



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV TECHNOLOGIE STAVEBNÍCH HMOT A DÍLCŮ

INSTITUTE OF TECHNOLOGY OF BUILDING MATERIALS AND COMPONENTS

**VLIV OHYBOVÉHO NAMÁHÁNÍ NA ELEKTRICKÉ
VLASTNOSTI ALKALICKY AKTIVOVANÝCH
STRUSKOVÝCH KOMPOZITŮ**

EFFECT OF FLEXURAL LOADING ON ELECTRICAL PROPERTIES OF ALKALI-ACTIVATED
SLAG COMPOSITES

DIPLOMOVÁ PRÁCE

DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Lukáš Šimko

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. RNDr. PAVEL ROVNANÍK, Ph.D.

BRNO 2018



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

FAKULTA STAVEBNÍ

| | |
|--------------------------------|---|
| Studijní program | N3607 Stavební inženýrství |
| Typ studijního programu | Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia |
| Studijní obor | 3607T020 Stavebně materiálové inženýrství |
| Pracoviště | Ústav technologie stavebních hmot a dílců |

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

| | |
|------------------------|---|
| Student | Bc. Lukáš Šimko |
| Název | Vliv ohybového namáhání na elektrické vlastnosti alkalicky aktivovaných struskových kompozitů |
| Vedoucí práce | doc. RNDr. Pavel Rovnaník, Ph.D. |
| Datum zadání | 31. 3. 2017 |
| Datum odevzdání | 12. 1. 2018 |

V Brně dne 31. 3. 2017

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA
Vedoucí ústavu

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA
Děkan Fakulty stavební VUT

PODKLADY A LITERATURA

1. Han B, Yu X, Ou J. Self-Sensing Concrete in Smart Structures. Butterworth-Heinemann, Oxford, 2014.
2. Wen S, Chung DDL. Self-sensing of flexural damage and strain in carbon fiber reinforced cement and effect of embedded steel reinforcing bars. Carbon 2006, 44, 1496-1502.
3. Han B, Ding S, Yu X. Intrinsic self-sensing concrete and structures: A review. Measurement 2015, 59, 110-128.
4. Ding Y et al. Concrete with triphasic conductive materials for self-monitoring of cracking development subjected to flexure. Composite Structures 2016, 138, 184-191.

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Proveďte literární rešerši týkající se elektrických vlastností cementových, případně dalších aluminosilikátových kompozitů využívaných ve stavebnictví. Zaměřte se především na měření sensorických vlastností při ohybovém namáhání kompozitů využívajících vodivých příměsí (grafit, kovová a uhlíková vlákna, CNT, saze) pro zvýšení elektrické vodivosti těchto materiálů.

V experimentální části připravte trámce z kompozitů na bázi alkalicky aktivované strusky s vybranými typy vodivých příměsí. Zjistěte mechanické vlastnosti a mikrostrukturu připravených kompozitů. Vzorky cyklicky zatěžujte v třibodovém ohybu a sledujte elektrickou odezvu na vložené zatížení. Výsledky zpracujte do přehledných grafů a vyhodnoťte.

Rozsah práce 60 až 90 stran.

STRUKTURA DIPLOMOVÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).
2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).

ABSTRAKT

Klasický beton je nejpoužívanějším stavebním materiálem. Dnešní doba si ovšem žádá stále vyšší nároky na nízkou energetickou náročnost, na trvanlivost konstrukcí spojenou s jednoduchou diagnostikou stavu konstrukce a velmi důležitým aspektem je také ekologie. Tato diplomová práce se zabývá cementovými a aluminosilikátovými kompozity s obsahem vodivých plniv, díky kterým je možné monitorovat změnu elektrických vlastností, nejčastěji elektrického odporu, v závislosti na mechanickém namáhání. V rámci praktické části práce byly vyrobeny zkušební trámce na bázi alkalicky aktivované strusky s obsahem uhlíkových nanotrubiček, grafitového prášku, saze a uhlíkových vláken. Zkušební trámce byly namáhány třibodovým ohybem a byla sledována změna elektrického odporu.

KLÍČOVÁ SLOVA

aluminosilikátové kompozity, vysokopecní struska, vodivá plniva, saze, grafit, uhlíkové nanotrubičky, uhlíková vlákna, elektrický odpor

ABSTRACT

Ordinary concrete is the most commonly used building material, but nowadays the requirements for low energy consumption, durability of structures together with their easy diagnostics as well as ecological production raises. This thesis deals with cement and aluminosilicate composites with content of conductive fillers, which allows to monitor the change in electrical properties, most commonly electrical resistance in dependence on mechanical stress. In the experimental part of the thesis, test beams were produced based on alkali-activated slag with content of carbon nanotubes, graphite powder, carbon black and carbon fibre. The beams were subjected to flexural loading in a three-point bending configuration and the shift in electrical resistance was monitored.

KEY WORDS

aluminosilicate composites, blast furnace slag, conductive fillers, carbon black, graphite, carbon nanotubes, carbon fibre, electrical resistance

Bibliografická citace VŠKP

Bc. Lukáš Šimko *Vliv ohybového namáhání na elektrické vlastnosti alkalicky aktivovaných struskových kompozitů*. Brno, 2017. 67 s., Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce doc. RNDr. Pavel Rovnaník, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 10. 1. 2018

Bc. Lukáš Šimko
autor práce

Poděkování:

Děkuji panu doc. RNDr. Pavlovi Rovnaníkovi, PhD. za ochotu a vstřícnost při odborných konzultacích při zpracování mé diplomové práce, za konstruktivní zpětnou vazbu a také za pomoc při práci na experimentální části.

Obsah

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | Úvod..... | 10 |
| 2 | Teoretická část..... | 11 |
| 2.1 | Chytrý beton..... | 11 |
| 2.2 | Funkční plniva a jejich vliv na vlastnosti kompozitů..... | 12 |
| 2.2.1 | Ocelová vlákna | 12 |
| 2.2.2 | Saze..... | 13 |
| 2.2.3 | Ocelářenská struska | 14 |
| 2.2.4 | Grafitový prášek..... | 15 |
| 2.2.5 | Uhlíková vlákna | 16 |
| 2.2.6 | Uhlíková nanovlákna..... | 17 |
| 2.2.7 | Uhlíkové nanotrubičky (CNT) | 18 |
| 2.3 | Způsoby měření elektrických vlastností kompozitů..... | 19 |
| 2.3.1 | Elektrody pro měření elektrických vlastností | 19 |
| 2.3.2 | Elektrická vodivost..... | 20 |
| 2.3.3 | Rezistivita | 21 |
| 2.4 | Senzorické vlastnosti chytrého betonu při různém zatěžování..... | 23 |
| 2.4.1 | Tlak..... | 23 |
| 2.4.2 | Tah | 24 |
| 2.4.3 | Ohyb..... | 24 |
| 2.4.4 | Další faktory ovlivňující snímací vlastnosti chytrého betonu | 24 |
| 2.5 | Využití kompozitů s plnivou | 27 |
| 3 | Experimentální část..... | 29 |
| 3.1 | Použité suroviny | 30 |

| | | |
|-------|--|----|
| 3.1.1 | Struska..... | 30 |
| 3.1.2 | Vodní sklo..... | 31 |
| 3.1.3 | Normalizovaný písek CEN | 31 |
| 3.1.4 | Triton X-100..... | 31 |
| 3.1.5 | Lukosan..... | 31 |
| 3.1.6 | Saze..... | 32 |
| 3.1.7 | Grafit | 32 |
| 3.1.8 | Uhlíková vlákna | 32 |
| 3.1.9 | Uhlíkové nanotrubičky..... | 33 |
| 3.2 | Příprava vzorků | 33 |
| 3.3 | Složení směsí | 34 |
| 3.4 | Měření a měřicí zařízení | 34 |
| 3.4.1 | Pevnost v tlaku a pevnost v tahu ohybem..... | 34 |
| 3.4.2 | Snímky mikrostruktury | 34 |
| 3.4.3 | Elektrický odpor při cyklickém zatěžování..... | 35 |
| 3.4.4 | Akustická emise..... | 35 |
| 3.5 | Výsledky měření..... | 38 |
| 3.5.1 | Mechanické vlastnosti..... | 38 |
| 3.5.2 | Elektrické vlastnosti | 39 |
| 3.6 | Snímky mikrostruktury | 57 |
| 4 | Závěr | 60 |
| 5 | Literatura | 61 |

1 Úvod

Klasický cementový beton je stále nejvíce používaným stavebním materiálem. Doba se ovšem mění a na všechny stavební materiály jsou kladeny stále větší požadavky, ať z hlediska pevnosti, která by měla být co nejvyšší při zachování nízké hmotnosti a dobrých tepelně izolačních vlastností. Velmi důležitým aspektem dnešní doby je ekologie. Při výrobě jedné tuny portlandského cementu, který je majoritně využíván jako pojivová složka betonu, se vyprodukuje přibližně jedna tuna oxidu uhličitého, jehož produkce se snaží být co nejvíce eliminována. Z těchto důvodů je nutností vylepšovat vlastnosti betonu pomocí různých přísad a ideálně, alespoň částečně, nahrazovat cement jinou pojivovou složkou jakou může být například elektrárenský popílek nebo vysokopecní struska.

Tato práce se zabývá kompozitními materiály se zvýšenou elektrickou vodivostí. Zvýšení elektrické vodivosti je možné dosáhnout použitím vodivého plniva, které vytvoří vodivou strukturu, díky které je možné kontinuálně sledovat změnu elektrického odporu, který se mění při různém silovém namáhání, a především při vzniku defektů a trhlin uvnitř materiálu. Takto je možné provádět nepřetržitou nedestruktivní diagnostiku stavu konstrukce a v případě počínajícího vzniku deformací a defektů rychle provést potřebná opatření pro prodloužení životnosti konstrukce.

V rámci experimentální části této práce byla vyrobena zkušební tělesa na pojivové bázi alkalicky aktivované vysokopecní strusky, která plně substituuje portlandský cement jako pojivovou složku a jde tedy o výrazně ekologičtější produkt, protože vysokopecní struska je vedlejším produktem při výrobě železa ve vysokých pecích.

2 Teoretická část

2.1 Chytrý beton

Struktura chytrého betonu závisí ve vysoké míře na složení kompozitů. Kompozitní chytrý beton obsahuje převážně matricové materiály a funkční plniva. Kromě toho mohou být využívány některé pomocné materiály sloužící k důkladnější homogenizaci a dispergaci funkčních plniv ve směsi.

Jako matrice pro chytrý beton mohou být použity všechny typy betonu. V tomto případě obecný pojem beton zahrnuje beton (obsahující hrubé a jemné frakce kameniva), maltu (obsahující jemné frakce kameniva) a pastu (neobsahující žádné kamenivo).

Jako funkční plniva se používají různé vodivé materiály, případně jejich kombinace. Beton s uhlíkovými vlákny v kombinaci s uhlíkovými nanotrubičkami může vykazovat lepší kvalitu signálu, zvýšit spolehlivost a citlivost měření ve srovnání s betonem, který obsahuje jen uhlíková vlákna [1]. Chytrý beton s popílkem a ocelářenskou struskou dosahuje vyšší citlivosti než beton, který obsahuje jen jedno z těchto plniv. Beton s obsahem železných vodivých funkčních agregátů a uhlíkových vláken má vyšší senzitivitu než beton obsahující pouze uhlíková vlákna [2].

Chování chytrého betonu závisí na několika parametrech funkčních plniv, jako je například typ materiálu, morfologie (tvar, velikost, délka, povrch, stupeň agregace a aglomerace) a koncentrace. Výzkumy ukazují, že vláknitá plniva s vysokým poměrem stran (poměr délky k průměru) mohou měnit snímací schopnosti betonu při výrazně nižších koncentracích než částicová plniva [3]. Je však třeba věnovat pozornost rozptýlení vláknitých plniv ve srovnání s částicovými plnivou, protože vláknitá plniva se při výrobě betonu obtížněji dispergují a snadněji poškozují.

V porovnání s obyčejným betonem zlepšuje přidání vodivého plniva pevnost v ohybu a houževnatost. V porovnání s betonovým nosníkem s ocelovými vlákny,

vykazuje použití kombinace sazí, uhlíkových vláken a ocelových vláken pozitivní účinek na ohybové chování a schopnost snímání šíření trhlin [4].

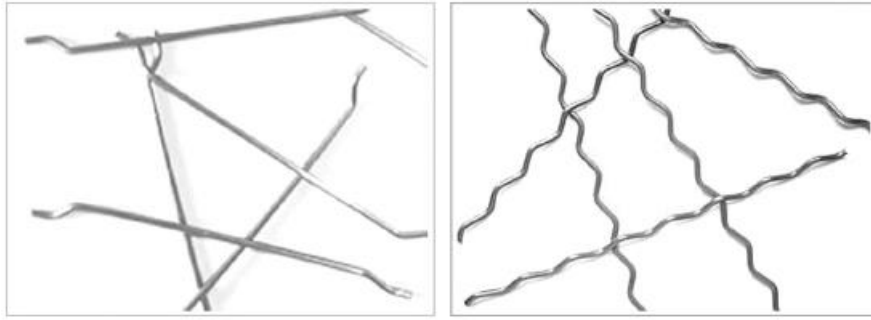
2.2 Funkční plniva a jejich vliv na vlastnosti kompozitů

2.2.1 Ocelová vlákna

Ocelová vlákna (Obr. 2-1 a Obr. 2-2) jsou definována jako krátká vlákna s poměrem stran (poměr délky k průměru) od 20 do 100. Jsou vyráběna s různými průřezy a jsou dostatečně malá, aby byla náhodně rozptýlena v čerstvém betonu za použití obvyklých míchacích postupů. Použití ocelových vláken v betonu může způsobit kvalitativní změny fyzikálních vlastností. Výrazně zvyšují odolnost proti praskání, nárazům, únavě a ohýbání, zlepšují houževnatost, trvanlivost a další vlastnosti. V roce 2003 byla poprvé vyrobena cementová pasta se senzoryckými vlastnostmi pomocí ocelových vláken o délce 6 mm a průměru 8 μm [5].



Obr. 2-1 - Beton s ocelovými vlákny [2]



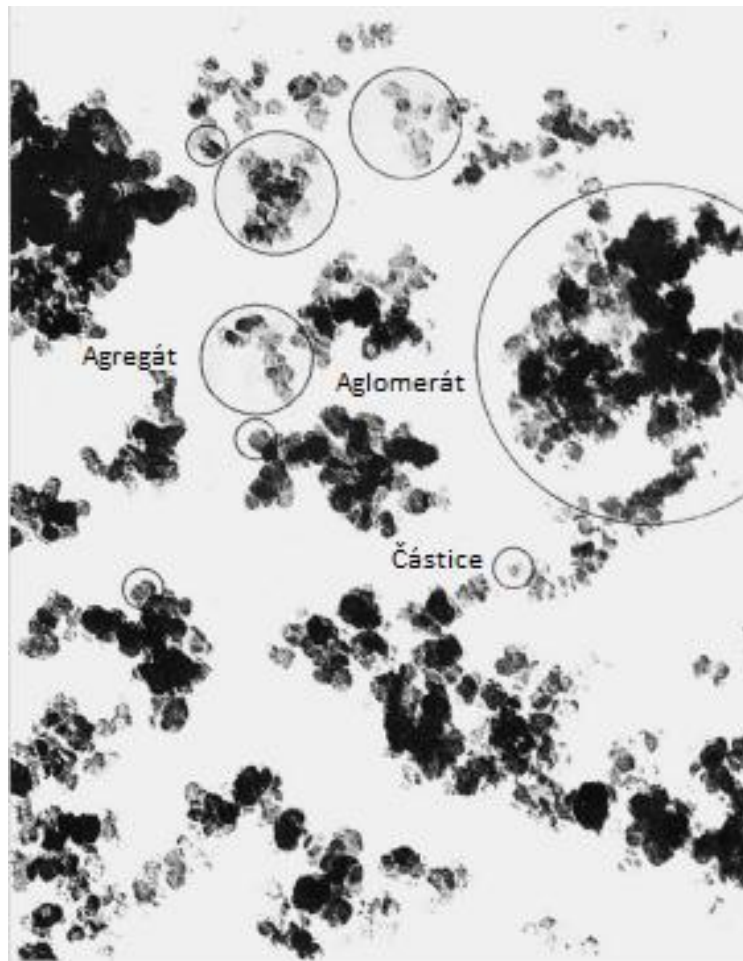
Obr. 2-2 - Ocelová vlákna [6]

2.2.2 Saze

Saze (Obr. 2-3) jsou formou amorfního uhlíku, který má velmi velký měrný povrch. Typy sazí lze charakterizovat rozložením velikosti primárních částic, stupněm jejich agregace a aglomerace a chemickými látkami adsorbovanými na povrchu částic. Průměry primárních částic sazí se pohybují v rozmezí od 10 nm až do 800 nm [7]. Výhodami sazí jsou nízká hmotnost, vysoká chemická a tepelná stabilita, trvalá elektrická vodivost a nízká cena.

V roce 2008 byla vyrobena cementová pasta s piezorestivitou přidáním acetylenových sazí do cementové pasty [8]. V rámci dalšího výzkumu byl vyráběn chytrý beton s přídavkem sazí o průměru 30 nm do běžného betonu [2]. V současné době jsou saze jedno z nejčastěji používaných funkčních plniv pro výrobu chytrého betonu.

Bylo zjištěno, že toto uhlíkové plnivo výrazně snižuje elektrický odpor cementové matrice. Přesnost měření rezistivity je vyšší, čím větší je procento obsahu sazí [9].



Obr. 2-3 – Saze [2]

2.2.3 Ocelářská struska

Ocelářská struska (Obr. 2-4) je vedlejším produktem ocelářského průmyslu. Vzniká ve velkém množství při výrobě oceli v elektrických obloukových pecích. Ocelářská struska může být také produkována tavením železné rudy ve vysoké peci. Ocelářská struska je podle způsobu ochlazování rozdělena na několik typů: ocelářská struska chlazená vzduchem, ocelářská struska zkrápěná vodou, ocelářská struska kalená vodou a ocelářská struska kalená vzduchem [2]. Většina těchto strusek obsahuje vysoké množství $Fe_{1-x}O$ a dalších oxidů kovů. $Fe_{1-x}O$ zahrnuje FeO , Fe_2O_3 a Fe_3O_4 , které jsou všechny nestechiometrické sloučeniny, takže $Fe_{1-x}O$ má vlastnosti polovodičů. Rezistivita FeO a Fe_3O_4 činí 5×10^{-2} a $4 \times 10^{-3} \Omega \cdot cm$, což je v podstatě stejné jako u uhlíkových vláken. Díky tomu má ocelářská struska dobré elektricky vodivé vlastnosti [10]. Ocelářská struska může být použita v betonu

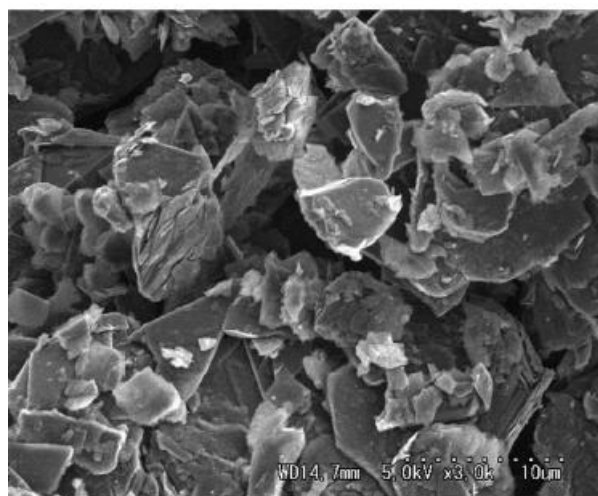
místo přírodního kameniva, protože má dobré mechanické vlastnosti a dochází k velmi dobré vazbě s pojivovou složkou betonu. Nahrazování některých nebo všech přírodních plniv ocelářenskou struskou pomáhá snižovat znečištění životního prostředí a spotřebu přírodních zdrojů [2]. Ocelářská struska je slibným druhem plniva, protože je možné ji používat jako plnivo funkční.



