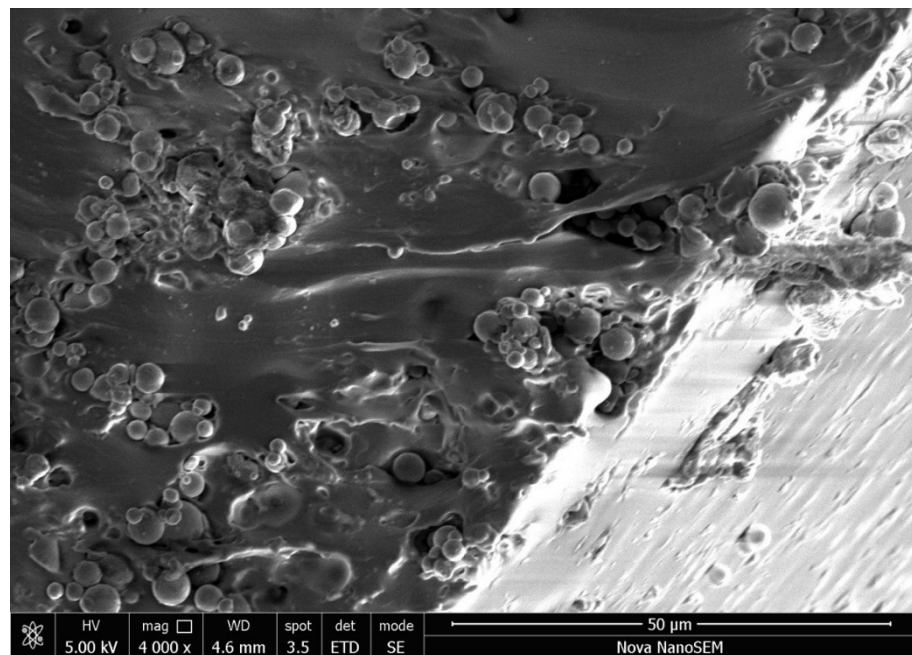


Obr. 27 SEM struktura vzorku Syl 7 ANISO

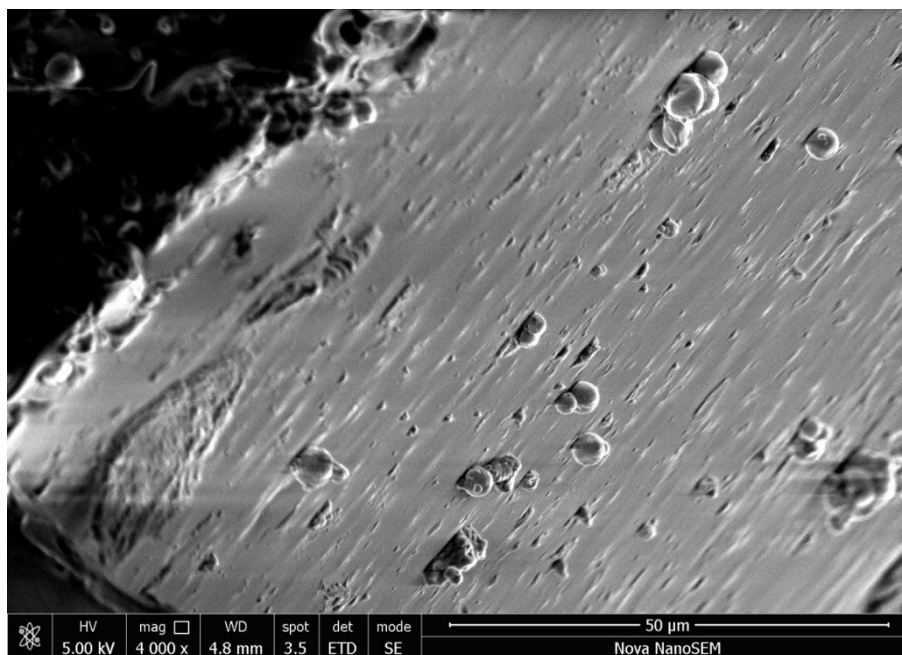


Obr. 28 SEM struktura vzorku Syl 70 ANISO

Pro ohmický kontakt mezi vzorkem a elektrodami je nutné, aby klastry částic vyčnívaly na povrchu elastomeru. To, že tento předpoklad je splněn dokumentuje Obr. 29, na němž je zachycena hrana mezi rovinou řezu a povrchem vzorku. Jsou zde vidět jednotlivé řetízky a jejich vyústění na povrch Obr. 30.



