

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

FAKULTA STROJNÍ



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Možnosti monitorování kompozitních konstrukcí
s využitím elektrické vodivosti uhlíkových vláken

Petr Uksa

Vedoucí práce: Ing. Milan Dvořák, Ph.D.

Praha, 2020



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Uksa** Jméno: **Petr** Osobní číslo: **473425**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky**
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Možnosti monitorování kompozitních konstrukcí s využitím elektrické vodivosti uhlíkových vláken

Název bakalářské práce anglicky:

Monitoring possibilities of composite structures using electrical conductivity of carbon fibers

Pokyny pro vypracování:

- 1) Seznamte se s problematikou poškození kompozitních materiálů
- 2) Proveďte rešerši možných přístupů detekce poškození CFRP kompozitů s využitím jejich elektrických vlastností
- 3) Navrhněte experimentální ověření možnosti detekce poškození na zkušebních tělesech
- 4) Porovnejte experimentální data s výsledky publikovanými v literatuře

Seznam doporučené literatury:

1. Schmidová, N., Horoschenkoff, A. a Růžička, M. 2018. Investigation of the electrical resistivity of damaged carbon fibers sensors with regard to SHM, Department of Mechanics, Biomechanics and Mechatronics, Faculty of Mechanical Engineering, Czech Technical University in Prague. Technická 4, Praha 6, Czech Republic, 2018.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

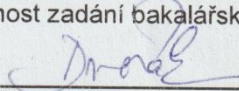
Ing. Milan Dvořák, Ph.D., odbor pružnosti a pevnosti FS

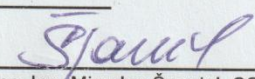
Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

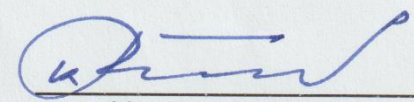
Datum zadání bakalářské práce: **23.04.2020**

Termín odevzdání bakalářské práce: **07.08.2020**

Platnost zadání bakalářské práce: _____


Ing. Milan Dvořák, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce


doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry



prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

24.6.2020

Datum převzetí zadání


Podpis studenta

Možnosti monitorování kompozitních konstrukcí s využitím vodivosti uhlíkových vláken

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně, že jsem řádně citoval všechny použité prameny a literaturu a že práce nebyla využita v rámci jiného vysokoškolského studia či k získání jiného nebo stejného titulu.

v Praze dne 7. 8. 2020

.....

Petr Uksa

Možnosti monitorování kompozitních konstrukcí s využitím vodivosti uhlíkových vláken

Poděkování

Rád bych poděkoval panu Ing. Milanu Dvořákovi, Ph.D. za vedení práce. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Nikole Schmidové za cenné rady a poskytnuté materiály.

Možnosti monitorování kompozitních konstrukcí s využitím vodivosti uhlíkových vláken

Abstrakt:

Tato práce se zaměřuje na problematiku monitorování stavu konstrukcí (Structure Health Monitoring, dále jen SHM). Zkušební vzorky jsou v této práci vyrobeny z uhlíkového kompozitu a pro SHM se využívá elektrických vlastností uhlíkových vláken tvořících matici materiálu. Práce využívá tyto vlastnosti k vytvoření dvou typů senzorů, které jsou následně otestovány při experimentálním měření. Jedním typem senzoru je uhlíkový senzor, což je svazek vláken spojených pryskyřicí. Další senzor je celé zkušební těleso opatřené kontakty, aby vlákna v tělese vedla proud. To umožňuje měřit elektrický odpor zkušebních vzorků, který mění svou hodnotu závisle na deformaci a poškození (self sensing).

Další částí práce je návrh aparatury umožňující SHM provádět bezdrátově pomocí RFID technologie. Práce se věnuje procesu návrhu a výroby takovéto aparatury a problémům, které s touto technologií mohou nastat ještě před využitím pro měření.

V práci byly vyhodnoceny schopnosti obou senzorů pro měření deformace a pro měření poškození v součásti.

Klíčová slova: uhlíkové kompozity, uhlíková vlákna, elektrické vlastnosti uhlíkových vláken, SHM, uhlíkový senzor, self-sensing, bezdrátová detekce poškození, RFID

Abstract:

This thesis is aimed at SHM (Structure Health Monitoring). The monitored parts in this thesis are made of carbon fibre reinforced composites, using electrical properties of the carbon fibres forming the matrix. The thesis uses those properties to manufacture two types of sensors, which are then being tested on an experimental measurement. The first type of sensor is the carbon fibre sensor, which is a sheaf of carbon fibres bonded by resin. The next sensor is the whole test specimen provided with electric contacts for the carbon fibres inside to conduct current. This allows the measurement of electrical resistance, which changes its value depending on the deformation and damage.

Next part of the thesis is a draft of a wireless method of SHM using RFID technology. The thesis covers the process of design and manufacturing of such aperture and also the problems connected to this technology that may occur even before it is used for measuring.