Obr. 2-4 - Ocelářská struska [11]

2.2.4 Grafitový prášek

Grafitový prášek (Obr. 2-5) je polymorfní modifikací uhlíku s vrstvenou, rovinnou strukturou. V každé vrstvě jsou atomy uhlíku uspořádány v hexagonální mřížce s délkou vazby 0,142 nm a vzdálenost mezi jednotlivými rovinami je 0,335 nm. Grafit je dobrý tepelný i elektrický vodič, je žáruvzdorný a chemicky stabilní [1].



Obr. 2-5 - Grafitový prášek [2]

2.2.5 Uhlíková vlákna

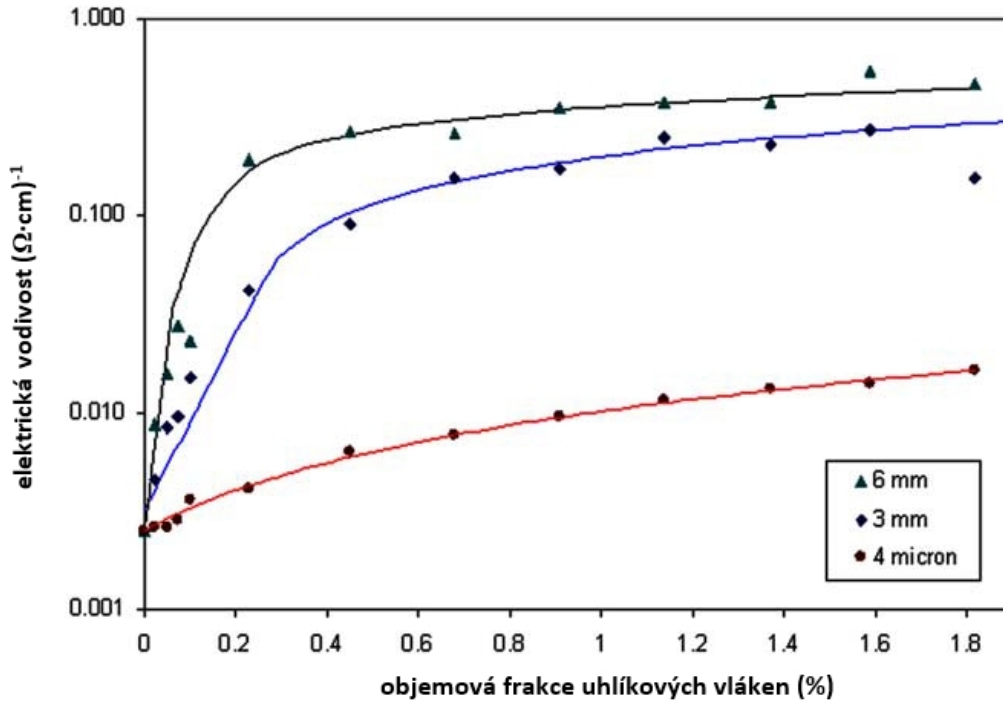
Uhlíková vlákna mají průměr 5–8 μm , mají vysokou pevnost, vysokou tepelnou odolnost, vysoký modul pružnosti a nízkou měrnou hmotnost.

Beton vyztužený uhlíkovými vlákny může sloužit jako chytrý konstrukční materiál, jehož elektrický odpor může být nedestruktivně sledován a mohou být detekovány případné defekty [12].

Přidáním uhlíkových vláken do běžného betonu dojde ke zlepšení jeho mechanických vlastností a také ke změně elektrické vodivosti. Materiál se tak sám stává senzorem, je odolný a umožňuje kontrolu celé konstrukce [10].

Experimentálně byl zkoumán elektrický odpor polymerů z cementu s uhlíkovými a ocelovými vlákny. Bylo zjištěno, že významný pokles odporu byl dosažen aplikací uhlíkových i ocelových vláken, nicméně uhlíková vlákna zvyšovala elektrickou vodivost lépe ve srovnání s vlákny ocelovými [13].

Experimentální studie ukázala, že přidání malého množství uhlíkových vláken do vzorků z cementové malty může způsobit významné zvýšení elektrické vodivosti materiálu. Objemová frakce vlákna, která způsobuje přechod z izolačního na vodivý materiál, perkolační práh, je nižší v případě délky vláken 6 mm než v případě délky vláken 3 mm. Navíc bylo možné prokázat, že přidáním většího množství vláken nad prahovou hodnotu nedochází k významnému zvýšení elektrické vodivosti materiálu (Obr. 2-6) [10].

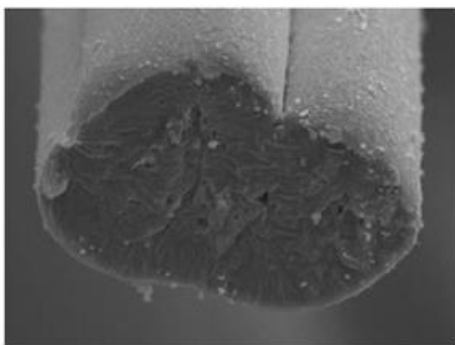


Obr. 2-6 - Vliv délky vláken na vodivost [10]

2.2.6 Uhlíková nanovlákná

Uhlíková nanovlákná (Obr. 2-7) jsou druhem uhlíkových vláken s průměrem od 10 nm do 500 nm a délkou od 0,5 mm do 200 mm. Mohou být buď dutá, nebo plná. Tato vlákna mají nízkou hustotu, vysokou pevnost, vysokou vodivost, tepelnou stabilitu, malý počet defektů, velký poměr stran a vysoký měrný povrch.

Vytvoření reaktivnějších skupin na povrchu nanovláken z uhlíku, které jsou vystaveny působení kyseliny dusičné, vede k lepší adhezi nanovláken v cementové pastě a v důsledku toho k vyšší hodnotě pevnosti v ohybu. Chemická modifikace nanovláken, jak s ozonem, tak s kyselinou dusičnou, mění povahu povrchu vláken z hydrofobního na hydrofilní a umožňuje kvalitní distribuci vláken v cementové pastě. V takovém případě není nutné použít jiné dispergátory nebo přísady k disperzi nanovláken v cementové matrici. Tepelné a elektrické zkoušky cementového kompozitu s nanovlákný prokázaly, že chemická modifikace povrchu uhlíkových nanovláken nemá vliv na tepelné vlastnosti kompozitu, ale zvyšuje jejich elektrický odpor [14].



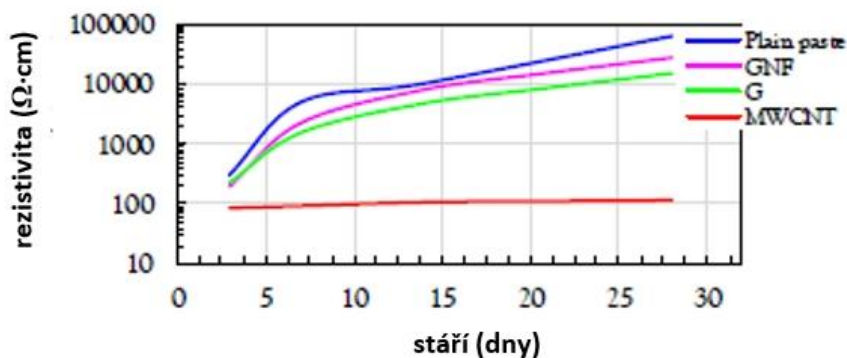
Obr. 2-7 - Uhlíkové nanovláknno [15]

2.2.7 Uhlíkové nanotrubičky (CNT)

Uhlíkové nanotrubičky jsou uměle vytvořenou modifikací uhlíku. Lze je pochopit jako jednu rovinu grafitu stočenou do válce. Tato molekula je bezešvá s otevřeným nebo uzavřeným koncem. Podle počtu soustředných uhlíkových rovin ve tvaru válce se uhlíkové nanotrubičky dělí na jednostěnné a mnohostěnné.

Aglomerace CNT je velmi důležitý faktor ovlivňující vodivost cementových kompozitů [16, 17]. Disperze uhlíkových nanotrubiček ultrazvukem není vhodná pro většinu aplikací a z tohoto důvodu se častěji využívají různá dispergační činidla pro dosažení dobré disperze CNT bez ultrazvuku [18].

Experimentálně byl zkoumán elektrický odpor v cementové pastě a cementových kompozitech s grafitovými nanovláknny a uhlíkovými nanotrubičkami. Bylo zjištěno, že elektrický odpor materiálu s grafitovými vlákny roste se stářím pojivové matrice. Naproti tomu kompozity s uhlíkovými nanotrubičkami vykazovaly pouze malou změnu elektrického odporu s rostoucím stářím kompozitu (Obr. 2-8) [19].



Obr. 2-8 - Závislost odporu na stáří matrice [19]

2.3 Způsoby měření elektrických vlastností kompozitů

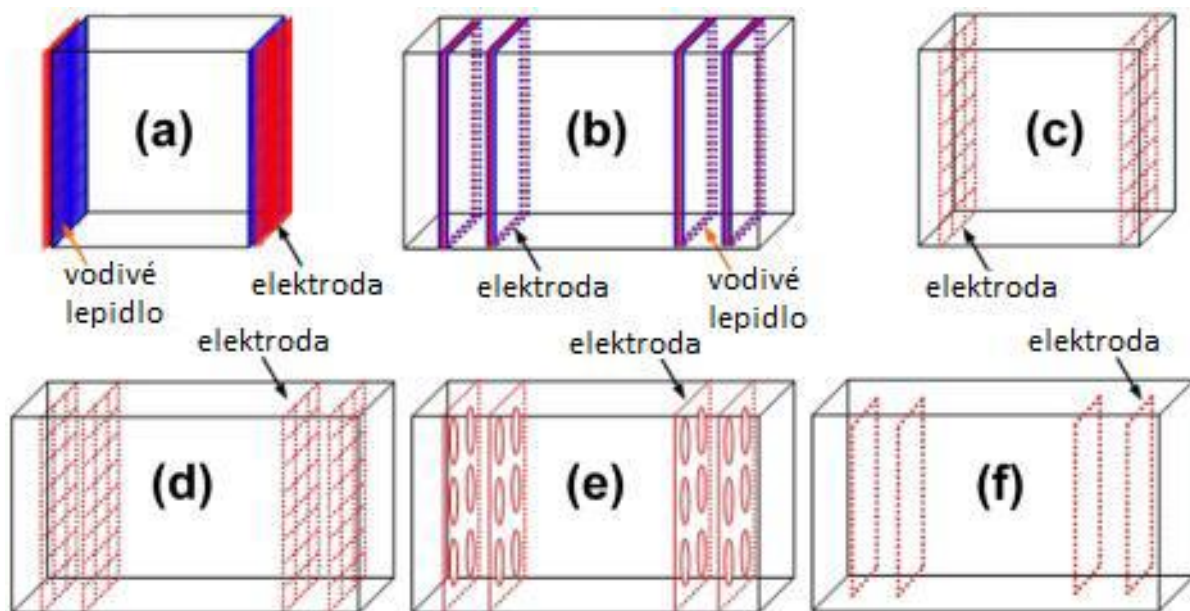
Senzorická vlastnost chytrého betonu vyplývá ze změny elektrické vodivosti uvnitř kompozitu, z čehož vyplývá, že elektrický odpor a měrný elektrický odpor jsou nejlépe schopni charakterizovat sensorické vlastnosti kompozitu [12]. Někteří výzkumníci navíc charakterizovali sensorické chování chytrého betonu pomocí dalších použitelných parametrů, např. reaktance, impedance, kapacita, povrchový elektrický odpor a relativní dielektrická konstanta [20]. Vzhledem k tomu, že elektrický odpor a měrný elektrický odpor jsou dva běžně používané parametry pro určení sensorického chování chytrého betonu, je zde popsáno jejich měření.

2.3.1 Elektrody pro měření elektrických vlastností

Elektrody slouží ke spojení chytrého betonu a měřicího zařízení. Jejich výroba je důležitá ve výzkumu a aplikaci chytrého betonu, protože elektrody mají přímý vztah s přesností měření snímacího signálu. Výroba elektrod pro chytrý beton zahrnuje tři aspekty: výběr materiálu elektrod, fixace elektrod a uspořádání elektrod [21].

Materiály elektrod by měly mít dvě základní charakteristiky: nízký elektrický odpor a stabilní elektrickou vodivost. Materiály používané jako elektrody do chytrého betonu v současnosti zahrnují zejména měď, nerez a olovo. Elektrody do chytrého betonu jsou obvykle ve dvou nebo čtyř elektrodovém uspořádání [22].

Předchozí experimenty ukazují, že způsob upevnění a uspořádání elektrod má přímý vliv na distribuci elektrického pole chytrého betonu, což ovlivňuje výsledky měření elektrického odporu [21, 23]. V současné době existuje šest snadno přístupných schémat upevnění a rozložení elektrod (Obr. 2-9). Elektrody jsou připevněny na povrchu chytrého betonu ve schématech (a) a (b) [24]. Tyto dvě schémata jsou široce používána při laboratorním měření sensorických vlastností chytrého betonu, protože nezhoršují jeho mechanické vlastnosti. Připojené elektrody se však velmi snadno oddělují od chytrého betonu. K překonání tohoto problému jsou navržena další čtyři schémata, c) až f). Vložené pletivo, perforovaná deska nebo smyčka mohou zajistit integritu elektrody i chytrého betonu. Kromě toho chytrý beton může zajistit ochranu vložených elektrod [25].



Obr. 2-9 - Rozmístění elektrod [20]

2.3.2 Elektrická vodivost

Existuje několik druhů elektrické vodivosti – elektronová a děrová vodivost, emise elektronů (tunelový jev) a iontová vodivost [26].

Elektronová vodivost je způsobena přímým kontaktem sousedních funkčních plniv, čímž vzniká vodivá vazba [20].

Tunelový jev vzniká, pokud se funkční plniva vzájemně nedotýkají, ale jsou dostatečně blízko, méně než 10 nm [27]. Tunelový jev je vyvolán silným lokálním elektrickým polem [28]. Většina plniv nedokáže vytvářet tak silné elektrické pole, avšak některá plniva s jedinečnou morfologií zvládnou takové pole vytvořit na ostrých špičkách. Jde především o CNT a niklový prášek [20].

Iontové vedení je realizováno v betonové matici, kde voda vyplňující dutiny může rozpouštět ionty, což vede k iontové vodivosti přes propojené kapilární póry. Tento typ elektrické vodivosti je velmi závislý na obsahu vody v chytrém betonu [29].

Pomocí závislosti proudu na napětí je možné určit, zda je v chytrém betonu dominantní elektronová vodivost nebo tunelový jev. Pokud je závislost proudu na napětí lineární, jedná se o dominanci elektronové vodivosti, zatímco exponenciální závislost indikuje dominanci tunelového jevu [20].

2.3.3 Rezistivita

Rezistivitu neboli měrný elektrický odpor ρ lze dle Ohmova zákona vyjádřit vztahem:

$$\rho = R \cdot \frac{S}{L}$$

kde R – elektrický odpor (Ω)

S – plocha průřezu (m^2)

L – vzdálenost mezi dvěma elektrodami (m)

Po diferencní úpravě a zanedbání velmi malých změn ve vzdálenosti elektrod L , získáme rovnici:

$$\frac{\rho - \rho_0}{\rho_0} = \frac{R - R_0}{R_0}; \frac{\Delta\rho}{\rho_0} = \frac{\Delta R}{R_0}$$

kde ρ_0 – počáteční rezistivita materiálu bez zatížení

R_0 – počáteční elektrický odpor materiálu bez zatížení

$\Delta\rho$ – změna rezistivity

ΔR – změna elektrického odporu

Z rovnice je zřejmé, že změna elektrického odporu materiálu při zatěžování je stejná jako změna rezistivity [30].

V souladu s uspořádáním elektrod existují metody měření elektrického odporu pro chytrý beton metodou dvou elektrod a metodou čtyř elektrod. Přestože metoda dvou elektrod má v porovnání se čtyřmi elektrodami jednodušší měřicí obvod, metoda čtyř elektrod je výhodnější než metoda dvou elektrod, protože může eliminovat odpor kontaktu mezi elektrodami a chytrým betonem. To bylo potvrzeno v mnoha experimentech na chytrém betonu s různými funkčními plnivý [10].

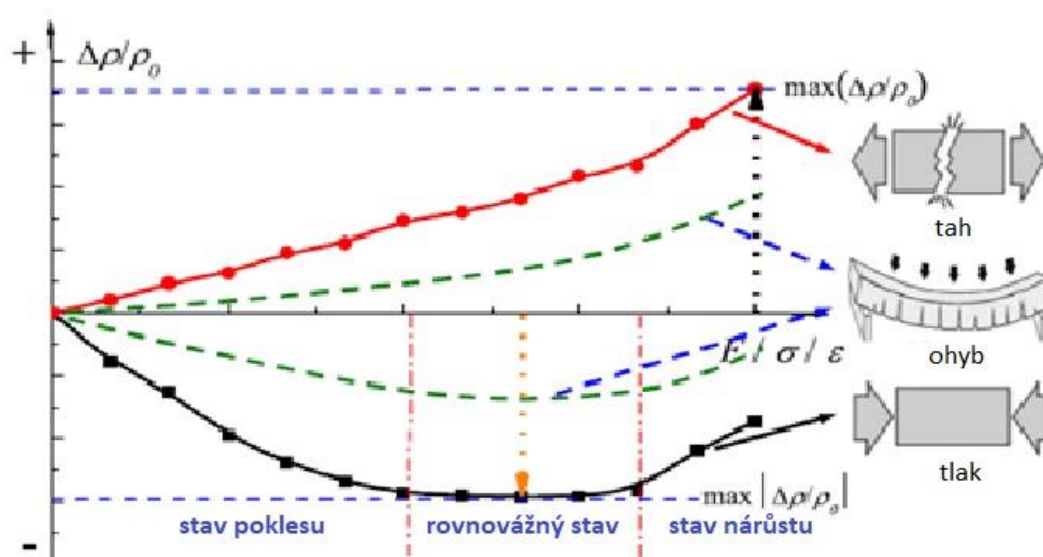
Na základě předchozích výsledků výzkumu se doporučuje metoda čtyř elektrod pro měření elektrického odporu chytrého betonu. Někteří vědci však poukázali na to, že ačkoliv naměřená hodnota elektrického odporu metodou dvou elektrod může být vyšší než skutečný odpor kompozitů v důsledku vlivu kontaktního odporu, nemá toto měření vliv na detekování změny elektrického odporu kompozitů při zatěžování [90]. Kromě toho je metoda dvou elektrod jednodušší a vhodnější pro použití než metoda čtyř elektrod. Proto je stále široce využívána ve výzkumu a aplikaci chytrého betonu [20].

Při měření elektrického odporu chytrého betonu pomocí metody čtyř elektrod nebo metody dvou elektrod je testování pomocí stejnosměrného proudu nejjednodušší. Nicméně pokud se používá elektrické pole stejnosměrného proudu během měření elektrického odporu, pohyb a rozložení iontů v betonové matici povede k elektrické polarizaci v kompozitu, jehož elektrická vodivost je ovlivněna iontovou vodivostí. Je obtížné přesně změřit změny elektrického odporu kompozitu způsobené externím zatížením pomocí měření stejnosměrným proudem. Jedním ze způsobů, jak zrušit polarizační účinek při měření elektrického odporu stejnosměrným proudem, je použití potenciálu stejnosměrného napětí ještě před zatížením kompozitního materiálu tak, aby po úplné polarizaci došlo k ustálení odporu. Další možností je použití střídavého proudu. I když polarizace může být pozorována také

u měření pomocí střídavého proudu, její účinek je snížen na přijatelný rozsah zvýšením frekvence nebo snížením amplitudy použitého střídavého napětí [31, 32].