Obr. 29 SEM Syl 70 ANISO hrana řezu



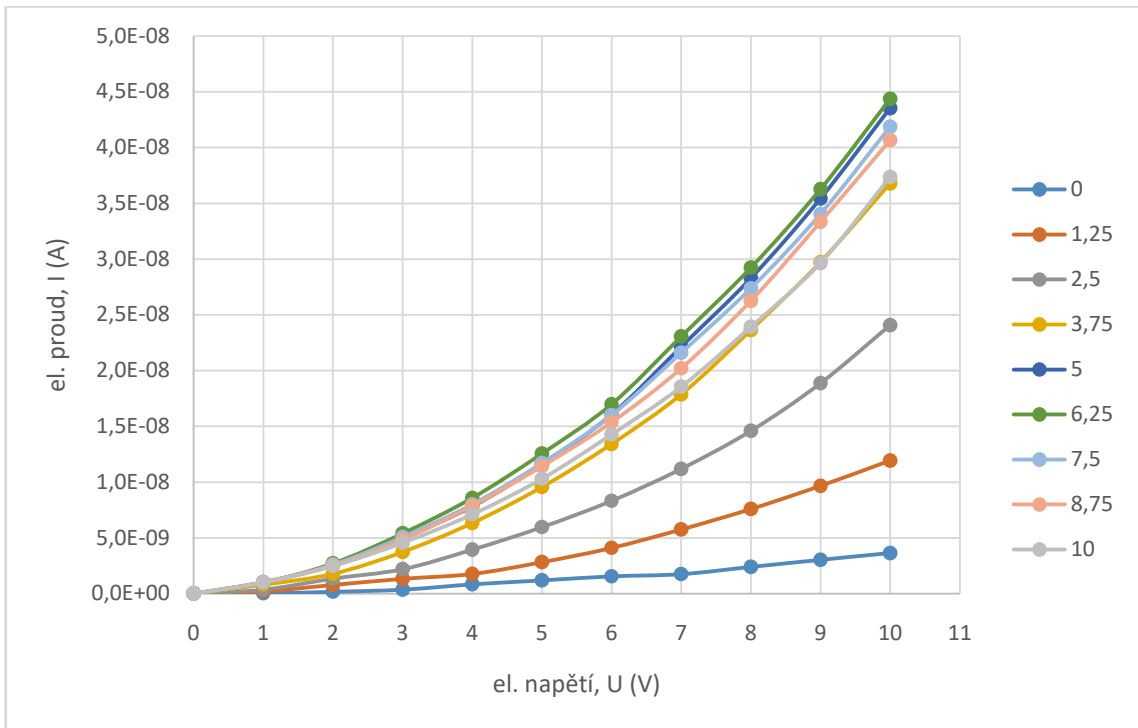
Obr. 30 SEM Syl 70 ANISO povrch vzorku

8.2 Vliv koncentrace plniva na elektrickou vodivost anizotropních MRE

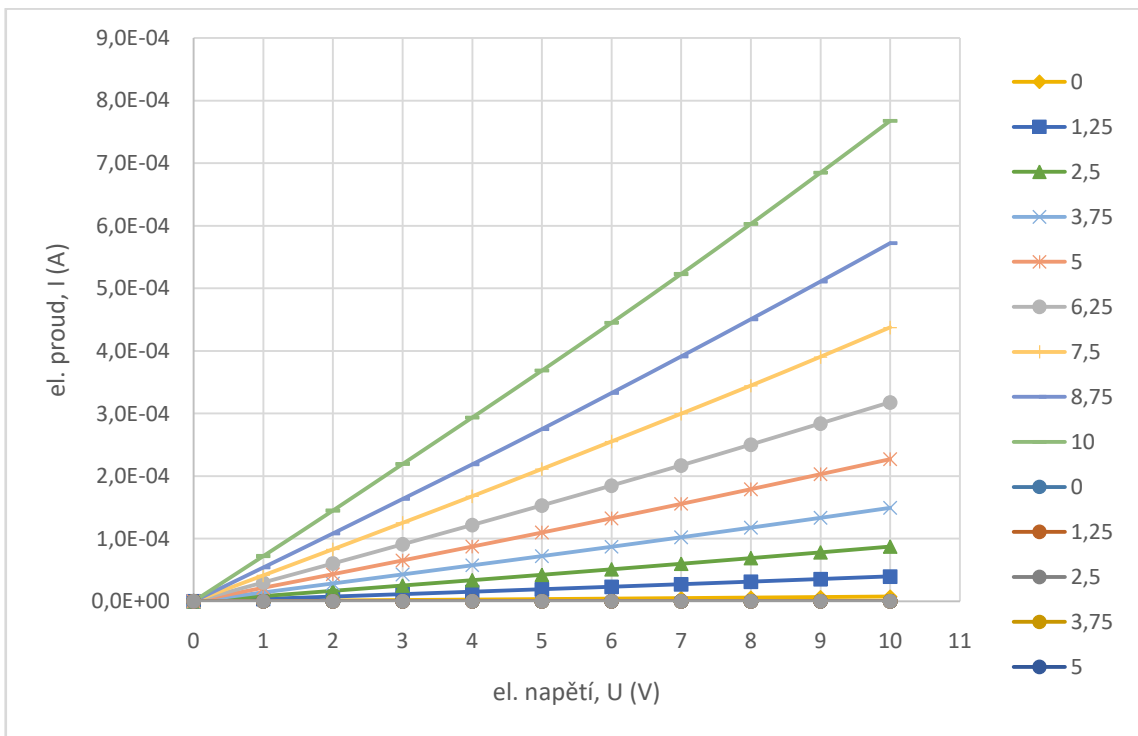
Naměřené V-A charakteristiky jsou obecně nelineární konvexního tvaru, což značí, že vodivost je závislá na přiloženém napětí a s napětím roste. Růst vodivosti s napětím lze vysvětlit na základě vzniku více vodivých cest napříč vzorkem, kdy některé z nich nejsou v ohmickém kontaktu, ale vzdálenost mezi klastry je dostatečně malá na to, aby se při dostatečném el. napětí uplatnil jiný mechanismus transportu jako je přeskok či tunelování. Tuto domněnku podporují i mikroskopické snímky elastomerů při nízkých koncentracích, ze kterých je patrné, že částice plniva nejsou v ohmickém kontaktu (Obr. 26 a 27).

Konvexitu V-A charakteristik je nejmarkantnější u nízkých koncentrací plniva (Obr. 31) a postupně se zvyšující se koncentrací přechází v závislost lineární (Obr. 32). Na obrázku Obr. 31 je vidět silně konvexní závislost u vzorku s 1 hm. % plniva oproti lineární ($R^2 = 0,9997$) závislosti u vzorku s 80 hm%. Změna pomalu nastává u 40 hm. %, jasně lineární charakter je pak patrný u 70 a 80 hm%.