2.4 Senzorické vlastnosti chytrého betonu při různém zatěžování

Chytrý beton vykazuje různé sensorické vlastnosti při různém zatěžování. Tyto vlastnosti a změny snímání budou popsány pro tlakové, tahové a ohybové namáhání v následujících kapitolách. Na Obr. 2-10 je znázorněno typické chování chytrého betonu při různých typech zatížení.



Obr. 2-10 - Snímací vlastnosti chytrého betonu při zatížení [20]

2.4.1 Tlak

Konstantní tlakové zatěžování způsobuje, že částice funkčního plniva se navzájem přibližují a tím zlepšují vodivost uvnitř chytrého betonu. Naopak vznik nových trhlin při zatěžování tlakem vede ke snížení elektrické vodivosti a rozšíření trhliny má pak za následek výraznou poruchu vodivosti [20].

Výsledkem cyklického tlakového zatěžování je, že elektrický odpor chytrého betonu na začátku každého cyklu není roven počátečnímu elektrickému odporu. Odchylka elektrického odporu od počátečního stavu je různá, v závislosti na amplitudě zatěžovací síly. Experimentálně bylo zjištěno [1, 27, 33, 34], že pokud je

amplituda zatěžovací síly menší než 30 % pevnosti chytrého betonu, tak výchozí elektrický odpor a změna elektrického odporu je vratná. Pokud je amplituda zatěžovací síly v rozmezí 30 % až 75 % pevnosti chytrého betonu, tak výchozí elektrický odpor je nevratný a změna elektrického odporu je vratná. Pokud je amplituda zatěžovací síly větší než 75 % pevnosti chytrého betonu, tak výchozí elektrický odpor i změna elektrického odporu je nevratná. Důvodem je rozsáhlé poškození matrice a poškození vodivé sítě uvnitř chytrého betonu.

2.4.2 Tah

Při konstantním zatížení tahem změna elektrického odporu roste, protože částice funkčního plniva se od sebe vzdalují a dochází k porušení vodivé sítě v chytrém betonu [20].

Při cyklickém zatížení tahem se změna elektrického odporu zvyšuje s nárůstem zatěžovací síly a klesá se snižující se hodnotou zatěžovací síly. Stejně jako u zatěžování tlakem, je změna elektrického odporu a výchozí elektrický odpor vratný při menších amplitudách a nevratný při větších amplitudách zatěžovací síly [35, 36, 37].

2.4.3 Ohyb

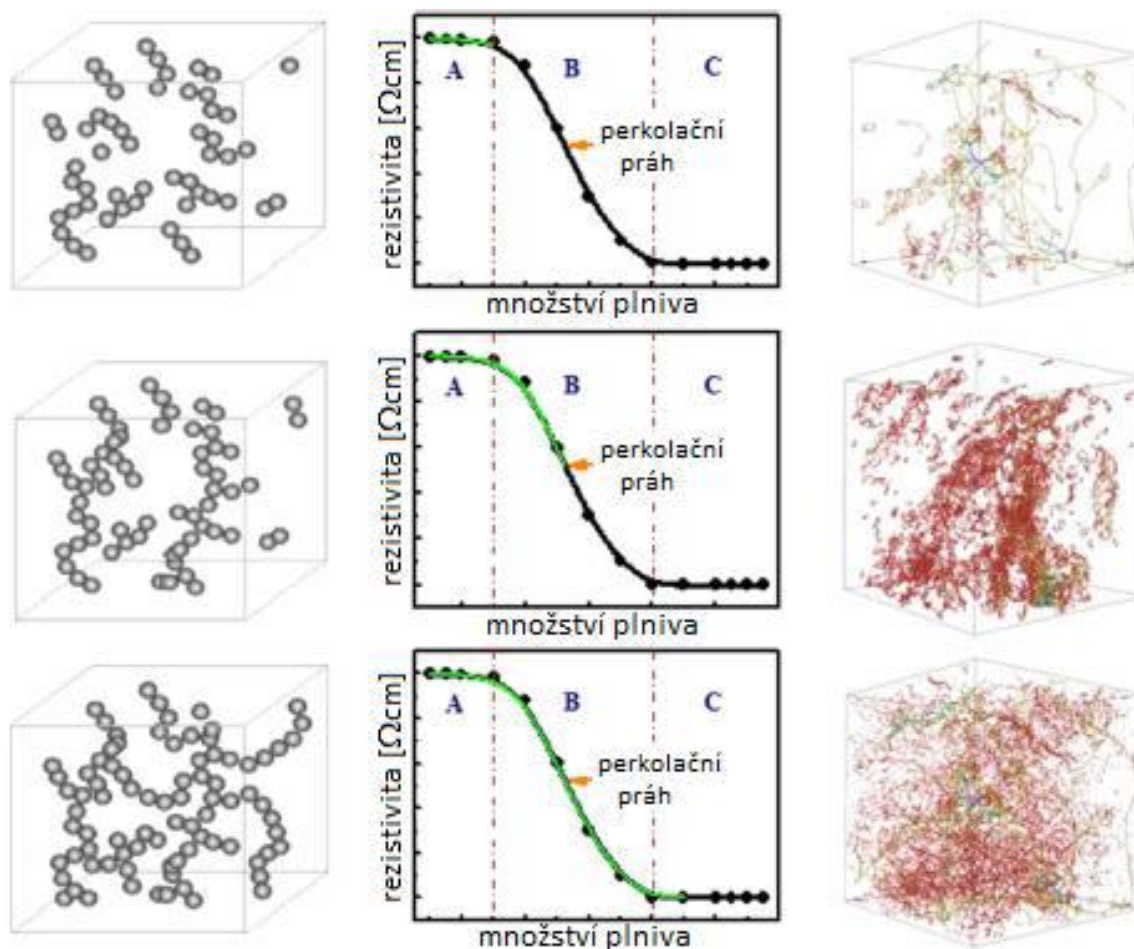
Pokud je zkušební trámec zatížen ve středové části s podporami na obou koncích, horní polovina průřezu je zatížena tlakem a spodní polovina tahem. Proto jsou sensorické vlastnosti při zatížení ohybem složením sensorických vlastností při zatížení tlakem a tahem. Velmi také záleží na složení chytrého betonu a na uspořádání elektrod [22, 38, 39].

2.4.4 Další faktory ovlivňující snímací vlastnosti chytrého betonu

Kromě vnějšího zatížení, mají vliv na elektrický odpor chytrého betonu i jiné faktory, například složení, technologie výroby chytrého betonu a podmínky prostředí.

2.4.4.1 Koncentrace funkčního plniva

Koncentrace funkčního plniva velmi ovlivňuje elektrickou vodivost a elektrický odpor uvnitř chytrého betonu. V důsledku toho velmi ovlivňuje i senzorické vlastnosti chytrého betonu. Bylo provedeno několik experimentů, kde byla zkoumána citlivost snímání v závislosti na koncentraci plniva při různém zatěžování (Obr. 2-11) [22, 40, 41].



Obr. 2-11 - Závislost elektrického odporu na koncentraci funkčního plniva [20]

2.4.4.2 Geometrický tvar funkčního plniva

Geometrický tvar funkčního plniva ovlivňuje elektrickou vodivost a vodivý mechanismus chytrého betonu. Některé experimenty se zabývaly vlivem tvaru funkčního plniva (tvar, struktura, délka, velikost, morfologie) na citlivost snímání chytrého betonu při různém zatěžování [22, 41, 42].

2.4.4.3 Rychlost zatěžování

Někteří výzkumníci studovali senzorické vlastnosti chytrého betonu s různými funkčními plnivý při zatěžování tlakem při různých zatěžovacích rychlostech. Prokázali, že senzorické vlastnosti chytrého betonu jsou závislé na rychlosti zatěžování [1, 3, 43, 44].

2.4.4.4 Obsah vody

Obsah vody uvnitř chytrého betonu závisí na mnoha faktorech (vlhkost a teplota prostředí, způsob vytvrzování betonu, struktura betonu) a ovlivňuje jeho elektrickou vodivost, a díky tomu i jeho senzorické vlastnosti [45, 46].

2.4.4.5 Teplota

Zvýšení nebo snížení teploty může vést k objemovým změnám chytrého betonu, vlivem čehož dojde ke změně vzdálenosti mezi částicemi funkčního plniva. Změny teploty také způsobí změnu energie elektronů a změnu obsahu vody v betonové matici. Obecně je změna elektrického odporu chytrého betonu v souladu se změnou teploty. Proto jsou senzorické vlastnosti chytrého betonu velmi ovlivněny teplotou [20].

2.4.4.6 Cyklické zmrazování

Cyklus zmrazování a rozmrazování způsobí opakovanou deformaci a následný vznik trhlin ve struktuře chytrého betonu. S nárůstem cyklů se trhliny akumulují a rozšiřují tak, že dojde k nevratné změně elektrického odporu chytrého betonu. V důsledku toho dojde i ke změně senzorických vlastností chytrého betonu [20].

2.4.4.7 Cyklická změna vlhkosti

V suchém stavu dominuje v matici elektronová vodivost, zatímco ve vlhkém stavu dominuje vodivost iontová. Při cyklické změně vlhkosti dochází ke zkrácení trvanlivosti chytrého betonu a ničí se vodivá síť uvnitř tohoto betonu. Důsledkem toho dochází ke zhoršení senzorických vlastností chytrého betonu [24, 47].

2.4.4.8 Korozivní prostředí

Při krátkodobém působení korozivního prostředí na chytrý beton dojde ke snížení elektrického odporu kvůli iontové permeabilitě, což může výrazně ovlivnit sensorické vlastnosti. Při dlouhodobém pobytu v korozivním prostředí už dochází k reakci agresivních iontů s vnitřní strukturou chytrého betonu, což způsobuje destrukci struktury betonu a degradaci jeho sensorických vlastností [24].

2.5 Využití kompozitů s plnivý

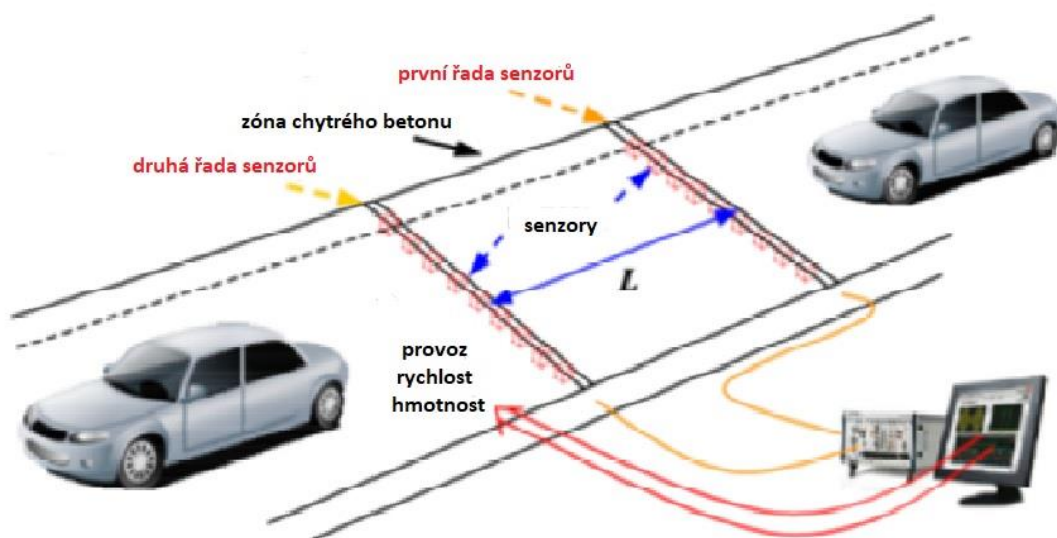
Existuje několik typů snímačů, které jsou v současné době k dispozici pro monitorování železobetonových konstrukcí: elektrické tenzometry, optické senzory a piezoelektrické snímače. Lokální zkoumání napětí, teploty a poškození železobetonových konstrukcí je možné pouze tehdy, když jsou výše uvedené senzory zakotveny nebo připojeny přímo ke konstrukcím. To omezuje monitorování celých konstrukcí a senzory je třeba aplikovat záměrně na nejslabší části konstrukcí. Nesprávná analýza určení nejslabších částí konstrukcí způsobí, že použití snímačů může být zbytečné [19].

Abychom překonali nevýhody zmíněných senzorů, někteří výzkumníci se pokoušeli vyvíjet piezorezistivní senzory na bázi cementu. Díky výrobě cementových kompozitů jako vodivého materiálu lze stav napětí nebo deformace v kompozitech předpovědět pomocí měřitelných změn elektrického odporu. Vzhledem k tomu, že tento snímač je založen na cementových kompozitech, není zde žádná heterogenita. Navíc monitorování celých konstrukcí vyrobených z betonu je možné zabudováním nanomateriálů na bázi uhlíku do betonové směsi, čímž je zajištěna elektrická vodivost a sensorické schopnosti [19].

Chytrý beton je zároveň konstrukční materiál a zároveň senzor. Může sledovat více parametrů, jako je napětí, deformace, poškození a trhliny. Chytrý beton tak poskytuje nový přístup k vyhodnocování bezpečnosti a trvanlivosti konstrukce během celé její životnosti. Chytrý beton lze také použít jako senzor pro silniční dopravu.

Má několik výhod oproti běžným detektorům, jako je vysoká přesnost detekce, vysoká odolnost, snadná instalace a údržba, dlouhá životnost a dobré konstrukční vlastnosti. Vozovky s chytrým betonem dokáží detekovat provozní data, jako jsou dopravní průtoky, rychlost vozidla, hustota provozu, a dokonce jsou schopny i vážení automobilů v pohybu. Chytrý beton tak poskytuje nový přístup k řízení a kontrole provozu a monitorování a posuzování stavu infrastruktury. Chytrý beton může být použit i pro vojenskou a hraniční bezpečnost, kontrolu korozní odolnosti armatur atd. Může zajistit bezpečnost, trvanlivost, provozuschopnost a udržitelnost konstrukcí, jako jsou výškové budovy, mosty s velkým rozpětím, tunely, vysokorychlostní železnice, přehrady a jaderné elektrárny [2].

Pro sledování provozu je možné využít cementový kompozit s uhlíkovými nanotrubičkami. Piezorestivní vlastnosti tohoto materiálu umožňují detekci mechanického namáhání vyvolaného dopravním tokem. Snímací schopnost byla zkoumána laboratorními testy a silničními zkouškami. Experimentální výsledky ukázaly, že vyráběný kompozit vykazuje citlivé a stabilní reakce na opakované tlakové zatížení. Tato zjištění naznačují, že tento cementový kompozit má velký potenciál pro sledování provozu, jako je detekce průtoku, vážení v pohybu a detekce rychlosti vozidla (Obr. 2-12) [25].



Obr. 2-12 - Monitorování provozu [25]

3 Experimentální část

V rámci experimentální části diplomové práce byla vyrobena zkušební tělesa, jejichž základem byla aluminosilikátová matrice z alkalicky aktivované strusky, plnivo z normalizovaného písku a různá vodivá plniva. Nejdříve byly vyrobeny zkušební trámce o rozměrech $40 \times 40 \times 160$ mm pro stanovení objemové hmotnosti a pevnosti v tlaku a v tahu ohybem. Jako hlavní zkušební tělesa byly vyrobeny trámce o rozměrech $100 \times 100 \times 400$ mm, které sloužily pro sledování elektrických vlastností daných materiálů při cyklickém zatěžování. První série zkušebních těles byla opatřena měděnými elektrodami, které byly vloženy do forem a následně zality připravenou maltou. Druhá série byla opatřena vnějšími elektrodami z měděných pásků, které byly na tělesa připevněny až před samotným měřením elektrických vlastností.

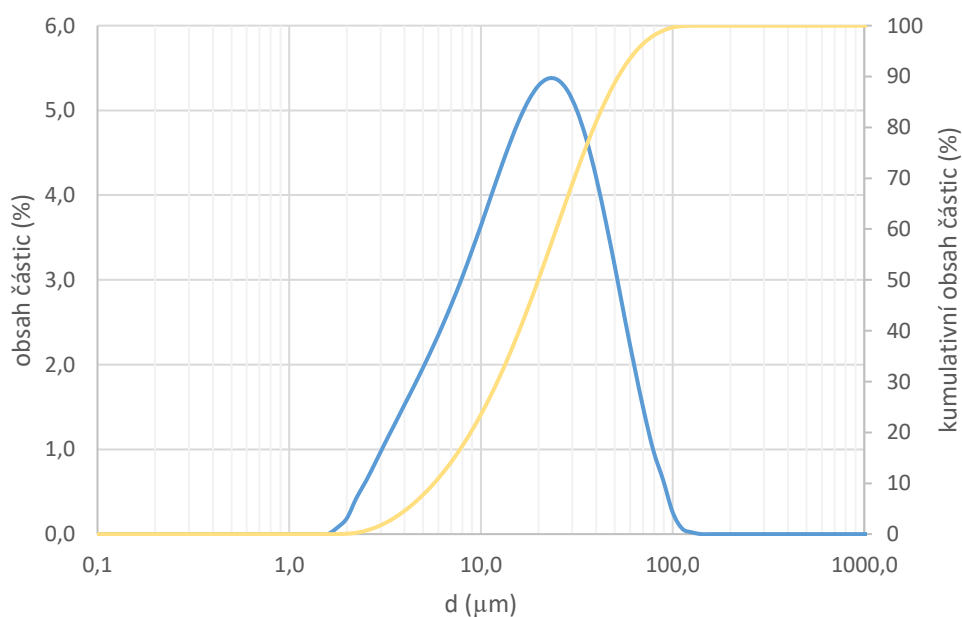
3.1 Použité suroviny

3.1.1 Struska

Jako součást matrice byla použita granulovaná vysokopecní struska SMŠ 400 od výrobce Kotouč Štramberk, spol. s r.o. Velmi jemně mletá granulovaná struska je práškové latentně hydraulické pojivo vyrobené semletím vysušené vysokopecní granulované strusky. Použitá struska má měrný povrch (dle Blaina) 395 m²/kg. Chemické složení použité strusky stanovené metodou XRF je v Tab. 3-1.

Tab. 3-1 - Mineralogické složení strusky

| složka | obsah (%) |
|--------------------------------|-----------|
| MgO | 9,934 |
| Al ₂ O ₃ | 8,543 |
| MnO | 0,242 |
| SiO ₂ | 36,720 |
| P ₂ O ₅ | 0,026 |
| TiO ₂ | 0,332 |
| CaO | 39,796 |
| Fe ₂ O ₃ | 0,096 |
| SO ₃ | 1,011 |



Obr. 3-1 - Granulometrická křivka strusky

3.1.2 Vodní sklo

K alkalické aktivaci granulované vysokopecní strusky bylo použito vodní sklo sodné – Susil MP 2,0 od výrobce Vodní sklo, a.s. Jde o pevné sušené sodné vodní sklo se silikátovým modulem (molární poměr $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$) 2,0. Vodní sklo bylo dávkováno jednotně, a to v množství 20 % z hmotnosti pojiva – vysokopecní strusky.

3.1.3 Normalizovaný písek CEN

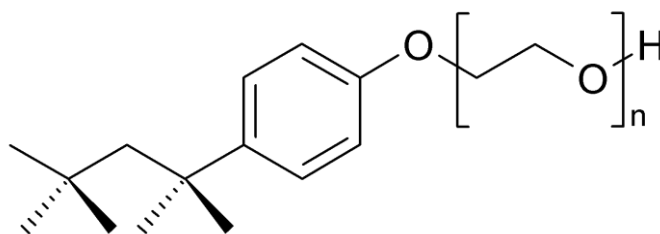
Při přípravě zkušebních těles byl jako plnivo použitý normalizovaný písek CEN, který se standardně používá pro normové zkoušky malt. Jedná se o přírodní křemičitý písek se zaoblenými zrny a obsahem nejméně 98 % SiO_2 .

Tab. 3-2 - Zrnitost normalizovaného písku CEN

| | | | | | | |
|--------------------|------|------|------|------|------|------|
| Oko síta (mm) | 2,00 | 1,60 | 1,00 | 0,50 | 0,16 | 0,08 |
| Zbytek na síti (%) | 0 | 7±5 | 33±5 | 67±5 | 87±5 | 99±1 |

3.1.4 Triton X-100

Triton X-100 je čirá viskózní tekutina, která je rozpustná ve vodě a alkoholech. V rámci experimentu byl použit ve všech směsích (kromě CNT) jako detergent pro kvalitnější dispergaci částic vodivých plniv ve směsích.



Obr. 3-2 - Konstituční vzorec Tritonu X-100

3.1.5 Lukosan

U některých směsí, které při míchání vykazovaly vyšší pěnovost, byl použit 2% vodný roztok Lukosanu sloužící jako odpěňovací činidlo. Lukosan S je homogenní směs metylsilikonového oleje a aerogelu oxidu křemičitého.

3.1.6 Saze

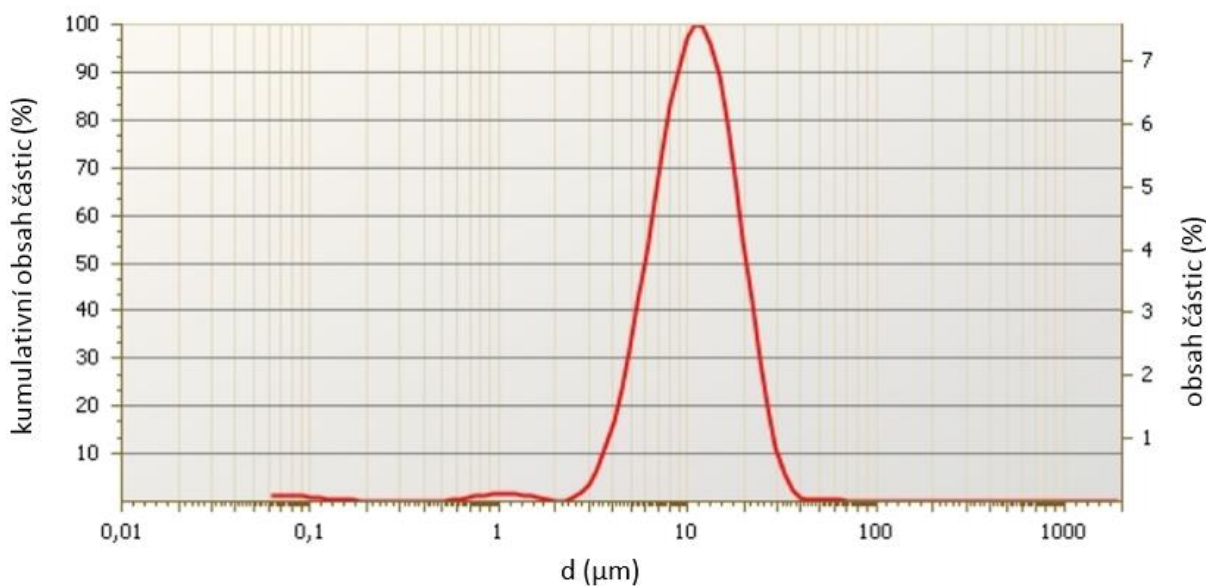
Jako vodivé plnivo ve formě sazí byl použit produkt Vulcan 7H od společnosti Cabot CS.

Tab. 3-3 - Technické parametry sazí

| | |
|-----------------------|-----------------------|
| pevnost v tahu | 21 MPa |
| protažení | 585 % |
| měrný povrch | 113 m ² /g |

3.1.7 Grafit

Jako vodivé plnivo byl použit grafitový prášek PMM 11 od společnosti KOH-I-NOOR Hardtmuth. Jde o velmi jemný krystalický grafitový prášek s vysokým obsahem uhlíku. Granulometrická křivka grafitového prášku je znázorněna na Obr. 3-3.



Obr. 3-3 - Granulometrická křivka grafitového prášku

3.1.8 Uhlíková vlákna

Jako další vodivé plnivo byla použita uhlíková vlákna A HT C124 od společnosti TOHO Tenax. Tato vlákna jsou rozmíchatelná ve vodě a jejich parametry jsou uvedeny v Tab. 3-4.

Tab. 3-4 - Technické parametry uhlíkových vláken

| | |
|-------------------------|------------------------|
| délka vlákna | 3 mm |
| průměr vlákna | 7 μm |
| objemová hustota | 360 g/l |
| hustota | 1,76 g/cm ³ |
| pevnost v tahu | 4000 MPa |
| protážení | 1,7 % |

3.1.9 Uhlíkové nanotrubičky

V rámci experimentu byly použity uhlíkové nanotrubičky GRAPHISTRENGTH CW2-45 od společnosti Arkema. Jde o směs obsahující 45 % mnohostěnných uhlíkových nanotrubiček dispergovaných v 55 % karboxymethylcelulózy ve formě pelet. Před samotnou aplikací do čerstvé maltové směsi byl z pelet vytvořen 1% vodný roztok. Roztok byl připraven rozpuštěním pelet v horké vodě a homogenizací v mechanickém homogenizátoru při rychlosti 14000 ot./min po dobu 2 hodin. Dle výrobce je možné dosáhnout rezistivity $10 - 10^8 \Omega \cdot \text{cm}$ (dle použití).

3.2 Příprava vzorků

Veškeré směsi byly míchány v laboratorních podmínkách. Vzhledem k většímu objemu směsí bylo k míchání využito ruční elektrické míchadlo pro přípravu maltových směsí. Při míchání jednotlivých komponent se v míchací nádobě nejdříve rozmíchalo sušené vodní sklo s částí vody, vodivým plnivem a tritonem. Poté byla přimíchána struska a jednotlivé frakce normalizovaného písku od nejjemnější po nejhrubší. Voda byla přidávána postupně podle konzistence. U směsí, u kterých docházelo k napěnění, byl přidán odpeňovač Lukosan, který byl přimíchán s poslední částí záměsové vody. Každá takto připravená směs byla naplněna do jedné ocelové trojformy (40 × 40 × 160 mm) pro zkoušky mechanických vlastností a do jedné ocelové formy (100 × 100 × 400 mm) pro zkoušky elektrických vlastností. Při výrobě první série zkušebních trámů byly do forem vloženy 4 elektrody z měděného pletiva, které byly ukotveny pomocí speciálně vyrobených fixátorů z vodovzdorné překližky a následně

zality hotovou směsí. Všechna zkušební tělesa byla odformována po 24 hodinách od namíchání a následně uložena na 28 dní do vody. Zkušební trámce pro měření elektrických vlastností byly po vyjmutí z vodního uložení umístěny na 5 dní do laboratorní sušárny při teplotě 60 °C.

3.3 Složení směsí

Tab. 3-5 - Složení směsí v gramech

| směs | struska | susil | písek | grafit | saze | CNT | uhlíková vl. | triton | lukosan | voda |
|---------|---------|-------|-------|--------|------|-----|--------------|--------|---------|------|
| REF | 2400 | 480 | 7200 | - | - | - | - | - | - | 1000 |
| G-3 | 2400 | 480 | 7200 | 72 | - | - | - | 40 | 28 | 970 |
| G-10 | 2400 | 480 | 7200 | 240 | - | - | - | 160 | 108 | 940 |
| S-2 | 2400 | 480 | 7200 | - | 48 | - | - | 48 | - | 1060 |
| S-4 | 2400 | 480 | 7200 | - | 96 | - | - | 96 | - | 1200 |
| S-6 | 2400 | 480 | 7200 | - | 144 | - | - | 144 | - | 1280 |
| CNT-0,1 | 2400 | 480 | 7200 | - | - | 240 | - | - | - | 780 |
| CNT-0,2 | 2400 | 480 | 7200 | - | - | 960 | - | - | - | 30 |
| V-1 | 2700 | 540 | 8100 | - | - | - | 27 | 27 | 30 | 1100 |
| V-2 | 2700 | 540 | 8100 | - | - | - | 54 | 54 | 60 | 1200 |

3.4 Měření a měřící zařízení

3.4.1 Pevnost v tlaku a pevnost v tahu ohybem

Stanovení pevností v tlaku a tahu ohybem bylo provedeno dle normy ČSNE EN 196-1 Metody zkoušení cementu – Část 1: Stanovení pevnosti. Jako zkušební zařízení byl použit lis Tonindustrie Prüftechnik D-1000 (Tonitechnik, Berlin).

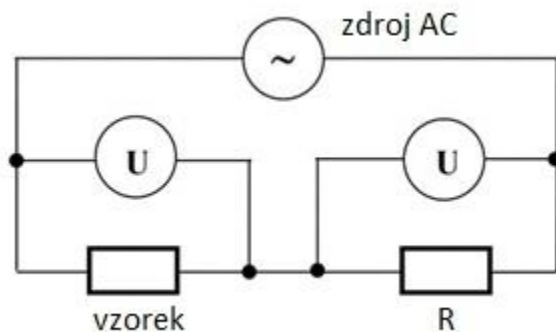
3.4.2 Snímky mikrostruktury

Snímky mikrostruktury zkušebních vzorků byly pořízeny na úlomcích z pevnostních zkoušek. Vzorek byl vysušen a poté pokoven zlatem. Snímkování bylo provedeno na rastrovacím elektronovém mikroskopu Tescan MIRA3 XMU, v režimu SE. Urychlovací napětí bylo nastaveno na 20,0 kV.

3.4.3 Elektrický odpor při cyklickém zatěžování

Zkušební trávce o velikosti $100 \times 100 \times 400$ mm byly cyklicky zatěžovány v elektromechanickém lisu Heckert FPZ 100. Byl zvolený rozsah 10 kN a konstantní posun. Všechny zkušební trávce kromě směsí obsahující saze byly zatěžovány do hodnoty 1,6 kN. Zkušební trávce, které byly ze směsí obsahující jako vodivé plnivo saze, byly z důvodu dříve zjištěné nižší pevnosti zatěžovány do hodnoty 0,6 kN.

Pro měření elektrického odporu zkušebních trávců při cyklickém zatěžování byl použitý generátor sinusových signálů Agilent 33220A a dva multimetry Agilent 34410A. Tyto přístroje byly zapojeny podle Obr. 3-4 a připojeny pomocí USB rozhraní k počítači pro plně automatizované měření. Napětí sinusového generátoru bylo nastaveno na 5 V a elektrický proud byl vypočítán z napětí měřeného na jednom z voltmetrů a z referenčního odporu R , který byl 6796Ω . Elektrický odpor měřeného vzorku byl vypočítán pomocí Ohmova zákona z elektrického proudu procházejícího přes rezistor a z napětí, které bylo měřeno odděleně na zkušebním vzorku.

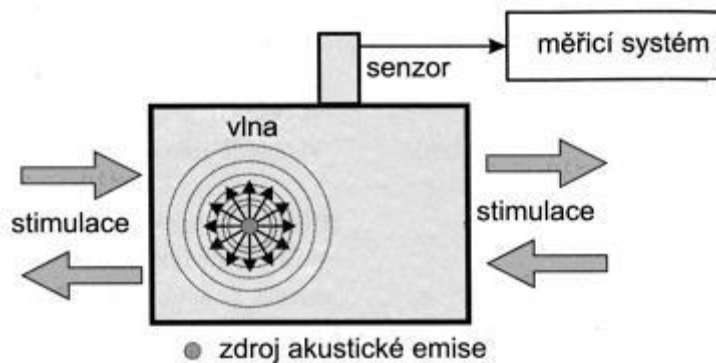


Obr. 3-4 - Schéma zařízení pro měření elektrického odporu

3.4.4 Akustická emise

Metoda akustické emise slouží k monitorování vzniku poruch a trhlin uvnitř materiálů. Na rozdíl od většiny dalších metod pro nedestruktivní testování sleduje pouze aktivní defekty probíhající uvnitř sledované struktury. Tyto poruchy mohou vzniknout pouze při zatížení sledované struktury. K akustické emisi dochází ve zdroji

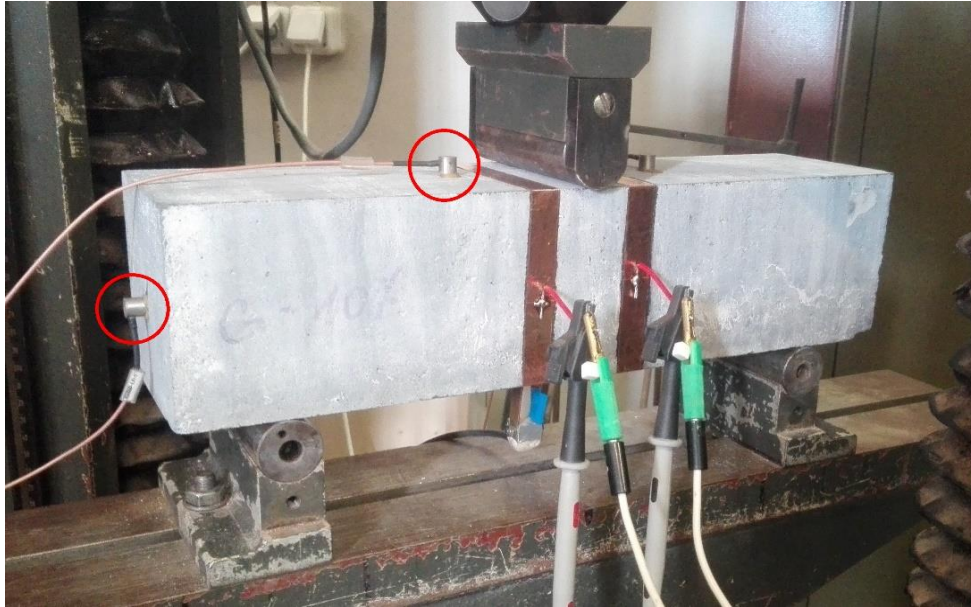
akustické emise při uvolnění energie vlivem stimulace vnitřním nebo vnějším napětím, jak je znázorněno na Obr. 3-5.



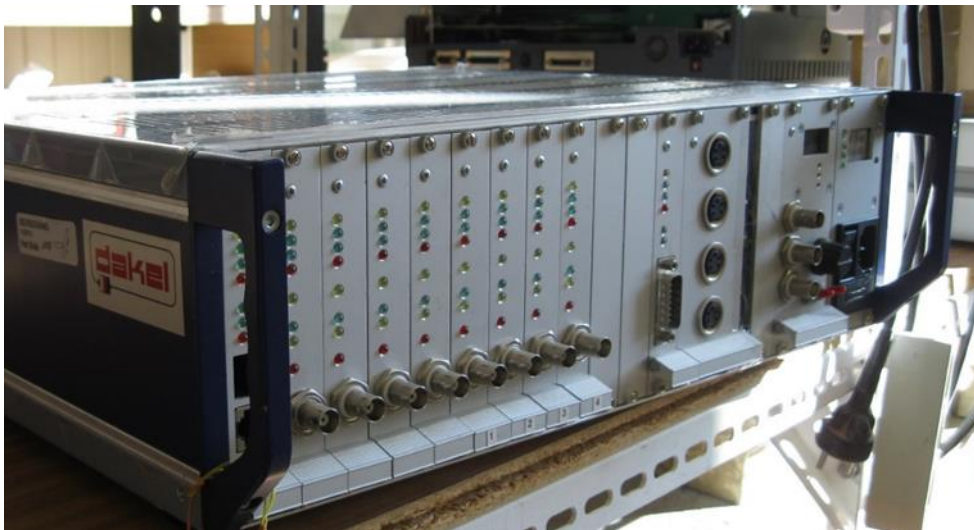
Obr. 3-5 - Schéma vzniku akustické emise

Uvolněná energie se přemění na mechanický napěťový impuls, který se šíří materiálem jako podélná nebo příčná vlna. V okamžiku, kdy vlna dopadne na povrch materiálu, částečně se odrazí a částečně dojde k její transformaci. Signál detekovaný na snímači akustické emise a převedený na elektrický se označuje jako signál akustické emise. Metoda akustické emise se liší od většiny metod nedestruktivního testování ve dvou směrech – signály vznikají v materiálu samotném, a ne z vnějšího zdroje a také metoda akustické emise detekuje vznikající defekty, zatímco většina metod detekuje již existující geometrické nespojnosti.

Při sledování akustické emise na zkušebních trámcích byla použita ústředna Dakel Xedo a snímače IDK-09 s 35dB předzesilovačem, které byly k trámcům přichyceny včelím voskem.



Obr. 3-6 - Připevnění snímačů akustické emise



Obr. 3-7 - Zařízení pro záznam akustické emise

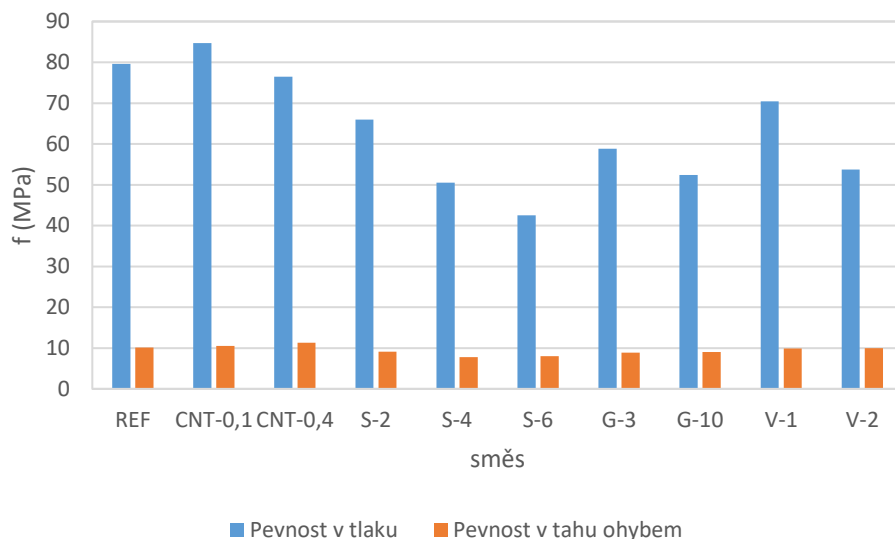
3.5 Výsledky měření

3.5.1 Mechanické vlastnosti

Tab. 3-6 - Mechanické vlastnosti testovaných směsí

| směs | f_c (MPa) | f_{ct} (MPa) | OH (kg/m ³) |
|---------|-------------|----------------|-------------------------|
| REF | 79,6 | 10,1 | 2240 |
| CNT-0,1 | 84,7 | 10,5 | 2220 |
| CNT-0,4 | 76,5 | 11,3 | 2310 |
| S-2 | 66,0 | 9,1 | 2240 |
| S-4 | 50,5 | 7,8 | 2160 |
| S-6 | 42,5 | 8,0 | 2100 |
| G-3 | 58,8 | 8,9 | 2250 |
| G-10 | 52,4 | 9,0 | 2210 |
| V-1 | 70,4 | 9,9 | 2250 |
| V-2 | 53,7 | 10,0 | 2190 |

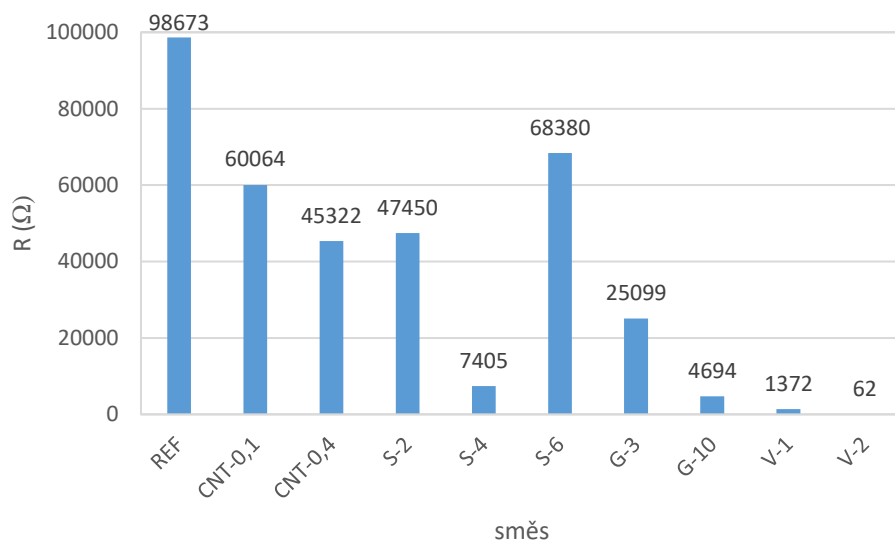
Dle Tab. 3-6 je zřejmé, že přidavek všech vodivých plniv má negativní vliv na pevnost v tlaku. U směsí se stejným plnivem, ale rozdílným obsahem jde vidět, že čím vyšší je obsah vodivého plniva ve směsi, tím je pevnost v tlaku nižší. Nejvíce se tento jev projevil u směsí s obsahem sazí, kde je pevnostní rozdíl 23,5 MPa při navýšení obsahu sazí z 2 % na 6 %. Pouze u směsi s obsahem 0,1 % uhlíkových nanotrubiček došlo ke zvýšení pevnosti v tlaku o 5,1 MPa, nicméně při zvýšení obsahu nanotrubiček na 0,4 % dochází opět ke snížení. Pevnost v tahu ohybem a objemová hmotnost se vlivem přídatku vodivých plniv výrazně nemění.