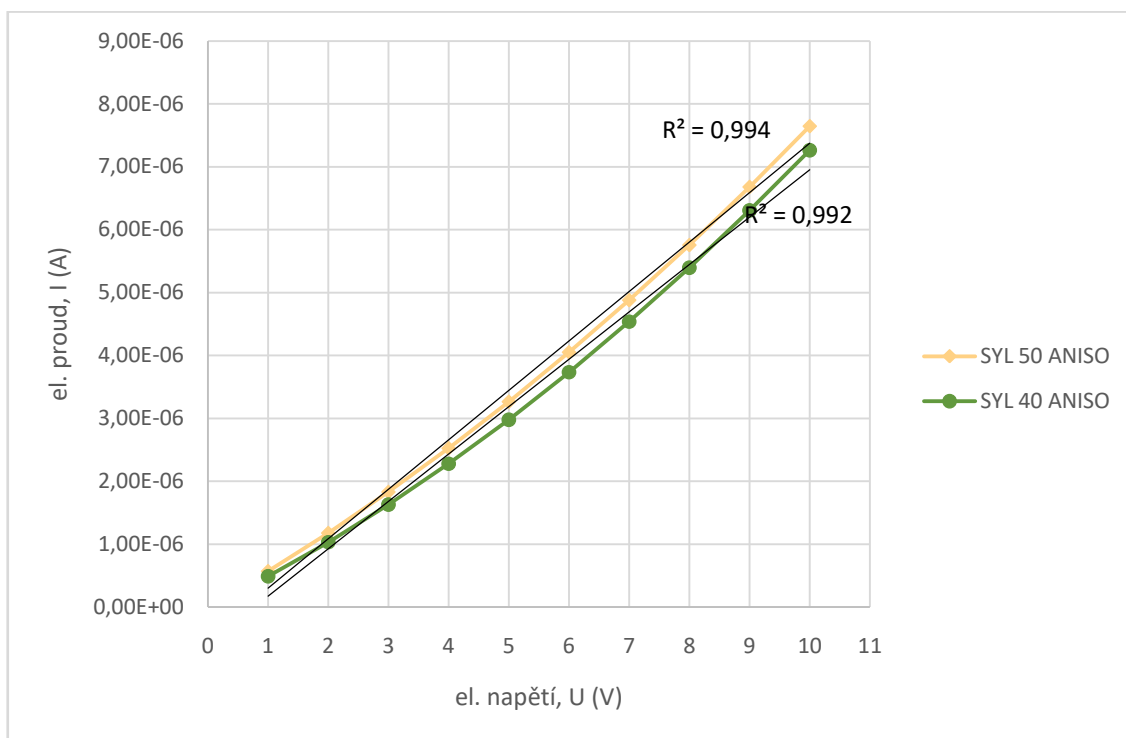
Na grafech (Obr. 33 a Obr. 34) byly V-A charakteristiky pro vzorky se 40, 50, 70 a 80 hm% proloženy přímkou a jak můžeme vidět korelační koeficient R^2 s koncentrací jasně roste k 1.



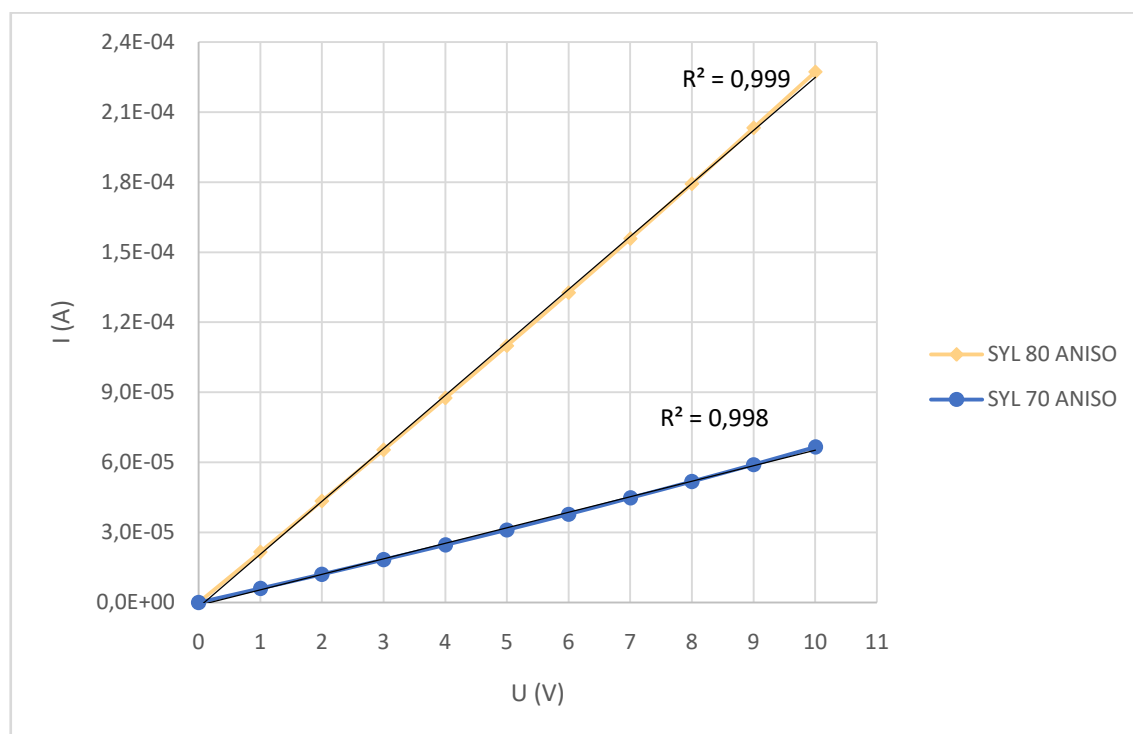
Obr. 31 Graf V-A charakteristika Syl 1 ANISO; legenda – relativní deformace (%).



Obr. 32 Graf V-A charakteristika Syl 80 ANISO



Obr. 33 Graf V-A char. pro Syl 40 ANISO a Syl 50ANISO, 5% deformace

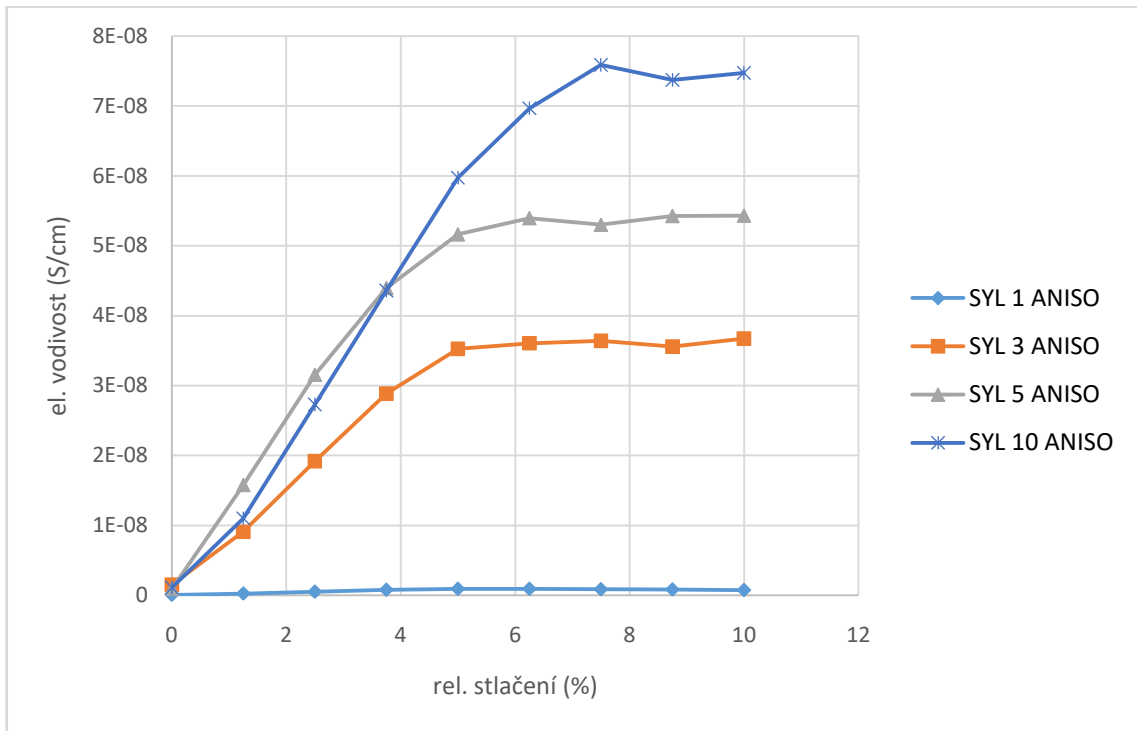


Obr. 34 Graf V-A char. pro Syl 70 ANISO a Syl 80 ANISO, 5% deformace

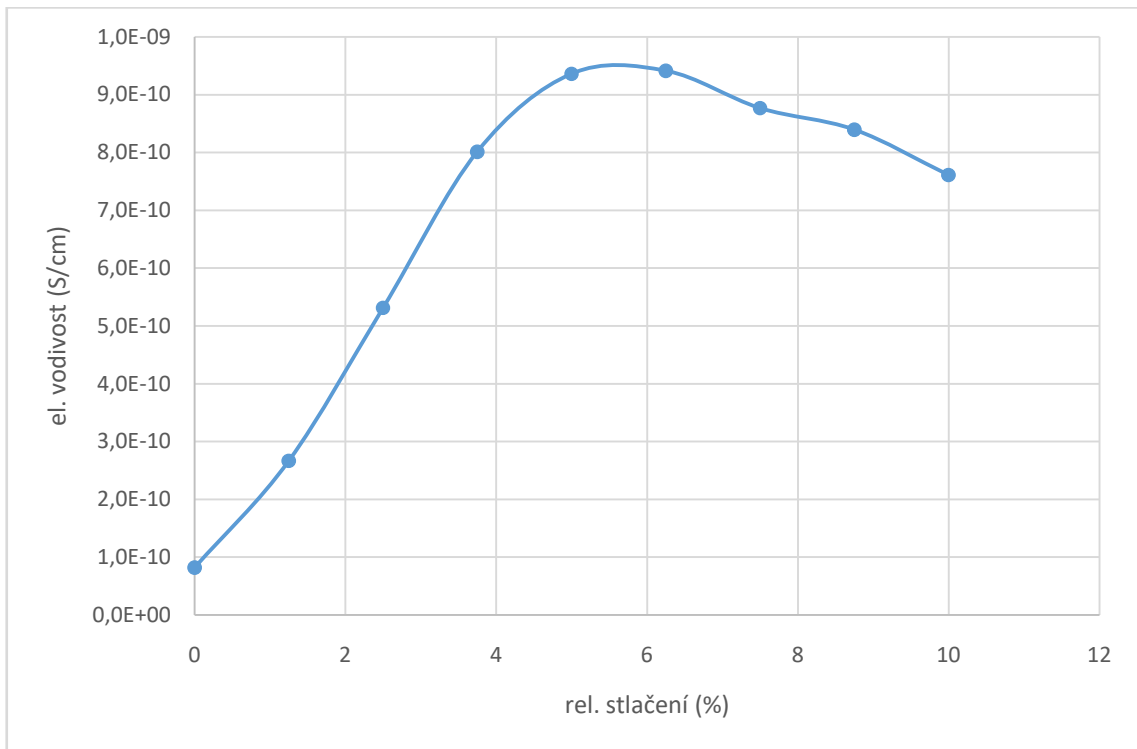
8.3 Vliv deformace

Vzorky elastomeru byly deformovány v tlaku, a to z nedeformovaného výchozího stavu postupně (v 8 lineárně rozptýlených krocích) až do maximálního stlačení 10 %. Charakter vodivostní odezvy kompozitu na stlačení se rozpadá do dvou skupin podle koncentrace plniva, a sice do 10 hm. %a od 40 hm. % výše.

První skupina vykazuje konkávní tvar závislosti vodivosti na stlačení s tím, že v malém rozsahu deformací, cca do 4 %, je vodivostní odezva pro všechny přibližně lineární (Obr. 35 a 36). Pro koncentraci 1 hm. % je dokonce zjevné maximum, které se nachází mezi 5 % a 6 % deformace stlačení (Obr. 36). Pak následuje poměrně výrazný pokles vodivosti. Vzhledem k morfologii kompozitů této skupiny, která je převážně dána řetízky/podlouhlými klastry plniva napříč tloušťkou vzorku, lze toto chování interpretovat jako přibližování samotných částic či jejich shluků v oblasti lineárního nárůstu následovaného postupným převládáním smykových složek deformace vedoucí k narušování kompaktnosti celé vodivé cesty. Toto je nejmarkantnější u 1 hm. %, kdy nárůst vodivosti s deformací nejen zpomalí, ale následně se z něj stává pokles (Obr. 36). Cesty, které se vytvořili, se deformují natolik, že jsou rozrušeny a elektrický proud již nevedou, protože klastry plniva nemají v dostatečné blízkosti další pro uskutečnění transportu náboje (způsobeno nízkou hm. koncentrací).