Obr. 3-8 - Pevnosti v tlaku a v tahu ohybem

3.5.2 Elektrické vlastnosti

3.5.2.1 Referenční odpory



Obr. 3-9 - Srovnání referenčních odporů

V grafu na Obr. 3-9 jsou znázorněny referenční odpory jednotlivých směsí. Jde o hodnotu elektrického odporu v nulovém čase na počátku cyklického mechanického zatěžování. Nejvyšší hodnotu elektrického odporu vykazuje referenční směs, která neobsahovala žádné vodivé plnivo. Výrazné výkyvy hodnot v rámci směsí s různým

obsahem stejného vodivého plniva jsou pravděpodobně způsobeny nedostatečnou homogenizací vodivého plniva ve vzorku.

3.5.2.2 Cyklické zatěžování

V rámci experimentální části byly vytvořeny dvě sady zkušebních těles pro měření elektrických vlastností. Z důvodu nedostatku některých surovin případně měděných elektrod byly jednotlivé směsi v první sadě míchány s odstupem několika dní až týdnů. Z tohoto důvodu vyplynula různě dlouhá doba ošetřování (uložení ve vodním prostředí, sušení) zkušebních trámců. Následné měření vykazovalo velké rozdíly a anomálie ve výsledcích. Při zatěžování první sady vzorků, u které byly měděné elektrody zabudovány přímo do trámců, docházelo k předčasnému porušení vzorků právě v místech zabudování elektrod, které zde sloužily jako koncentrátor napětí.

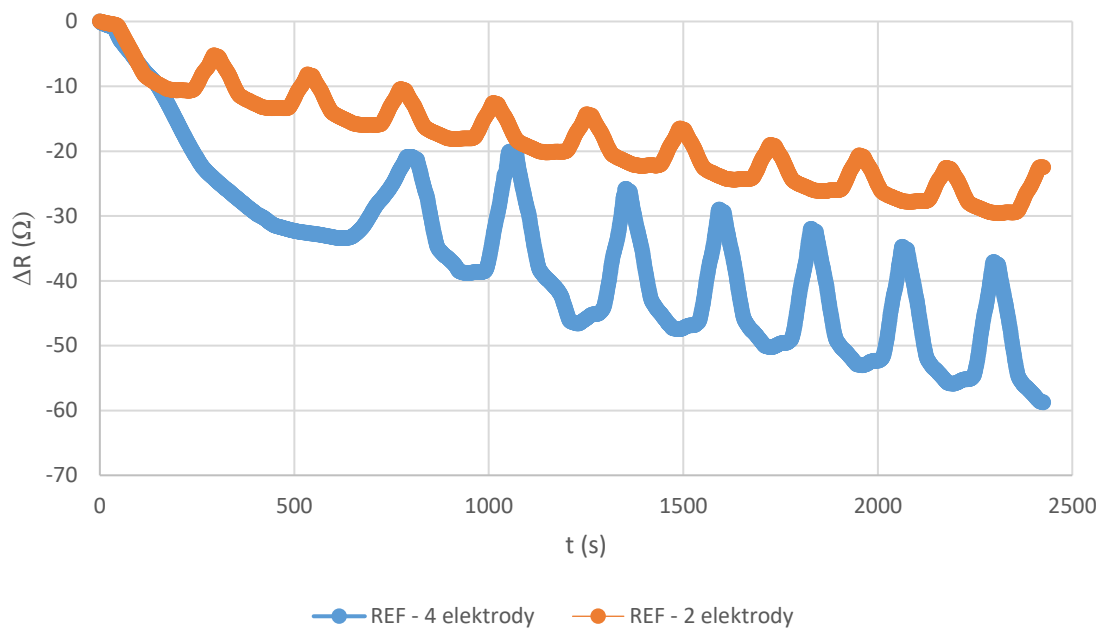


Obr. 3-10 - Měděné elektrody uvnitř trámce

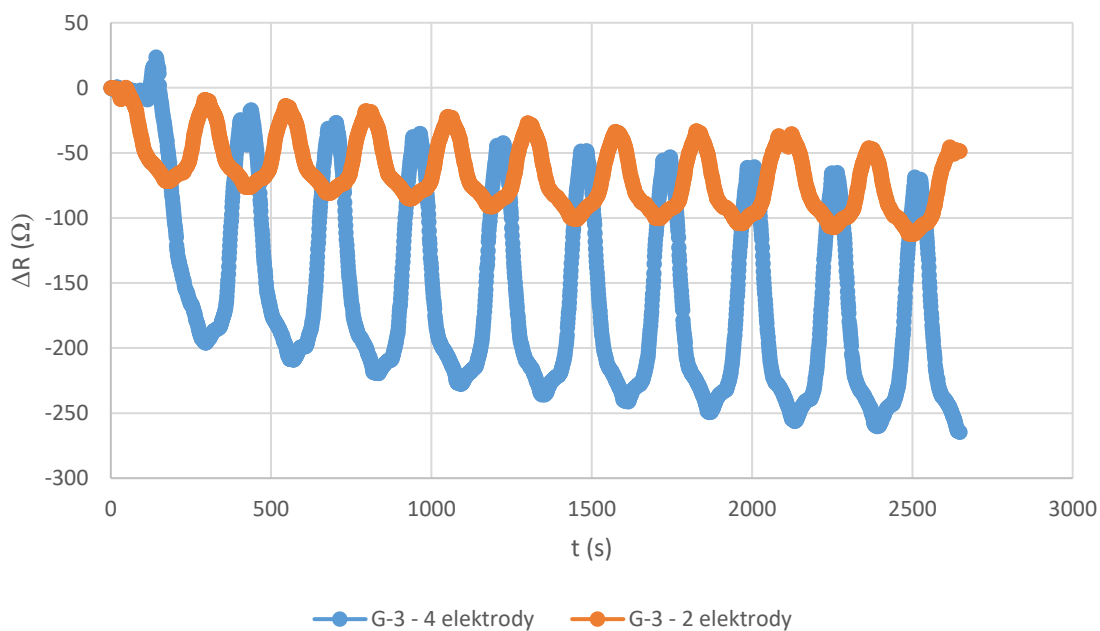


Obr. 3-11 - Porušení trámčů v místě elektrody

U dvou směsí bylo vyzkoušeno měření elektrických vlastností jak pomocí dvou, tak čtyř elektrod. Na grafech na Obr. 3-12 a Obr. 3-13 je patrné, že průběh křivek znázorňujících změnu odporu ΔR je víceméně shodný (s rozdílem citlivosti), proto by pro další měření zvolen jednodušší způsob měření pouze pomocí dvou vnitřních elektrod. Vzájemné horizontální posunutí křivek pro 2 a 4 elektrody je způsobeno rozdílnou rychlostí zatěžování, které bylo prováděno na starém manuálně ovládaném lisu.



Obr. 3-12 - Změna odporu na referenční směsi měřená na 2 a 4 elektrodách



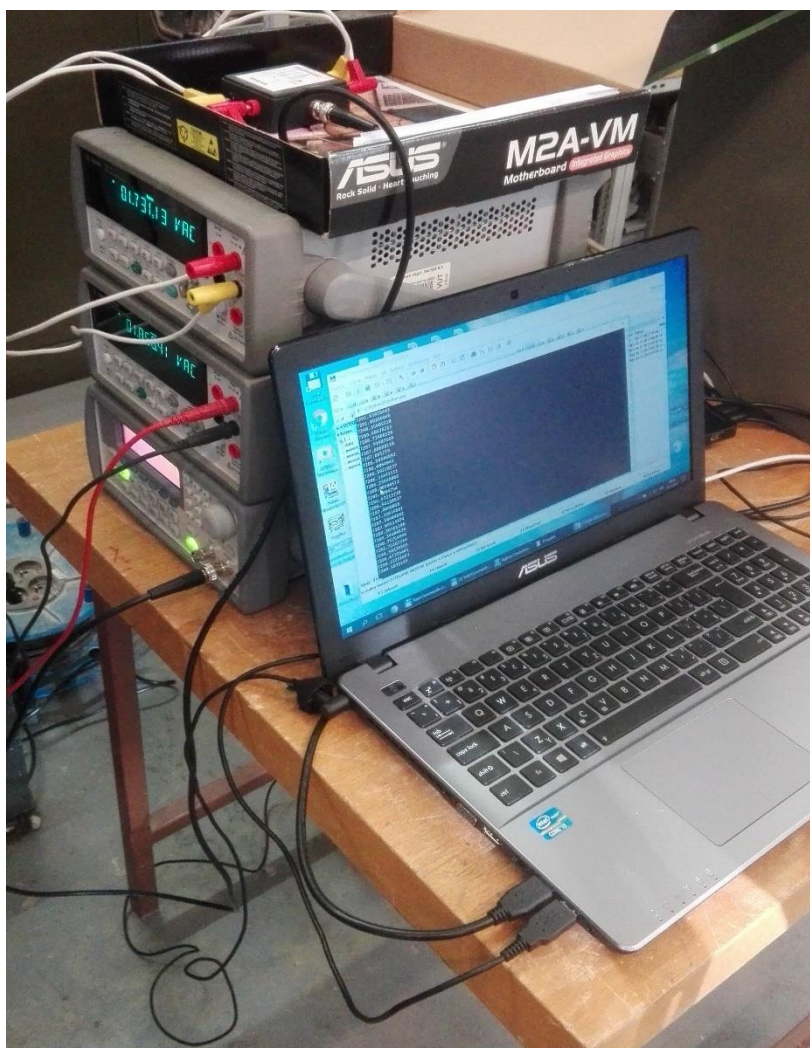
Obr. 3-13 - Změna odporu směsi s 3 % grafitu měřená na 2 a 4 elektrodách

Příprava, ošetřování i měření u druhé sady vzorků probíhalo u všech trámčů ve stejný čas a stejně dlouhou dobu, proto jsou výsledky měření kvalitnější a lépe srovnatelné. Vzhledem k negativní zkušenosti s elektrodami zabudovanými do trámčů byl u druhé sady vzorků zvolen jiný typ měřících elektrod – měděné pásky

nalepené na povrch trámců až před samotným měřením. Postup připevnění elektrod je znázorněn na Obr. 3-14.

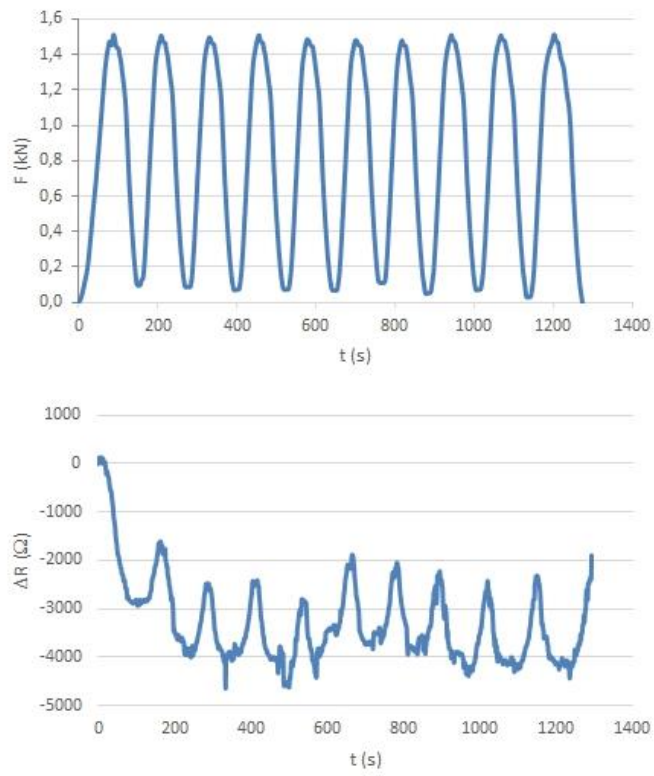


Obr. 3-14 - Fáze připevňování měděných elektrod na povrch trámců

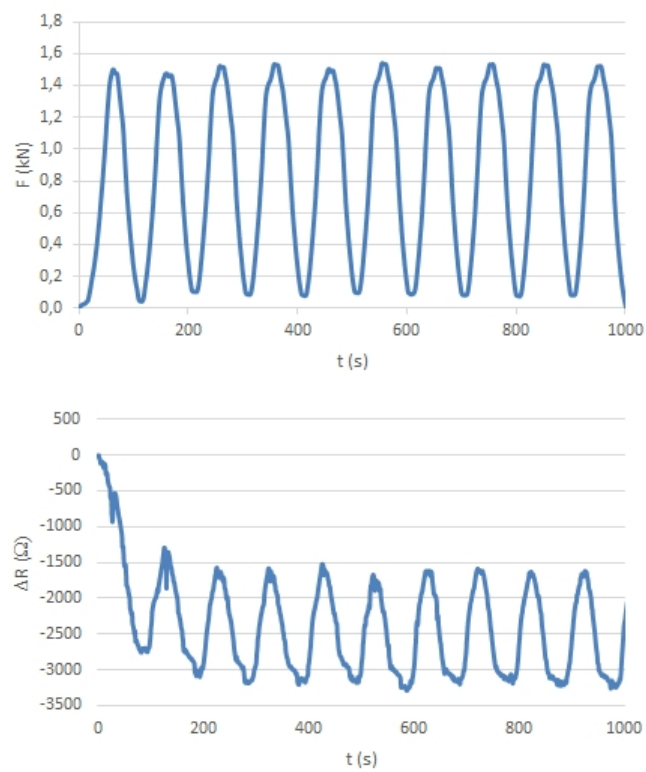


Obr. 3-15 - Zařízení pro měření elektrického odporu

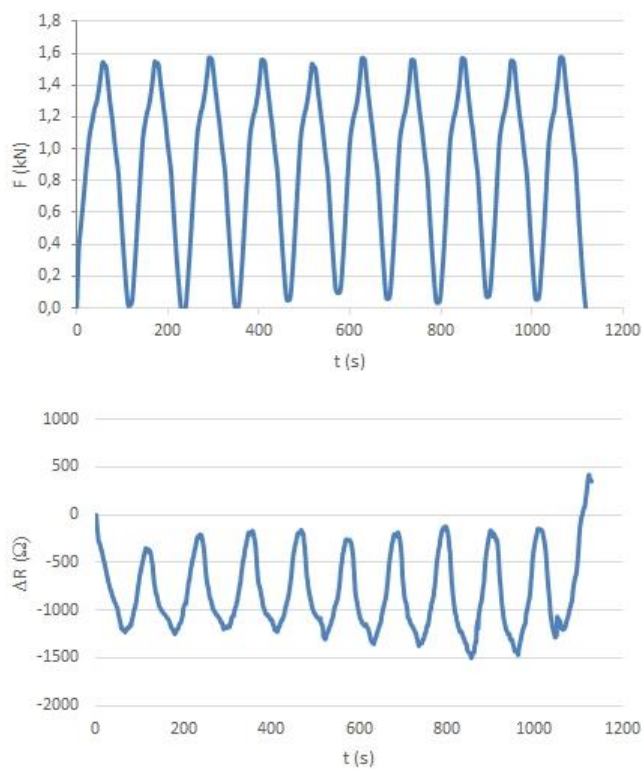
Na následujících grafech je znázorněn průběh změny elektrického odporu ΔR při cyklickém zatěžování zkušebních trámčů ze všech směsí tříbodovým ohybem.



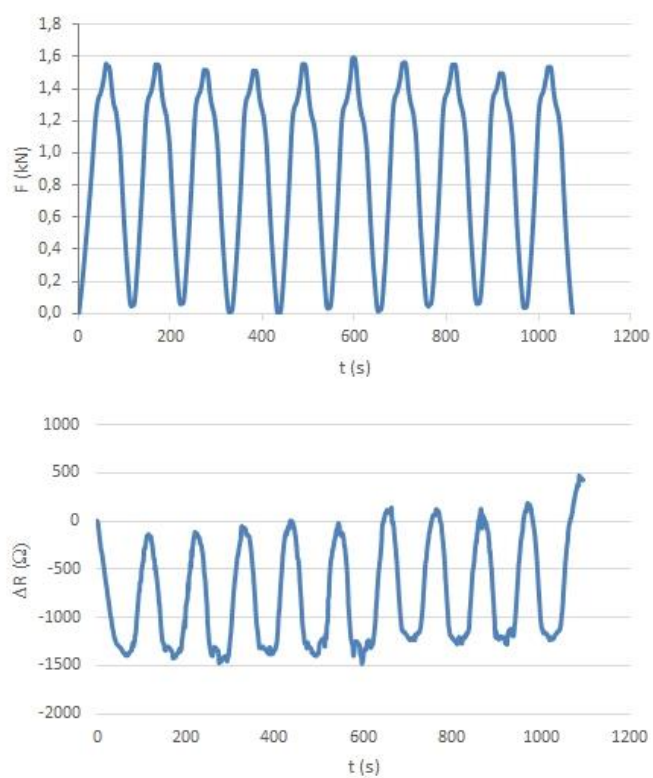
Obr. 3-16 - Referenční směs



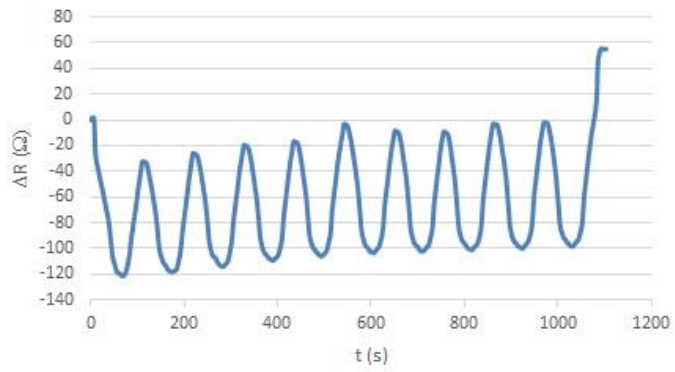
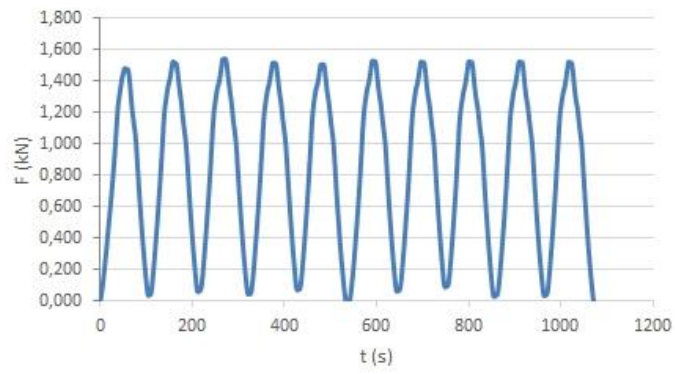
Obr. 3-17 - Směs s 0,1 % CNT