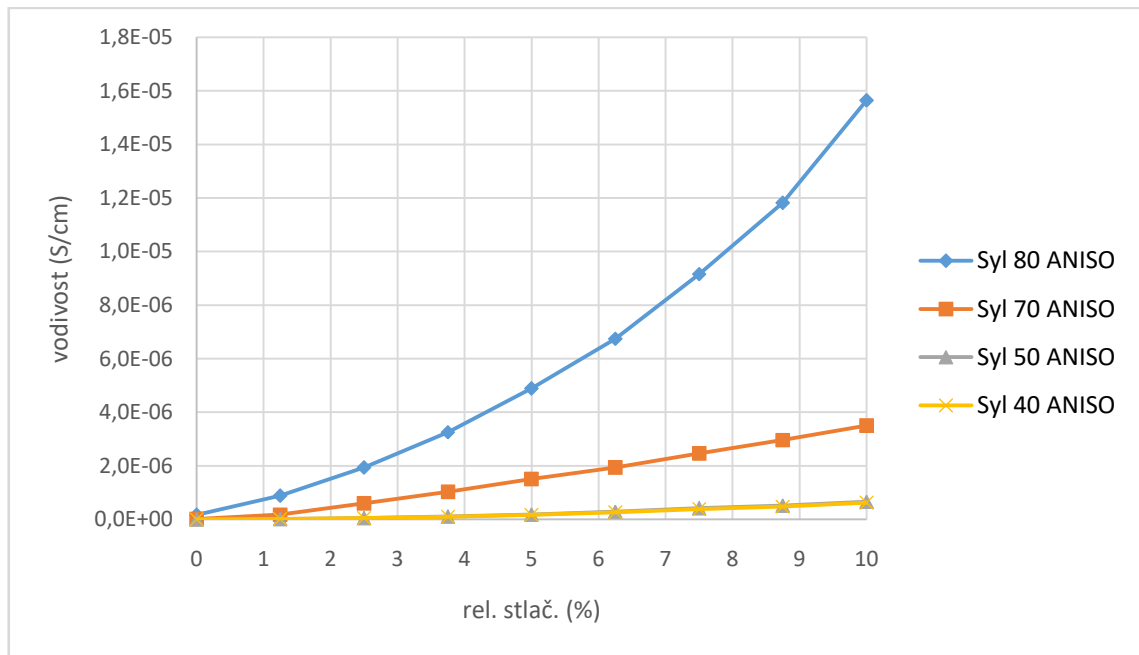
Obr. 35 Graf el. vodivosti na stlačení – konkávní



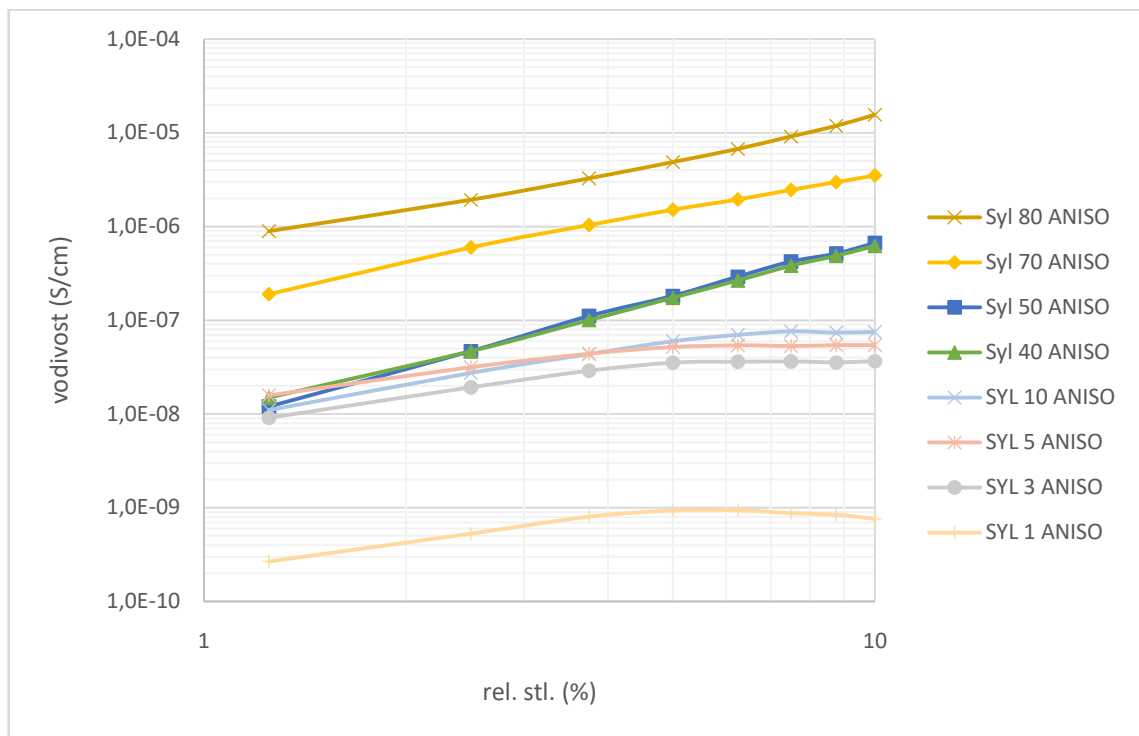
Obr. 36 Graf – Piezorezistivita Syl 1 ANISO

Od 40 hm. % (včetně) je závislost elektrické vodivosti na deformaci konkávní (Obr. 37), což znamená, že s postupnou deformací se rychlost vzniku vodivých cest zvětšuje. Celou

situaci pro všechny zkoumané koncentrace zachycuje Obr. 38, kde je jednoznačně patrný zlom charakteru závislosti mezi koncentracemi 10 a 40 hm. %. Domníváme se, že u vyšších plnění vyšší deformace (> 5 %) znatelně podporuje tvorbu dalších vodivých cest přiblížením jednotlivých klastrů plniva na potřebnou vzdálenost pro jejich ohmický kontakt. Vysvětlení opět dává pohled na mikrostrukturu vzorků, kdy už se kompozit neskládá z jednotlivých dobře rozlišitelných řetízkovitých struktur nicméně spíše menších shluků natočených do směru magnetického pole. Tyto, přestože nejsou v přímém ohmickém kontaktu, se nacházejí natolik blízko sebe, že jejich posun vlivem deformace vede vždy ke vzniku nové vodivé cesty napříč kompozitním vzorkem a tudíž k nárůstu celkové naměřené vodivosti.



Obr. 37 Graf el. vodivosti na stlačení – konvexní

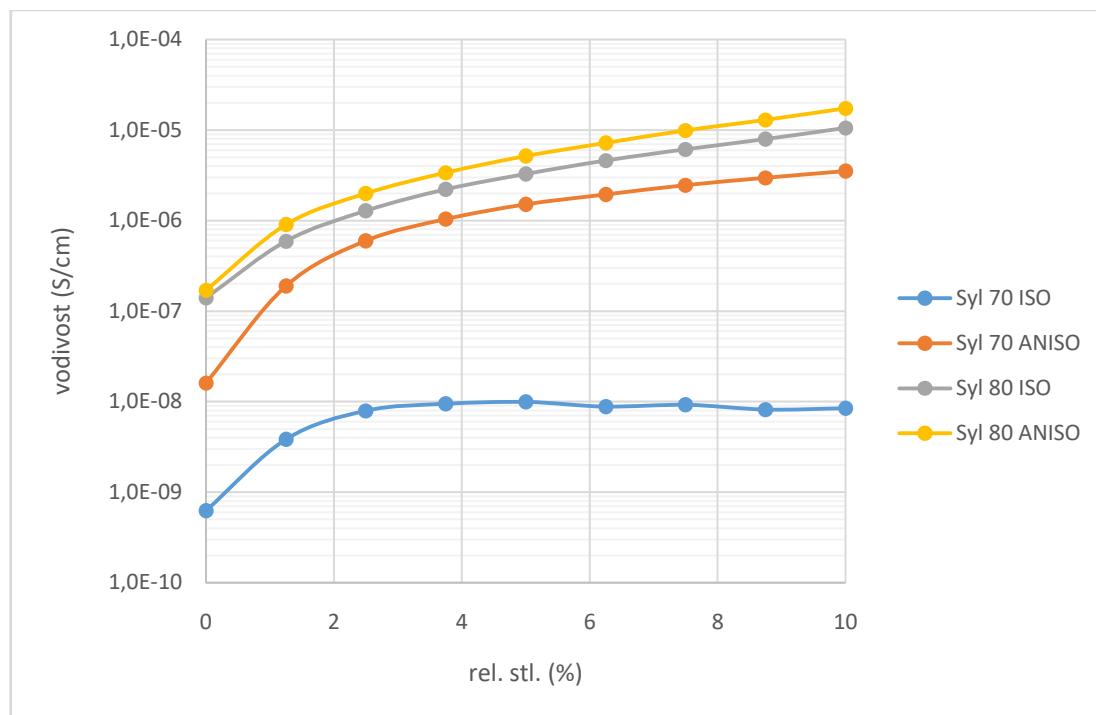


Obr. 38 Změna charakteru závislosti el. vodivosti na deformaci

8.4 Vliv orientace plniva

Konečně byl zkoumán vliv uspořádání plniva v magnetickém poli na vodivost i u kompozitních vzorků se značným plněním, a to 70 a 80 hm. % (tj. 23 respektive 34 obj. %). Z mikroskopických SEM snímků (např. Obr. 28) by se mohlo zdát, že částice jsou v matici distribuovány víceméně nahodile. A přestože vysoké plnění ze sterických důvodů do značné míry znemožňuje tvorbu řetízkových struktur, tak jak byla pozorována při nízkých koncentracích plniva, byl naměřen významný rozdíl ve vodivostech izotropní a anizotropní varianty MRE (Obr. 39). Rozdíl byl také značně ovlivněn tím, zdali daná koncentrace byla pod- či nadperkolační. Zatímco pro 70 hm. % (23 obj. %), což je v případě kulovitých částic obecně podperkolační hodnota, vodivost anizotropní varianty ($1,6 \cdot 10^{-8}$ S/cm) začínající na 26násobku izotropního systému ($6,2 \cdot 10^{-10}$ S/cm) roste až na více než 400násobek ($8,4 \cdot 10^{-9}$ S/cm vs. $3,5 \cdot 10^{-6}$ S/cm) při maximálním stlačení, rozdíl vodivosti u 80 hm. % se drží pro všechny deformace na konstantním rozdílu, a sice 1,5násobku izotropní varianty MRE (Obr. 39). To značí, že u kompozitů s koncentrací plniva pod perkolací (izotropního systému) je magnetické pole schopno výrazně ovlivnit uspořádání plniva ve prospěch vyšší vodivosti v nedeformovaném stavu ale ještě markantněji při jeho deformaci ve směru paralelním se směrem pole magnetického. Naopak pro nadperkolační

plnění je efekt orientace plniva magnetickým polem minimální, jelikož jsou vodivé cesty v systému přítomny i bez jeho účinků.



Obr. 39 Změna piezorezistivity v závislosti na orientaci plniva

ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce bylo prozkoumat vliv struktury MRE na jejich výsledné elektrické vlastnosti. V praktické části bylo úkolem připravit MR elastomery o různých koncentracích plniva s izotropní a anizotropní strukturou v matrici. K vytvoření všech vzorků byla použita silikonová elastomerní matrice Sylgard 184 a jako plni částice karbonylového železa CI-SL.

Při zkoumání morfologie vytvořených vzorků MRE pomocí SEM byla zjištěna závislost na stupni plnění. Při nízkém stupni plnění se tvoří struktura z orientovaných tenkých jehliček s nízkou hustotou. S rostoucím plněním se mění z tenkých jehliček spíše na shluky plniva, kde se jednotlivé „řetízky“ hledají jen těžce.

Vyhodnocení V-A charakteristik anizotropních vzorků ukázalo, že koncentrace plniva má vliv na linearitu těchto charakteristik. Nízké koncentrace vykazují rostoucí výrazně konvexní závislost napětí na proudu. S rostoucí koncentrací plniva přechází tato závislost téměř lineární, kdy korelační koeficient R^2 roste a blíží se téměř 1.

Při zatížení vzorků tlakem, bylo zjištěno dvojí chování MRE. Při nízkých koncentracích plniva (do 10 hm. %) je závislost vodivosti na deformaci konkávní, přičemž v nízkých deformacích cca do 4 % je lineární. Druhý typ chování se projevuje u koncentrací nad 40 hm. %, a sice konvexní závislostí. Z toho vyplývá, že podle koncentrace plniva se s narůstající deformací buď vodivé cesty rozpadají (nízké koncentrace) nebo naopak se tvoří více a více nových cest (vysoké koncentrace).

Zkoumán byl také vliv orientace plniva na vodivost MRE. Při porovnání výsledků izotropních a anizotropních vzorků o stejných koncentracích plniva byl naměřen významný rozdíl v jejich vodivosti. Ten byl ovšem značně ovlivněn tím, zda se jednalo o pod- či nad-perkolační plnění. Z toho lze vyvodit závěr, že orientování plniva má maximální efekt při nízkém plnění. Tento efekt se pak se zvyšující koncentrací vytrácí.