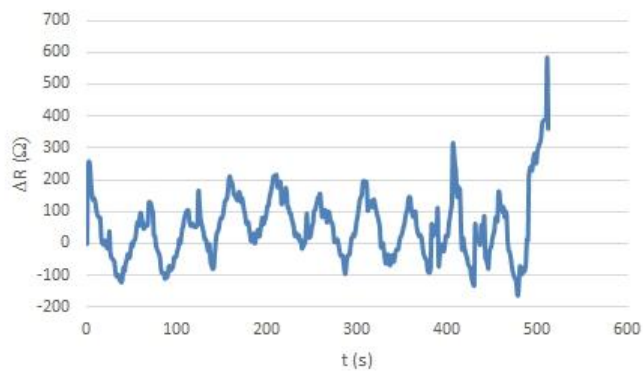
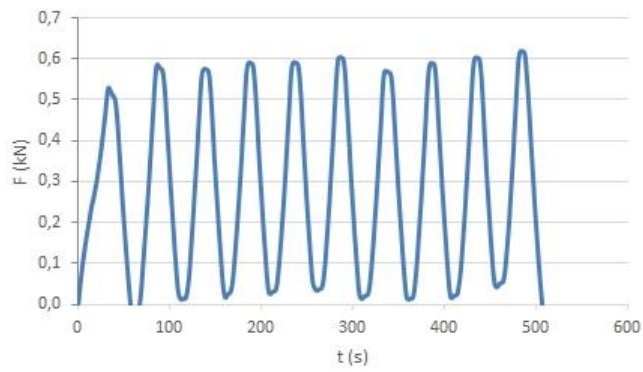
Obr. 3-18 - Směs s 0,4 % CNT



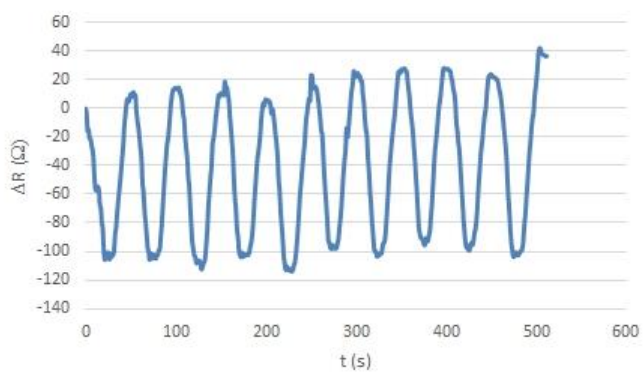
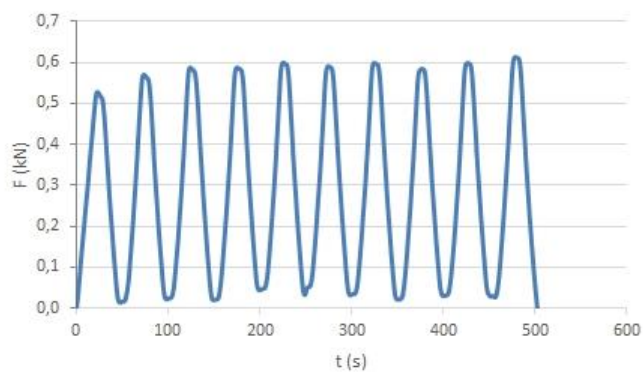
Obr. 3-19 - Směs s 3 % grafitového prášku



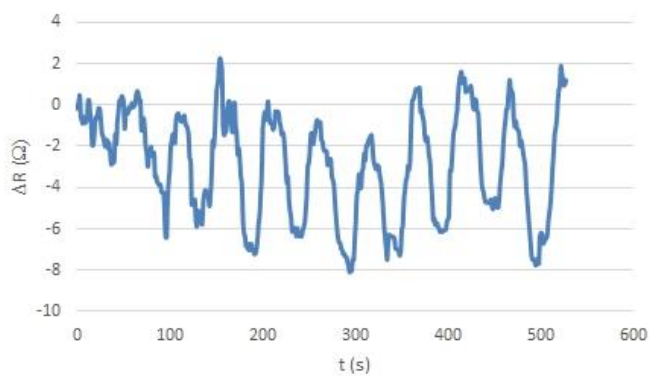
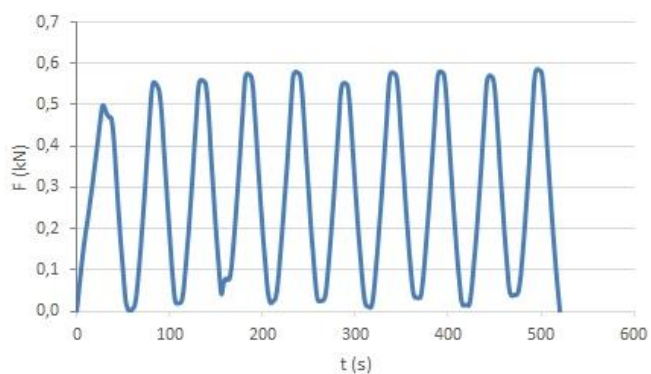
Obr. 3-20 - Směs s 10 % grafitového prášku



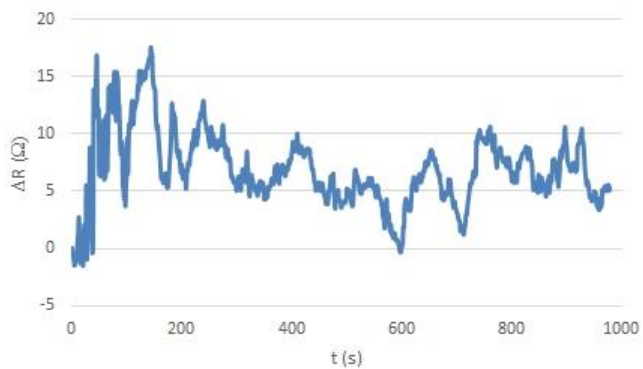
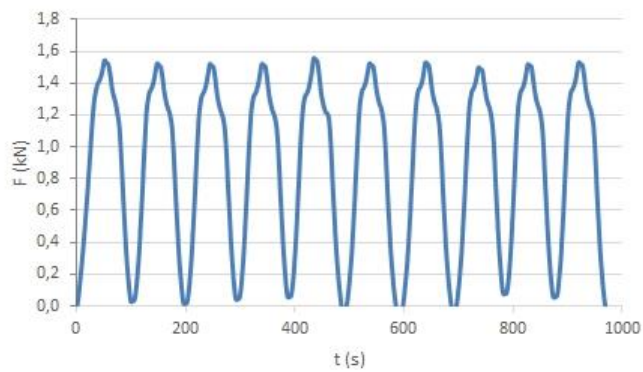
Obr. 3-21 - Směs se 2 % sazí



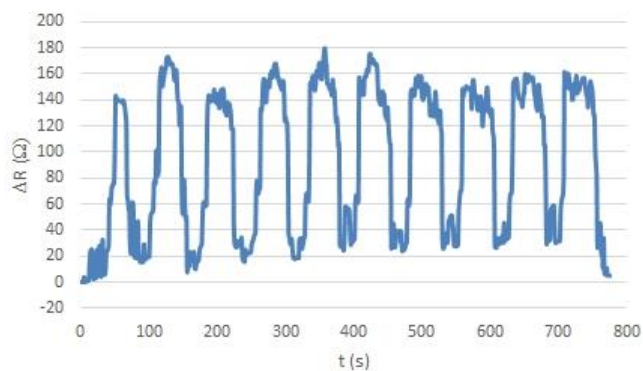
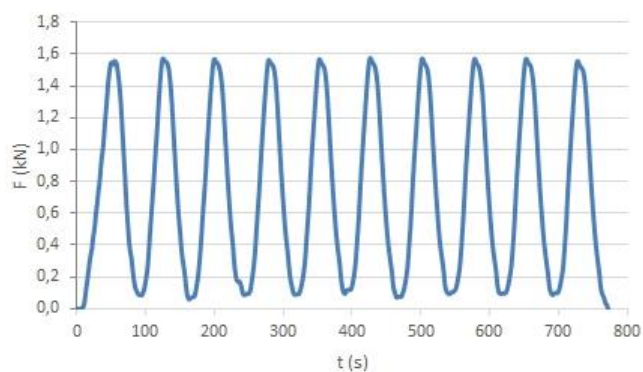
Obr. 3-22 - Směs se 4 % sází



Obr. 3-23 - Směs s 6 % sází



Obr. 3-24 - Směs s 1 % uhlíkových vláken

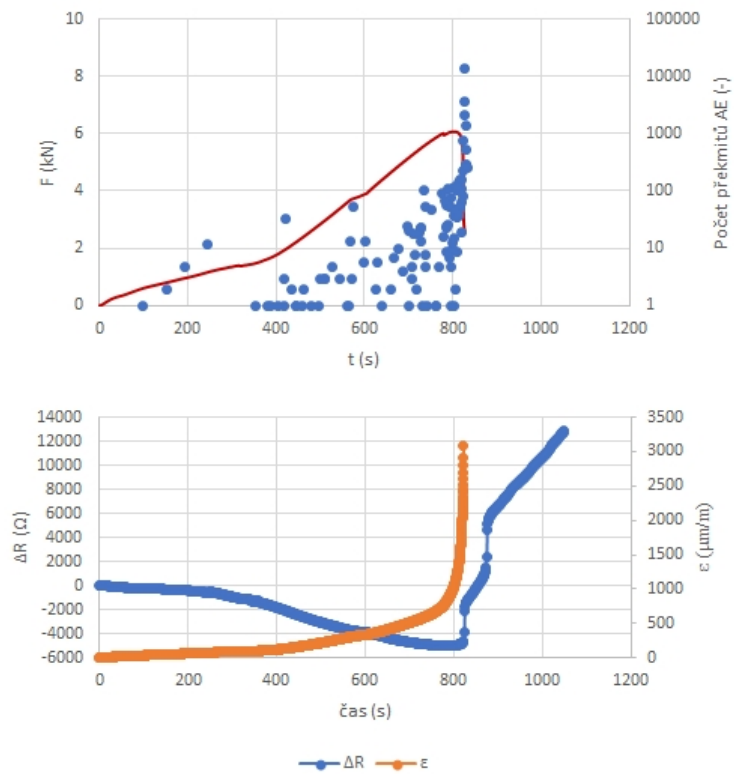


Obr. 3-25 - Směs se 2 % uhlíkových vláken

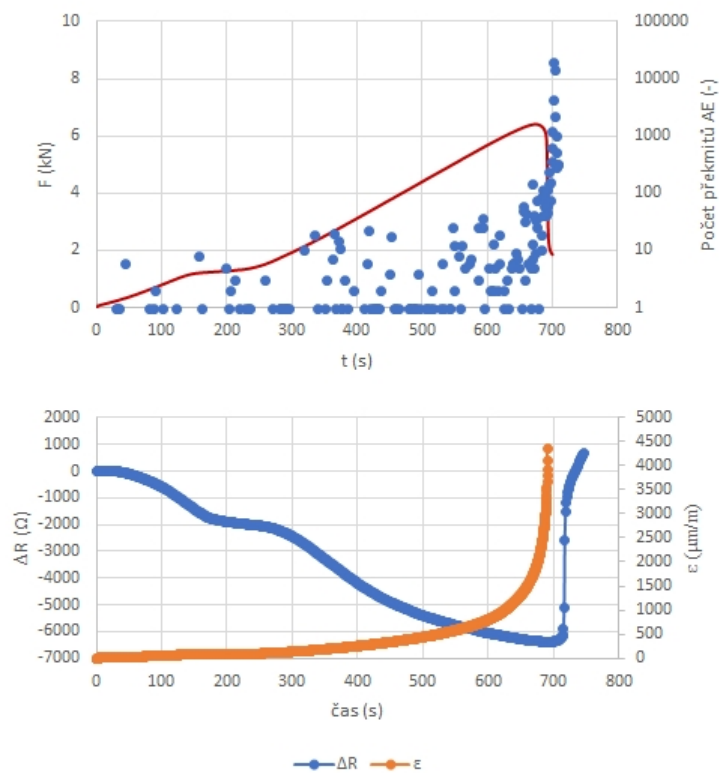
Z grafů je patrné, že všechny směsi reagovaly na cyklické zatěžování cyklickou změnou elektrického odporu. S rostoucí silou docházelo ke snižování elektrického odporu, což je způsobeno přiblížením částic vodivého plniva k sobě, které vytváří elektricky vodivou síť. Toto chování je standardní při tlakovém zatěžování, ale zde se projevilo i při zatěžování ohybovém, protože měřící elektrody byly na celém obvodu zkušebních trámců a tlačena část je oproti tažené části (spodní strana) majoritní. Citlivost této změny je u různých příměsí a jejich množství poměrně proměnlivá. U některých směsí, především u směsi s 6 % sazí (graf na Obr. 3-23) a u směsi s 1 % uhlíkových vláken (graf na Obr. 3-24) je změna elektrického odporu velmi malá a tvar křivky změny odporu nekopíruje tvar křivky zatěžovací, jak je tomu u většiny ostatních směsí. Tento jev je pravděpodobně způsoben v případě směsi s uhlíkovými vlákny nedostatečnou homogenizací a dispergací vodivého plniva a v případě směsi s 6 % sazí dosažením perkolačního prahu. Nejlepší shodu průběhu změny elektrického odporu a změny zatěžovací síly s velmi dobrou citlivostí vykazují směsi s obsahem uhlíkových nanotrubiček v množství 0,1 % a 0,4 % (graf na Obr. 3-17 a graf na Obr. 3-18). Dobré citlivosti a shody průběhu křivky cyklického zatěžování s křivkou změny elektrického odporu bylo dosaženo také u směsi s obsahem 3 % grafitového prášku (graf na Obr. 3-19).

3.5.2.3 Zatěžování do porušení

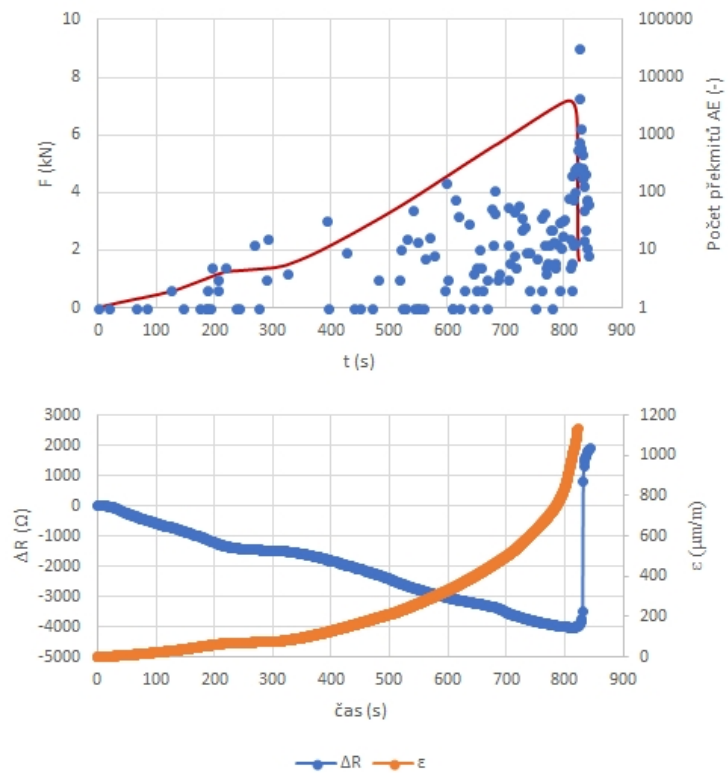
Po měření elektrických vlastností na zkušebních trámcích při cyklickém zatěžování, byly trámce namáhány tříbodový ohybem až do jejich porušení. V průběhu zatěžování byl opět měřen elektrický odpor a také poměrná deformace a akustická emise monitorující vznik trhlin. Na následujících grafech je zobrazeno komplexní srovnání všech měřených veličin.



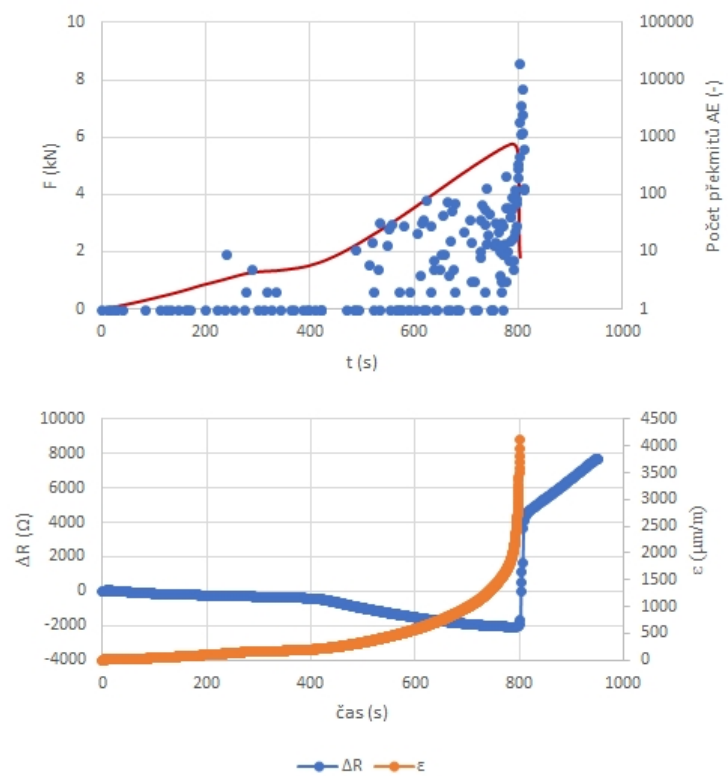
Obr. 3-26 - Referenční směs



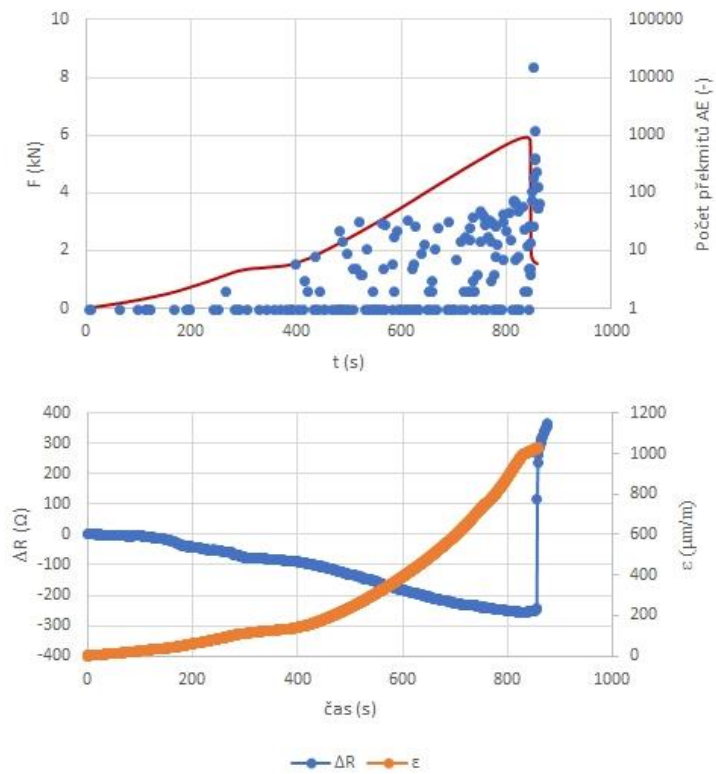
Obr. 3-27 - Směs s 0,1 % CNT



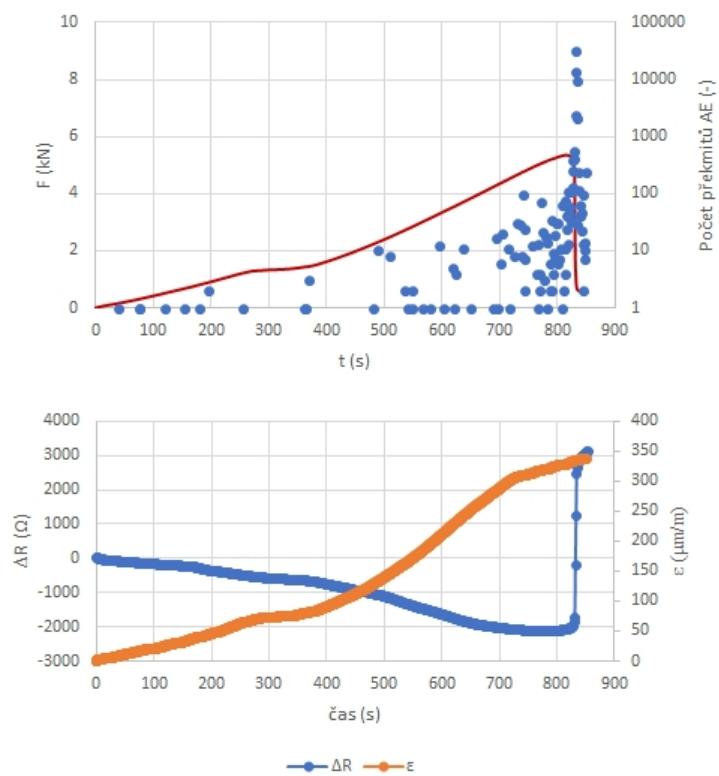
Obr. 3-28 - Směs s 0,4 % CNT



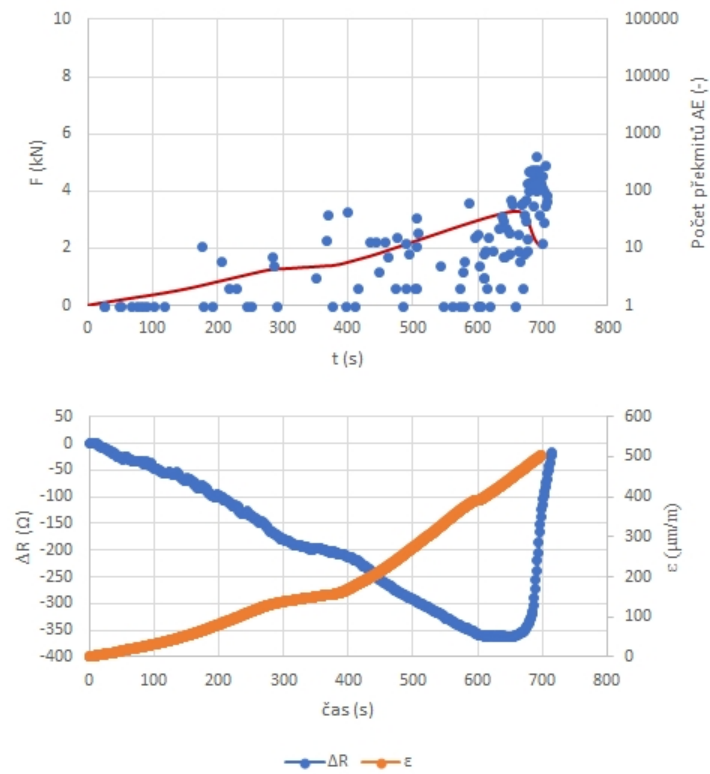
Obr. 3-29 - Směs se 3 % grafitového prášku



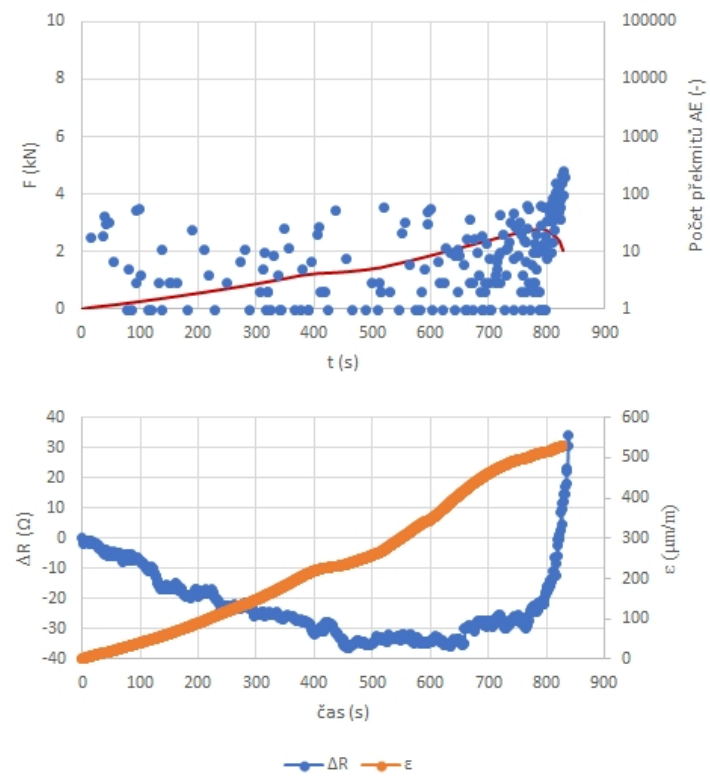
Obr. 3-30 - Směs s 10 % grafitového prášku



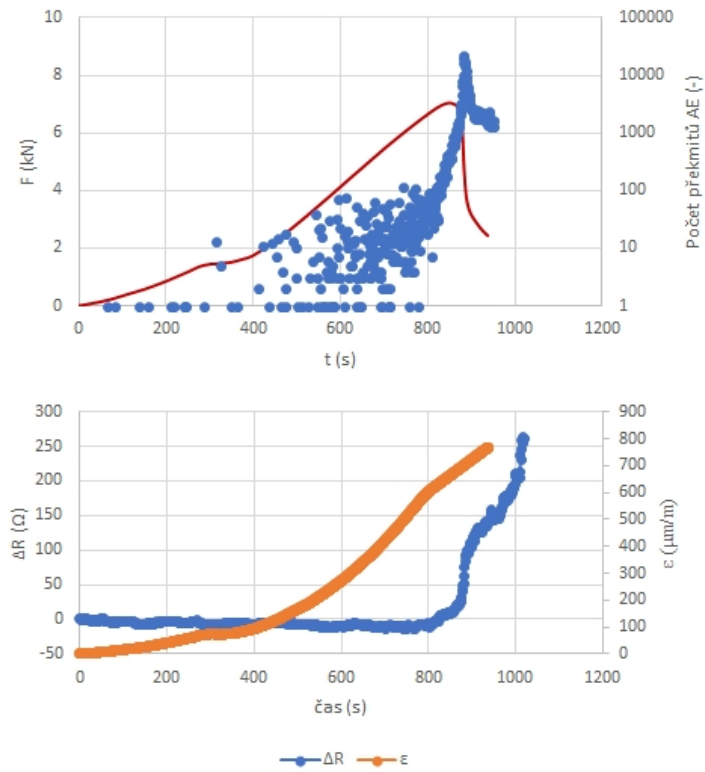
Obr. 3-31 - Směs se 2 % sazí



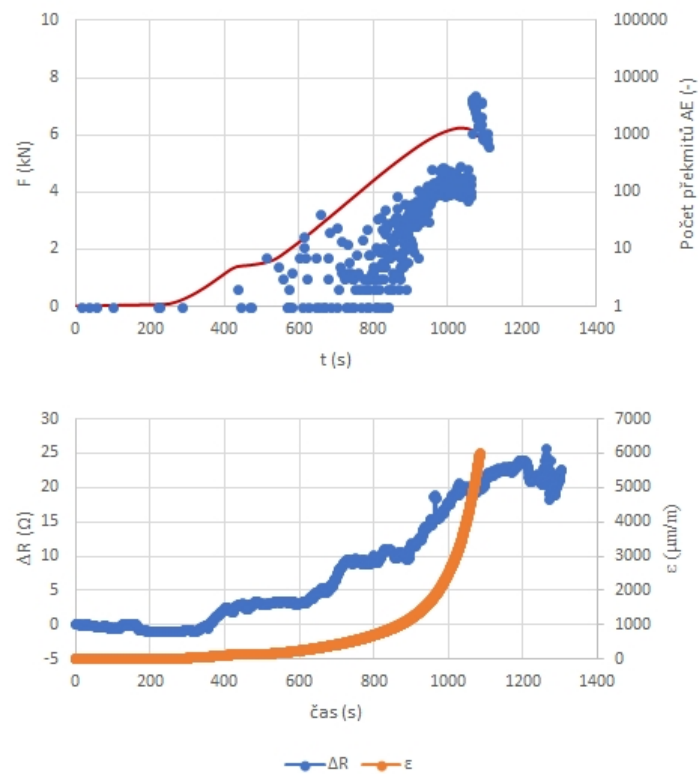
Obr. 3-32 - Směs se 4 % sazí



Obr. 3-33 - Směs se 6 % sazí



Obr. 3-34 - Směs s 1 % uhlíkových vláken



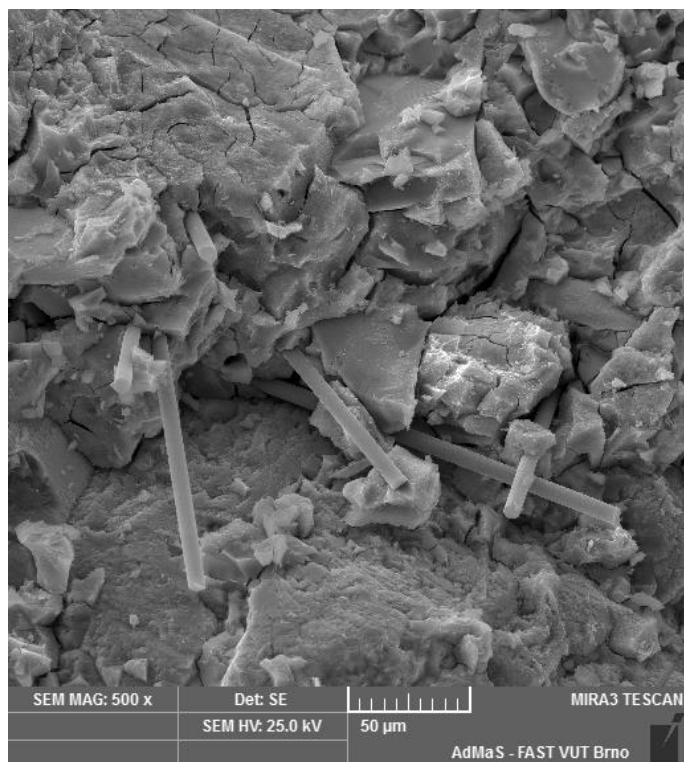
Obr. 3-35 - Směs se 2 % uhlíkových vláken

U všech zkušebních trámců došlo k úplnému porušení při hodnotě zatěžovací síly přibližně 6 kN. U trámců s příměsí sazí stačila k porušení nižší síla, což bylo ověřeno již dříve, a proto i při cyklickém zatěžování byla zvolená nižší zatěžovací síla.

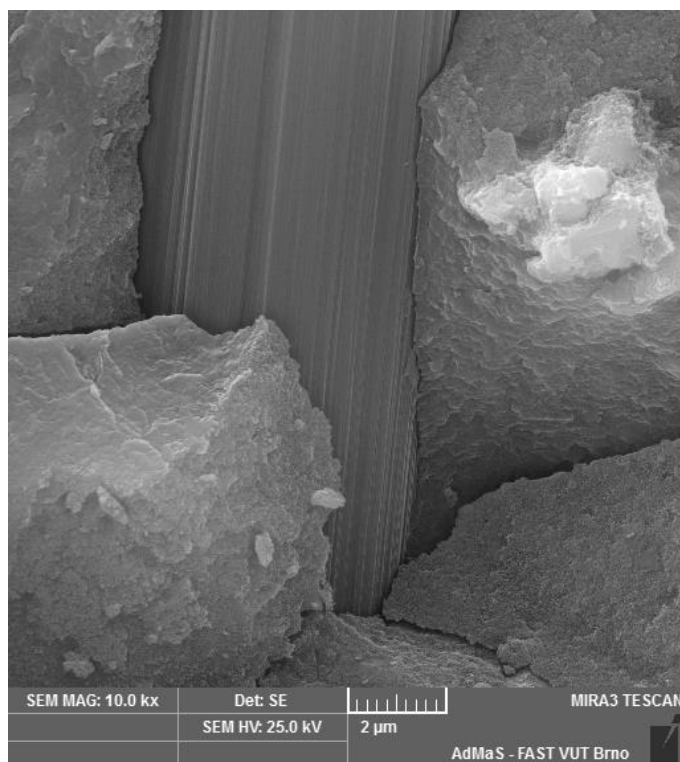
V grafech je názorně vidět, že v čase porušení vzorku dojde ke skokovému nárůstu elektrického odporu, což je způsobeno vznikem velkých trhlin, díky kterým dojde ke ztrátě elektrické vodivosti. Při pozorování korelace mezi změnou elektrického odporu ΔR a poměrného přetvoření ε je zřejmé, že s klesajícím elektrickým odporem dochází vlivem narůstající zatěžovací síly ke zvyšování poměrné deformace. V bodě, kde je zatěžovací síla nejvyšší a dojde k úplnému porušení zkušebního tělesa, se také hodnota poměrné deformace dostane na nejvyšší hodnotu, protože dojde k porušení měřících tenzometrů. Nejcitlivější z hlediska největší změny elektrického odporu jsou směsi s obsahem 0,1 % (Obr. 3-27) a 0,4 % (Obr. 3-28) uhlíkových nanotrubiček, kde při postupném zatěžování až do porušení došlo ke změně elektrického odporu v řádech tisíců ohmů. U směsi s obsahem 0,1 % uhlíkových nanotrubiček (Obr. 3-27) a 3 % grafitového prášku (Obr. 3-29) můžeme pozorovat výrazně pozvolnější nárůst poměrné deformace, což ukazuje na vyšší tuhost zkušebních trámců vyrobených s přidávkem těchto funkčních plniv.

Body zobrazující počet překmitů akustické emise ukazují, že na začátku zatěžování, kdy dochází k nárůstu napětí, nejsou akustické signály příliš patrné, protože ještě nedochází ke vzniku trhlin. S rostoucí zatěžovací silou jsou překmity stále častější a četnější a v čase úplného porušení, kdy vzniknou největší trhliny, je jejich nárůst markantní.

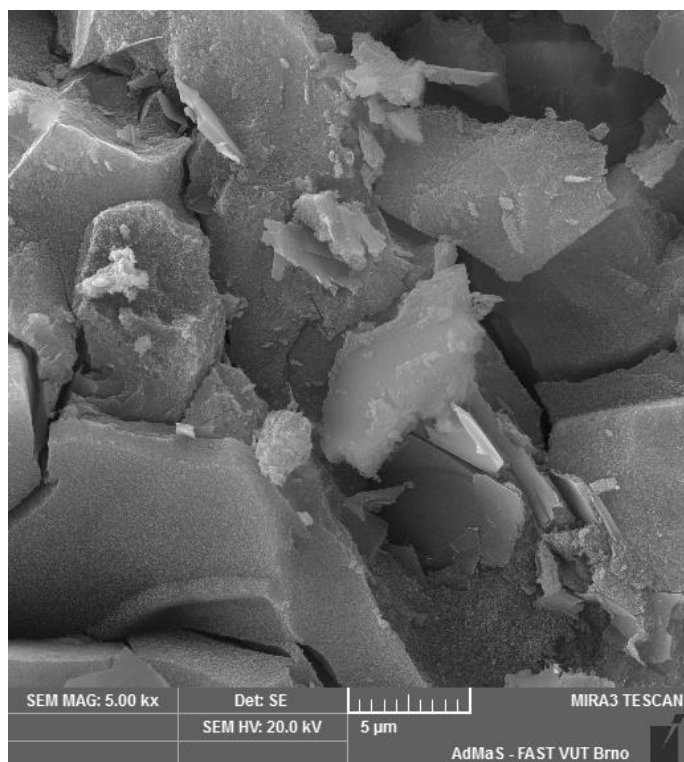
3.6 Snímky mikrostruktury



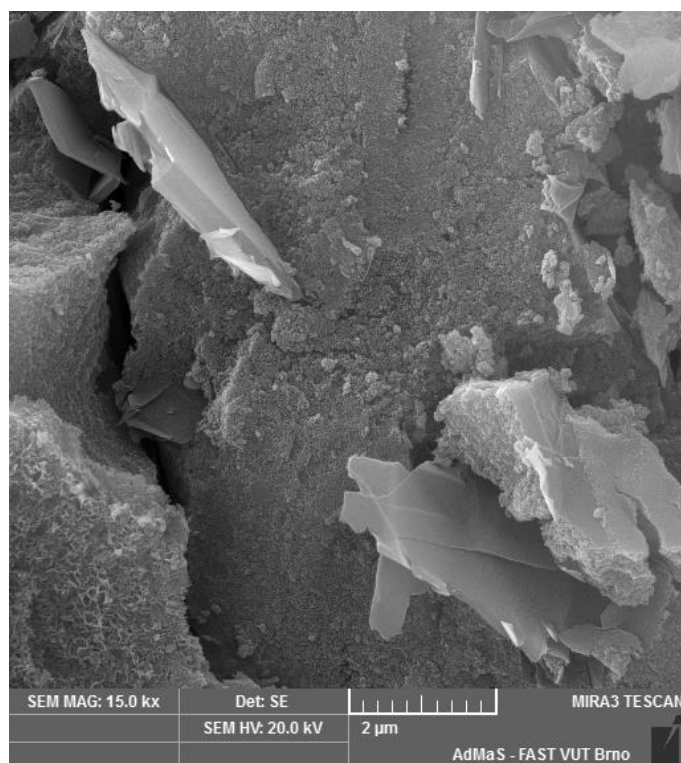
Obr. 3-36 – Uhlíková vlákna 1 %, zvětšení 500 ×



Obr. 3-37 – Uhlíková vlákna 1 %, zvětšení 10000 ×



Obr. 3-38 - Grafit 10 %, zvětšení 5000 ×



Obr. 3-39 - Grafit 10 %, zvětšení 15000 ×

Na obrázcích výše jsou snímky mikrostruktury z elektronového rastrovacího mikroskopu. Jde o směsi obsahující grafit a uhlíková vlákna. U snímků ostatních směsí nejsou dostatečně patrné částice funkčních plniv.

Struktura aluminosilikátové matrice je dostatečně kompaktní, což potvrzují i poměrně vysoké hodnoty pevností v tlaku a v tahu ohybem. Na snímku Obr. 3-36 jsou jasně viditelná podlouhlá válcová uhlíková vlákna. Je evidentní, že vlákna nejsou ve směsi dostatečně dobře dispergována, což bylo potvrzeno i při měření elektrických vlastností. Na druhém snímku Obr. 3-37 je detail uhlíkového vlákna, na kterém je patrné, že vlákno není s pojivovou matricí dokonale spojeno. Nedokonalé spojení matrice s uhlíkovými vlákny je způsobeno hydrofobní povahou vláken. Na snímcích Obr. 3-38 a Obr. 3-39 jsou viditelné částice grafitového prášku, jehož dispergace byla v porovnání s uhlíkovými vlákny výrazně homogennější.