Závěrem lze konstatovat, že zkoumané strukturované (anizotropní) magnetoreologické elastomery lze v principu použít jako piezorezistivní tlakové senzory v rozsahu deformací do 5% popř. až 10% stlačení.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

1. **AGARWAL, Bhagwan D a Lawrence J BROUTMAN.** *Vláknové kompozity: celost. vysokošk. příručka pro vys. školy techn.* 1. vydání. Praha : SNTL, 1987. str. 294. ISBN.
2. **KRATOCHVÍL, Bohumil, Václav ŠVORČÍK a Dalibor VOJTĚCH.** *Úvod do studia materiálů.* Praha : Vysoká škola chemicko-technologická, 2005. ISBN 80-7080-568-4.
3. **MUSIL, Martin.** *Vliv orientace a skladby materiálů na výsledné vlastnosti kompozitního systému.* Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2017, 73 s. (10 386). Dostupné také z: <http://hdl.handle.net/10563/40808>. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Fakulta technologická, Ústav výrobního inženýrství. Vedoucí práce Fojtl, Ladislav.
4. **PETR, Tomáš.** *Kompozitní materiály na bázi magnetoreologických elastomerů.* Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2015, 68 s. (63 398 znaků). Dostupné také z: <http://hdl.handle.net/10563/32122>. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Fakulta technologická, Ústav inženýrství polymerů. Vedoucí práce Sedlačík, Michal.
5. **Carlson JD., Jolly MR.** *MRfluid, foam and elastomer devices. Mechatronics 2000;* 10: 555–569.
6. **Shiga T., Okada A., Kurauchi T.** *Magnetorheological behavior of composite gels. J. Applied Polymer Science 1995;* 58: 787–792.
7. **Jolly M.R., Carlson J.D., Munoz B.C., Bullions T.A.** *The magnetorheological response of elastomer composites consisting of ferrous particles embedded in a polymer matrix. Journal of Intelligent Material Systems and Structures,* 7, 613–622, 1996.
8. **Ginder JM., Clark SM., Schlotter WF., Nichols ME.** *Magnetostrictive phenomena in magnetorheological elastomers. Int. J. Modern Phys. B 2002;* 16, Nos. 17&18: 2412–2418.
9. **Zhou G. Y.,** *Shear properties of a magnetorheological elastomer, Smart Materials & Structures,* 12, 139-146, 2003.
10. **Chen L., Gong, X. L., Jiang W.Q., et al.,** *Investigation on magnetorheological elastomers based on natural rubber, Journal of Materials Science,* 42, 5483-5489, 2007.
11. **Hu Y., Wang Y.L., Gong X.L., et al.** *New magnetorheological elastomers based on polyurethane/Si-rubber hybrid, Polymer testing,* 24, 324-329, 2005.
12. **Bossis G., Abbo C., Cutillas S., et al.** *Electroactive and Electrostructured Elastomers. International Journal of Modern Physics B,* 2001 15(6&7), 564-573.

13. **Lokander M., Stenberg B.** *Performance of isotropic magnetorheological rubber materials*. Polymer Testing 2003; 22: 245–251.
14. **Lokander M., Stenberg B.** *Improving the magnetorheological effect in isotropic magnetorheological rubber materials*. Polymer Testing 2003; 22: 677–680.
15. **Deng H.X., Gong X.L., Wang L.H.**, *Development of an adaptive tuned vibration absorber with magnetorheological elastomer*, 15, Smart Materials & Structures, N111-N116, 2006.
16. **Ni Z. C., Gong X.L., Li J.F., et al.**, *Study on a dynamic stiffness - tuning absorber with squeeze-strain enhanced magnetorheological elastomer*, Journal of Intelligent Material Systems & Structures, 20, 1195-1202, 2009.
17. **Xu Z.B., Gong X.L., Liao G.J., et al.**, *An active-damping-compensated magnetorheological elastomer adaptive tuned vibration absorber*, Journal of Intelligent Material Systems & Structures, 21, 1039-1047, 2010.
18. **Zhang X.Z., and Li W.H.**, *Adaptive Tuned Dynamic Vibration Absorbers Working with MR Elastomers*, Smart Structures & Systems, 5 (5), 517-529, 2009.
19. **Hoang N., Zhang N., Du H.**, *An adaptive tunable vibration absorber using a new magnetorheological elastomer for vehicular powertrain transient vibration reduction*, Smart Materials & Structures, 20 (2011) 015019.
20. **Tian T.F., Li W.H., Alici G., et al.**, *Microstructure and magnetorheology of graphite based MR elastomers*, Rheologica Acta, DOI: 10.1007/s00397-011-0567-9.
21. **Gong X.L., Zhang X.Z., Zhang P.Q.**, *Fabrication and characterization of isotropic magnetorheological elastomers*, Polymer Testing, 24, 669-676, 2005.
22. **Tjong SC, Mai YW.** *Physical Properties and Applications of Polymer Nanocomposites* 2010 Publisher: Woodhead Publishing Ltd ISBN-9780857090249.
23. **KESTEN, Harry.** *What is...Percolation?*. NOTICES OF THE AMS. 2006 (Volume 53, Number 5). Dostupné z: <http://www.ams.org/notices/200605/what-is-kesten.pdf>
24. **AUSTIN, David.** *Percolation: Slipping through the Cracks*. Feature Column from the AMS [online]. Grand Valley State University, 2012 [cit. 2012-09-13]. Dostupné z: <http://www.ams.org/samplings/feature-column/fcarc-percolation>
25. **GRIMMETT, Geoffrey.** *Percolation*. Grundlehren der mathematischen Wissenschaften: Springer, 1999. Second Edition.