4 Závěr

V rámci teoretické části této práce byla představena jednotlivá funkční plniva, která je možné aplikovat do betonů se sensorickými vlastnostmi. Byl popsán vliv množství vodivých plniv na sensorické vlastnosti, a to při různých způsobech zatěžování. Vyšší množství vodivých plniv způsobuje snižování elektrického odporu. Částice s vyšším poměrem stran mají kromě snížení elektrického odporu pozitivní vliv na mechanické vlastnosti kompozitů. V experimentální části byl zkoumán vliv ohybového namáhání na elektrické vlastnosti kompozitů z alkalicky aktivované strusky. Konkrétně byla zkoumána korelace mezi cyklickým zatěžováním a průběhem změny elektrického odporu. Toto měření bylo prováděno na zkušebních trémkách ze směsi obsahujících jako vodivá plniva uhlíkové nanotrubičky, grafitový prášek, saze a uhlíková vlákna. Z výsledků tohoto měření se jako nejvhodnější vodivé plnivo pro aplikaci do chytrých betonů jeví uhlíkové nanotrubičky. Toto vodivé plnivo vykazuje nejvyšší citlivost (nejvyšší hodnoty změny elektrického odporu) s nejlepší shodou průběhu křivky cyklického ohybového zatěžování a křivky změny elektrického odporu. Pro budoucí výzkum by bylo vhodné použít přesnější automatizované zařízení, které eliminuje chyby a nepřesnosti způsobené lidským faktorem a nedokonalým technologickým vybavením. U uhlíkových vláken, která jsou velmi hydrofobní, se jako největší problém projevila nedostatečná dispergace vláken ve směsi. Tento problém je podle nejnovějších výzkumů řešitelný například oxidací vláken kyselinou dusičnou, což vede k důkladnější dispergaci a lepší soudržnosti vláken s pojivovou maticí.

5 Literatura

- [1] AZHARI, Faezeh a Nemkumar BANTHIA. Cement-based sensors with carbon fibers and carbon nanotubes for piezoresistive sensing. *Cement and Concrete Composites* [online]. Elsevier, 2012, **34**(7), 866-873 [cit. 2017-12-22]. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2012.04.007. ISSN 0958-9465. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S095894651200096>
- [2] HAN, Baoguo, Xun YU a Jinping OU. *Self-Sensing Concrete in Smart Structures*. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2014. DOI: 10.1016/C2013-0-14456-X. ISBN 0128005173.
- [3] JIA, X. W., Z. Q. TANG a J. S. QIAN. Research and mechanism analysis on the compression sensitivity of steel slag concrete. *Material Science and Technology* [online]. Elsevier, 2010, **18**(1), 66-70 [cit. 2017-12-22]. ISSN 10050299. Dostupné z: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-77951999954&origin=inward&txGid=6d5eef4e22d298ad26eb52e730baf642>
- [4] DING, Yining, Zhibo HAN, Yulin ZHANG a J.B. AGUIAR. Concrete with triphasic conductive materials for self-monitoring of cracking development subjected to flexure. *Composite Structures* [online]. Elsevier, 2016, **138**, 184-191 [cit. 2017-12-22]. DOI: 10.1016/j.compstruct.2015.11.051. ISSN 0263-8223. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S0263822315010545>
- [5] WEN, Sihai a D. D. L. CHUNG. A comparative study of steel fiber cement and carbon fiber cement as piezoresistive strain sensors. *Advances in Cement Research* [online]. 2013, **15**(3), 119-128 [cit. 2017-12-22]. Dostupné z: <http://www.icevirtuallibrary.com/doi/10.1680/adcr.2003.15.3.119>
- [6] <http://www.steelfiber.org/>
- [7] *Carbon Black* [online]. [cit. 2017-12-22]. Dostupné z: <http://www.inchem.org/documents/iarc/vol65/carbon.html>
- [8] HAN, B., W. CHEN a J. OU. Piezoresistivity of cement-based materials with acetylene carbon black. *Acta Materiae Compositae Sinica* [online]. Elsevier, 2008, **25**(3), 39-44 [cit. 2017-12-22]. ISSN 10003851. Dostupné z: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-45449110050&origin=inward&txGid=12e6ac25d35a2dbd72f6cd54db05a5cc>

- [9] MONTEIRO, A.O., P.B. CACHIM a P.M.F.J. COSTA. Electrical Properties of Cement-based Composites Containing Carbon Black Particles. *Materials Today: Proceedings* [online]. Elsevier, 2015, **2**(1), 193-199 [cit. 2017-12-22]. DOI: 10.1016/j.matpr.2015.04.021. ISSN 2214-7853. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S221478531500022X>
- [10] CHIARELLO, Manuela a Raffaele ZINNO. Electrical conductivity of self-monitoring CFRC. *Cement and Concrete Composites* [online]. Elsevier, 2005, **27**(4), 463-469 [cit. 2017-12-22]. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2004.09.001. ISSN 0958-9465. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S0958946504001374>
- [11] http://www.phxslag.com/phxmgmt_region_ne.html
- [12] CHEN, Pu-Woei a D. D. L. CHUNG. Carbon fiber reinforced concrete for smart structures capable of non-destructive flaw detection. *Smart Materials and Structures* [online]. 1993, **2**(1), 22-30 [cit. 2017-12-22]. DOI: 10.1088/0964-1726/2/1/004. ISSN 0964-1726. Dostupné z: <http://iopscience.iop.org.ezproxy.lib.vutbr.cz/article/10.1088/0964-1726/2/1/004/meta>
- [13] BANTHIA, N., S. DJERIDANE a M. PIEGON. Electrical resistivity of carbon and steel micro-fiber reinforced cements. *Cement and Concrete Research* [online]. 1992, **22**(5), 804-814 [cit. 2017-12-22]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0008884692901044>
- [14] ŚLOSARCZYK, A., W. PICHÓR a M. FRAĆ. Thermal and electrical characterization of the carbon nanofibers based cement composites. *Medziagotyra* [online]. Kauno Technologijos Universitetas, 2017, **23**(2), 156-160 [cit. 2017-12-22]. DOI: 10.5755/j01.ms.23.2.14993. ISSN 13921320. Dostupné z: <http://matsc.ktu.lt/index.php/MatSc/article/view/14993>
- [15] ZHANG, Jin, Haitao NIU, Jianguo ZHOU, Xungai WANG a Tong LIN. Synergistic effects of PEK-C/VGCNF composite nanofibres on a trifunctional epoxy resin. *Composites Science and Technology* [online]. Elsevier, 2011, **71**(8), 1060-1067 [cit. 2017-12-22]. DOI: 10.1016/j.compscitech.2011.03.008. ISSN 0266-3538. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S0266353811001102>

- [16] GARCÍA-MACÍAS, Enrique, Antonella D’ALESSANDRO, Rafael CASTRO-TRIGUELO, Domingo PEREZ-MIRA a Filippo UBERTINI. Micromechanics modeling of the uniaxial strain-sensing property of carbon nanotube cement-matrix composites for SHM applications. *Composite Structures* [online]. Elsevier, 2017, **163**, 195-215 [cit. 2017-12-22]. DOI: 10.1016/j.compstruct.2016.12.014. ISSN 0263-8223. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S0263822316322693>
- [17] GARCÍA-MACÍAS, Enrique, Antonella D’ALESSANDRO, Rafael CASTRO-TRIGUELO, Domingo PEREZ-MIRA a Filippo UBERTINI. Micromechanics modeling of the electrical conductivity of carbon nanotube cement-matrix composites. *Composites Part B* [online]. Elsevier, 2017, **108**, 451-469 [cit. 2017-12-22]. DOI: 10.1016/j.compositesb.2016.10.025. ISSN 1359-8368. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S1359836816317504>
- [18] D’ALESSANDRO, Antonella, Marco RALLINI, Filippo UBERTINI, Annibale Luigi MATERAZZI a Jose Maria KENNY. Investigations on scalable fabrication procedures for self-sensing carbon nanotube cement-matrix composites for SHM applications. *Cement and Concrete Composites* [online]. Elsevier, 2016, **65**, 200-213 [cit. 2017-12-22]. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2015.11.001. ISSN 0958-9465. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S0958946515300512>
- [19] DOO-YEOL YOO, ILHWAN YOU a SEUNG-JUNG LEE. Electrical Properties of Cement-Based Composites with Carbon Nanotubes, Graphene, and Graphite Nanofibers. *Sensors* [online]. MDPI, 2017, **17**(5), 1064 [cit. 2017-12-22]. DOI: 10.3390/s17051064. ISSN 1424-8220. Dostupné z: <http://www.mdpi.com/1424-8220/17/5/1064>
- [20] HAN, Baoguo, Siqu DING a Xun YU. Intrinsic self-sensing concrete and structures: A review. *Measurement* [online]. Elsevier, 2015, **59**, 110-128 [cit. 2017-12-22]. DOI: 10.1016/j.measurement.2014.09.048. ISSN 0263-2241. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S026322411400428X>
- [21] HAN, Baoguo, Xinchun GUAN a Jinping OU. Electrode design, measuring method and data acquisition system of carbon fiber cement paste piezoresistive sensors. *Sensors & Actuators: A. Physical* [online]. Elsevier B.V, 2007, **135**(2), 360-369 [cit. 2017-12-23]. DOI: 10.1016/j.sna.2006.08.003. ISSN 0924-4247. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S0924424706005322>

- [22] WANG, Xiufeng, Yonglan WANG a Zhihao JIN. Electrical conductivity characterization and variation of carbon fiber reinforced cement composite. *Journal of Materials Science* [online]. Boston: Kluwer Academic Publishers, 2002, **37**(1), 223-227 [cit. 2017-12-23]. DOI: 10.1023/A:1013107623281. ISSN 0022-2461. Dostupné z: <https://link-springer-com.ezproxy.lib.vutbr.cz/article/10.1023/A%3A1013107623281>
- [23] ZHU, Sirong a D D L CHUNG. Numerical assessment of the methods of measurement of the electrical resistance in carbon fiber reinforced cement. *Smart Materials and Structures* [online]. 2007, **16**(4), 1164-1170 [cit. 2017-12-23]. DOI: 10.1088/0964-1726/16/4/026. ISSN 0964-1726. Dostupné z: <http://iopscience.iop.org.ezproxy.lib.vutbr.cz/article/10.1088/0964-1726/16/4/026/meta>
- [24] WEN, Sihai a D.D.L. CHUNG. The role of electronic and ionic conduction in the electrical conductivity of carbon fiber reinforced cement. *Carbon* [online]. Elsevier, 2006, **44**(11), 2130-2138 [cit. 2017-12-23]. DOI: 10.1016/j.carbon.2006.03.013. ISSN 0008-6223. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S0008622306001540>
- [25] HAN, Baoguo, Xun YU a Eil KWON. A self-sensing carbon nanotube/cement composite for traffic monitoring. *Nanotechnology* [online]. 2009, **20**(44), 445501 [cit. 2017-12-22]. DOI: 10.1088/0957-4484/20/44/445501. ISSN 0957-4484. Dostupné z: <http://iopscience.iop.org.ezproxy.lib.vutbr.cz/article/10.1088/0957-4484/20/44/445501/meta>
- [26] LUO, J, Z DUAN, T ZHAO a Q LIP. Effect of Compressive Strain on Electrical Resistivity of Carbon Nanotube Cement-based Composites. *Key Engineering Materials* [online]. 2011, **483**, 579-583 [cit. 2017-12-23]. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.483.579. ISSN 1013-9826. Dostupné z: <https://www-scientific-net.ezproxy.lib.vutbr.cz/KEM.483.579>
- [27] LI, Geng Ying, Pei Ming WANG a Xiaohua ZHAO. Pressure-sensitive properties and microstructure of carbon nanotube reinforced cement composites. *Cement and Concrete Composites* [online]. Elsevier, 2007, **29**(5), 377-382 [cit. 2017-12-23]. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2006.12.011. ISSN 0958-9465. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S095894650700008X>
- [28] CHEN, Ke, Chuanxi XIONG, Liubin LI, Liu ZHOU, Youan LEI a Lijie DONG. Conductive mechanism of antistatic poly(ethylene terephthalate)/ZnOw composites. *Polymer Composites* [online]. Hoboken: Wiley Subscription Services, Inc., A Wiley Company, 2009, **30**(2), 226-231 [cit. 2017-12-23]. DOI: 10.1002/pc.20679. ISSN 0272-8397. Dostupné z: <http://onlinelibrary.wiley.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/doi/10.1002/pc.20679/full>

- [29] XU, Jing, Wenhui ZHONG a Wu YAO. Modeling of conductivity in carbon fiber-reinforced cement-based composite. *Journal of Materials Science* [online]. Boston: Springer US, 2010, **45**(13), 3538-3546 [cit. 2017-12-23]. DOI: 10.1007/s10853-010-4396-5. ISSN 0022-2461. Dostupné z: <https://link-springer-com.ezproxy.lib.vutbr.cz/article/10.1007/s10853-010-4396-5>
- [30] KOVACS G. *Micromachined transducers sourcebook*. Boston: McGraw-Hill; 1998.
- [31] FU, Xuli, Erming MA, D.D.L. CHUNG a W.A. ANDERSON. Self-monitoring in carbon fiber reinforced mortar by reactance measurement. *Cement and Concrete Research* [online]. Elsevier, 1997, **27**(6), 845-852 [cit. 2017-12-23]. DOI: 10.1016/S0008-8846(97)83277-2. ISSN 0008-8846. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884697832772>
- [32] HAN, Baoguo, Kun ZHANG, Xun YU, Eil KWON a Jinping OU. Electrical characteristics and pressure-sensitive response measurements of carboxyl MWNT/cement composites. *Cement and Concrete Composites* [online]. Elsevier, 2012, **34**(6), 794-800 [cit. 2017-12-23]. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2012.02.012. ISSN 0958-9465. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S095894651200039X>
- [33] HAN, Baoguo a Jinping OU. Embedded piezoresistive cement-based stress/strain sensor. *Sensors & Actuators: A. Physical* [online]. Elsevier B.V, 2007, **138**(2), 294-298 [cit. 2018-01-02]. DOI: 10.1016/j.sna.2007.05.011. ISSN 0924-4247. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S0924424707003858>
- [34] HAN, B.G., Y. YU, B.Z. HAN a J.P. OU. Development of a wireless stress/strain measurement system integrated with pressure-sensitive nickel powder-filled cement-based sensors. *Sensors and Actuators, A: Physical* [online]. 2008, **147**(2), 536-543 [cit. 2018-01-02]. DOI: 10.1016/j.sna.2008.06.021. ISSN 09244247. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S0924424708003464>
- [35] FU, X, W LU a D.D.L CHUNG. Improving the Strain-Sensing Ability of Carbon Fiber-Reinforced Cement by Ozone Treatment of the Fibers 1 1 Communicated by D.M. Roy. *Cement and Concrete Research* [online]. Elsevier, 1998, **28**(2), 183-187 [cit. 2018-01-02]. DOI: 10.1016/S0008-8846(97)00265-2. ISSN 0008-8846. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S0008884697002652>

- [36] SAAFI, Mohamed. Wireless and embedded carbon nanotube networks for damage detection in concrete structures. *Nanotechnology*[online]. 2009, **20**(39), 395502 [cit. 2018-01-02]. DOI: 10.1088/0957-4484/20/39/395502. ISSN 0957-4484. Dostupné z: <http://iopscience.iop.org.ezproxy.lib.vutbr.cz/article/10.1088/0957-4484/20/39/395502/meta>
- [37] HAN, B.G., B.Z. HAN a J.P. OU. Experimental study on use of nickel powder-filled Portland cement-based composite for fabrication of piezoresistive sensors with high sensitivity. *Sensors & Actuators: A. Physical* [online]. Elsevier B.V, 2009, **149**(1), 51-55 [cit. 2018-01-02]. DOI: 10.1016/j.sna.2008.10.001. ISSN 0924-4247. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S0924424708005141>
- [38] CHEN, Bing a Juanyu LIU. Damage in carbon fiber-reinforced concrete, monitored by both electrical resistance measurement and acoustic emission analysis. *Construction and Building Materials* [online]. 2008, **22**(11), 2196-2201 [cit. 2018-01-02]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S0950061807002164>
- [39] WEN, Sihai a D.D.L. CHUNG. Self-sensing of flexural damage and strain in carbon fiber reinforced cement and effect of embedded steel reinforcing bars. *Carbon* [online]. Elsevier, 2006, **44**(8), 1496-1502 [cit. 2017-12-22]. DOI: 10.1016/j.carbon.2005.12.009. ISSN 0008-6223. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S0008622305007323>
- [40] CHEN, Bing, Juanyu LIU a Keru WU. Electrical responses of carbon fiber reinforced cementitious composites to monotonic and cyclic loading. *Cement and Concrete Research* [online]. Elsevier, 2005, **35**(11), 2183-2191 [cit. 2018-01-02]. DOI: 10.1016/j.cemconres.2005.02.004. ISSN 0008-8846. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S0008884605000669>
- [41] HAN, B G, B Z HAN a X YU. Effects of the content level and particle size of nickel powder on the piezoresistivity of cement-based composites/sensors. *Smart Materials and Structures* [online]. 2010, **19**(6), 065012 [cit. 2018-01-02]. DOI: 10.1088/0964-1726/19/6/065012. ISSN 0964-1726. Dostupné z: <http://iopscience.iop.org.ezproxy.lib.vutbr.cz/article/10.1088/0964-1726/19/6/065012/meta>

- [42] HAN, Baoguo, Kun ZHANG, Xun YU, Eil KWON a Jinping OU. Fabrication of Piezoresistive CNT/CNF Cementitious Composites with Superplasticizer as Dispersant. *Journal of Materials in Civil Engineering* [online]. 2012, **24**(6), 658-665 [cit. 2018-01-02]. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000435. ISSN 0899-1561. Dostupné z: <http://web.a.ebscohost.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/ehost/detail/detail?vid=0&sid=a4c6f0a1-232b-4c9c-826c-2f93ed0e2dd7%40sessionmgr4010&bdata=Jmxhbm9Y3Mmc2l0ZT1laG9zdC1saXZl#AN=76338116&db=a9h>
- [43] HAN, Baoguo, Xun YU, Kun ZHANG, Eil KWON a Jinping OU. Sensing properties of CNT-filled cement-based stress sensors. *Journal of Civil Structural Health Monitoring* [online]. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 2011, **1**(1), 17-24 [cit. 2018-01-02]. DOI: 10.1007/s13349-010-0001-5. ISSN 2190-5452. Dostupné z: <https://link-springer-com.ezproxy.lib.vutbr.cz/article/10.1007/s13349-010-0001-5>
- [44] CAO, Jingyao a D.D.L. CHUNG. Effect of strain rate on cement mortar under compression, studied by electrical resistivity measurement. *Cement and Concrete Research* [online]. Elsevier, 2002, **32**(5), 817-819 [cit. 2018-01-02]. DOI: 10.1016/S0008-8846(01)00753-0. ISSN 0008-8846. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S0008884601007530>
- [45] HAN, Baoguo, Lingyan ZHANG a Jinping OU. Influence of water content on conductivity and piezoresistivity of cement-based material with both carbon fiber and carbon black. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed* [online]. Heidelberg: Wuhan University of Technology, 2010, **25**(1), 147-151 [cit. 2018-01-02]. DOI: 10.1007/s11595-010-1147-z. ISSN 1000-2413. Dostupné z: <https://link-springer-com.ezproxy.lib.vutbr.cz/article/10.1007/s11595-010-1147-z>
- [46] HAN, Baoguo, Xun YU a Jinping OU. Effect of water content on the piezoresistivity of MWNT/cement composites. *Journal of Materials Science* [online]. Boston: Springer US, 2010, **45**(14), 3714-3719 [cit. 2018-01-02]. DOI: 10.1007/s10853-010-4414-7. ISSN 0022-2461. Dostupné z: <https://link-springer-com.ezproxy.lib.vutbr.cz/article/10.1007/s10853-010-4414-7>
- [47] LI, Hui, Huigang XIAO a Jinping OU. Electrical property of cement-based composites filled with carbon black under long-term wet and loading condition. *Composites Science and Technology* [online]. Elsevier, 2008, **68**(9), 2114-2119 [cit. 2018-01-02]. DOI: 10.1016/j.compscitech.2008.03.007. ISSN 0266-3538. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S0266353808001085>