26. **BUNDE, Armin a Wolfgang DIETRICH.** *Percolation in Composites*. Journal of Electroceramics 5:2, [online]. 2000, Kluwer Academic Publishers, s. 81-92 Dostupné z: databáze SpringerLink
27. **RHODES, Susan M.** *Electrically conductive polymer composites*. University of Akron, 2007.
28. **CLINGERMAN.** *Development and modelling of electrically conductive composite materials*. Michigan Technological University, 2001. Michigan Technological University.
30. **Rothon, Roger N.,** (2003). *Particulate-Filled Polymer Composites (2nd Edition)*. Smithers Rapra Technology Online vision available at: <http://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpPFPC001/particulate-filled-polymer/particulate-filled-polymer>
31. **PETERS. S. T.** *Handbook of Composites*, 1998. ISBN: 0-412-54020-7
32. **VARGA, Zsolt, Genovéva FILIPCSEI a Miklós ZRÍNYI.** *Magnetic field sensitive functional elastomers with tuneable elastic modulus*. Polymer. 2006, vol. 47, s. 227-233. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0032386105016125>
33. **DOW CORNING.** *Product informations: Sylgard 184* [online]. [cit. 2019-05-03]. Dostupné z: <http://www.dowcorning.com/applications/search/default.aspx?R=131EN>
34. **JOHNSTON, I D, D K MCCLUSKEY, C K L TAN a M C TRACEY.** *Mechanical characterization of bulk Sylgard 184 for microfluidics and microengineering*. Journal of Micromechanics and Microengineering. 2014-03-01, vol. 24, Dostupné z: <http://stacks.iop.org/09601317/24/i=3/a=035017?key=crossref.cf83b17be3210f20943ae0e9169fc9b8>
35. **BASF.** *Carbonyl Iron Powder Brochure: Overview CIP product range*. 3. 5. 2019. Dostupné z: http://www.monomers.basf.com/cm/internet/en/portal/_/content/Produkte/Metallsysteme/CIP/CIP
36. **J. J. Wang, R.T.Zheng, J.W. Gao, G. Chen,** *Heat conduction mechanisms in nanofluids and suspensions*, NanoToday, Volume 7, Issue 2, 2012, Pages 124-136, ISSN 1748-0132, (<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1748013212000254>)
37. **YuChen, YongliWang, Hao-Bin Zhang, XiaofengLi, Chen-XiGui, Zhong-ZhenYu,** *Enhanced electromagnetic interference shielding efficiency of polystyrene/graphene com-*

posites with magnetic Fe₃O₄ nanoparticles, Carbon, Volume 82, 2015, Pages 67-76, ISSN 0008-6223

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

MRE	magnetoreologický elastomer
MMCs	metal matrix composites
PMCs	polymer matrix composites
CMCs	ceramic matrix composites
Al ₂ O ₃	oxid hlinitý
ZrO ₂	oxid zirkoničitý
SiC	karbid křemíku
Si ₃ N ₄	nitrid křemičitý
C	uhlík
Fe	železo
N	dusík
O	kyslík
PE	polyetylen
PP	polypropylen
PVC	polyvinylchlorid
PS	polystyren
PMMA	polymethylmetakrylát
ABS	polyakrylonitrilbutadienstyren
PEEK	polyéteréterketon
T_g	teplota skelného přechodu [°C]
$\Delta\sigma$	hystereze [kPa]
l/d	štíhlostní poměr [-]
p	parametr perkolace [-]
p_c	perkolační parametr [-]

θ	transportní veličina
φ	objemové plnění [%]
φ_c	kritické objemové plnění [%]
σ	vodivost (konduktivita) [S]
σ_0	vodivost plniva [S]
V	objemový podíl plniva [m ³]
V_c	kritický (perkolační) objemový podíl plniva [m ³]
ρ_h	měrný odpor plniva [$\Omega \cdot m$]
ρ_l	měrný odpor polymeru [$\Omega \cdot m$]
t	kritický exponent [-]
PDMS	polydimethylsiloxan
MEMS	mikro elektromechanické systémy
d_{90}	distribuce částic (90 % částic je menších) [μm]
CI-SI	karbonylové železo
SEM	rastrovací elektronový mikroskop
V-A	volt-ampér
I	proud [A]
U	napětí [V]
t	tloušťka vzorku [mm]
S	plocha vzorku [mm ²]
U_0	referenční napětí [10V]
R^2	korelační koeficient [-]

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Tahový diagram [2]	12
Obr. 2 Rozdělení podle výztuže [3]	13
Obr. 3 Rozdělení podle struktury [3]	14
Obr. 4 Rozdělení kompozitů podle matrice [3]	14
Obr. 5 Závislost modulu pružnosti na magnetickém toku [5]	16
Obr. 6 Tahové prodloužení a smrštění elastomeru vykazující hysterizi [4]	17
Obr. 7 Schéma výrobních metod	21
Obr. 8 Struktura izotropního MRE [20]	22
Obr. 9 Struktura anizotropního MRE [20]	22
Obr. 10 Charakteristický tvar perkolační závislosti [23]	23
Obr. 11 Obsazení čtvercové mřížky pro různé hodnoty pravděpodobnosti obsazení pole [26]	23
Obr. 12 Perkolační křivka pro závislost měrného odporu na obsahu plniva	24
Obr. 13 Schéma piezorezistivního mechanismu	27
Obr. 14 Schéma pozitivního a negativního piezorezistivního chování [23]	28
Obr. 15 SEM snímek částic plniva	31
Obr. 16 Míchadlo Renfert	33
Obr. 17 Připravená zalitá forma	33
Obr. 18 Sestava zdroje, elektromagnetu a sušárny	34
Obr. 19 Elektromagnet pro vytvoření anizotropní struktury MRE	34
Obr. 20 Programovatelný elektrometr Keithley 6517B v sestavě	35
Obr. 21 Elektrické schéma zapojení sestavy	35
Obr. 22 Foto uspořádání pro měření piezorezistivity	36
Obr. 23 Schéma set-up upevnění vzorku	37
Obr. 24 Vyseknutý anizotropní vzorek s viditelnými „řetízky“	38
Obr. 25 Snímek z optického mikroskopu anizotropních elastomerů o různé koncentraci (hm.) plniva: a) 1 % b) 3 % c) 5 % d) 10 %; klastry plniva jsou orientovány kolmo k nákresně	39
Obr. 26 SEM struktura vzorku Syl 1 ANISO	40
Obr. 27 SEM struktura vzorku Syl 7 ANISO	40
Obr. 28 SEM struktura vzorku Syl 70 ANISO	41
Obr. 29 SEM Syl 70 ANISO hrana řezu	41

Obr. 30 SEM Syl 70 ANISO povrch vzorku	42
Obr. 31 Graf V-A charakteristika Syl 1 ANISO; legenda – relativní deformace (%).....	43
Obr. 32 Graf V-A charakteristika Syl 80 ANISO	43
Obr. 33 Graf V-A char. pro Syl 40 ANISO a Syl 50ANISO, 5% deformace	44
Obr. 34 Graf V-A char. pro Syl 70 ANISO a Syl 80 ANISO, 5% deformace	44
Obr. 35 Graf el. vodivosti na stlačení – konkávní	46
Obr. 36 Graf – Piezorezistivita Syl 1 ANISO	46
Obr. 37 Graf el. vodivosti na stlačení – konvexní.....	47
Obr. 38 Změna charakteru závislosti el. vodivosti na deformaci	48
Obr. 39 Změna piezorezistivity v závislosti na orientaci plniva	49

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 <i>Přehled připravených vzorků</i>	32
---	----