In this thesis, there were evaluated the capabilities of both types of sensors in deformation measurements and damage measurements.

Keywords: carbon fibre reinforced composites, carbon fibres, electrical properties of carbon fibres, SHM, carbon fibre sensor, self-sensing, wireless damage detection, RFID

Obsah

1	Úvod	12
2	Kompozitní materiály	15
2.1	Obecné rozdělení kompozitních materiálů	15
2.2	Základní konstitutivní vztahy pro kompozity	16
2.2.1	Kompozity jako čistě anizotropní materiály	17
2.2.2	Kompozity jako ortotropní materiály	18
3	Poškození uhlíkových kompozitů	20
3.1	Porušování v závislosti na typu zatížení	20
3.1.1	Porušování při zatížení podélně tahem	20
3.1.2	Porušování při zatížení příčně tahem	21
3.1.3	Porušování při zatížení podélně tlakem	22
3.1.4	Porušování při zatížení příčně tlakem	23
3.1.5	Porušování při zatížení smykem	23
3.1.6	Porušování při zatížení rázem	24
4	Způsoby měření poškození a deformací využívající elektrické vlastnosti uhlíkových vláken	25
4.1	Elektrické vlastnosti uhlíkových vláken	25
4.1.1	Měření elektrického odporu součásti	26
4.1.2	Měření elektrického odporu uhlíkových senzorů	27
5	Možnosti připojení k měřidlům	29
5.1	Čtyřvodičové měření elektrického odporu	29
5.2	Bezdrátový přenos pomocí RFID	30
5.2.1	Součástky pro přenos pomocí RFID	31
5.2.2	Typy RFID technologií dle frekvencí	32
6	Návrh experimentu	34
6.1	Zkušební těleso	34
6.2	Zvolený zkušební případ	36
6.3	Simulace poškození naříznutím	36
6.4	Vybrané způsoby zaznamenání poškození	37
6.5	Návrh RFID aparatury	37
6.5.1	Výběr tagu	37
6.5.2	Výběr čtečky	38
6.5.3	Převod vybraných součástí do schématické formy	38
6.5.4	Výpočtové vztahy pro proudy v obvodu	39

Možnosti monitorování kompozitních konstrukcí s využitím vodivosti uhlíkových vláken

6.5.5	Výpočtové vztahy pro určení vlastních indukčností $L_{1;2}$	39
6.5.6	Výpočtové vztahy pro určení vzájemné indukčnosti M	40
6.5.7	Návrh parametrů měřicího obvodu.....	41
6.5.8	Zhodnocení RFID aparatury	43
7	Výroba uhlíkových senzorů.....	45
8	Experiment	46
8.1	Vstupní data pro experiment.....	46
8.1.1	Vyrobená zkušební tělesa	46
8.1.2	Vyrobené uhlíkové senzory	47
8.2	Zkušební zařízení využítá pro experiment.....	49
8.3	Výstupní data z experimentu	50
8.3.1	Výsledky měření elektrického odporu zkušebních těles při strojním zatěžování	50
8.3.2	Výsledky porovnávacího měření zkušebních těles nařiznutím	53
8.3.3	Výsledky měření elektrického odporu uhlíkových senzorů	55
8.3.4	Porovnání výsledků s literaturou	58
9	Diskuse	60
10	Závěr.....	61
11	Bibliografie.....	63

Použité značení

B ... magnetická indukce [T]

C ... kapacita [F]

E ... modul pružnosti v tahu [N/mm²]

E_L ... modul pružnosti v tahu podélný ve směru vláken [MPa]

E_m ... modul pružnosti matrice v tahu [MPa]

E_v ... modul pružnosti výztuže v tahu [MPa]

E_T ... transverzální modul pružnosti v tahu [MPa]

f ... frekvence [Hz]

G ... smykový modul pružnosti [MPa]

I ... elektrický proud [A]

L ... vlastní indukčnost [H]

M ... vzájemná indukčnost [H]

R ... elektrický odpor [Ω]

U ... elektrické napětí [V]

V_v ... objemový podíl výztuže

X ... impedance [Ω]

γ ... relativní zkos [-]

ε ... relativní prodloužení [-]

μ ... Poissonovo číslo [-]

σ ... normálové napětí [MPa]

τ ... smykové napětí [MPa]

ω ... úhlová frekvence [rad/s]

Seznam obrázků

obr. 1 Robotický manipulátor KUKA Cobra (Carter, 2018).....	12
obr. 2 Uhlíkové senzory (Schmidová, a další, 2018)	13
obr. 3 Způsoby zatížení laminy	17
obr. 4 Hookeův zákon pro obecný anizotropní materiál (Vrbka, 2008).....	18
obr. 5 Hlavní ortotropní souřadnicový systém (Vrbka, 2008).....	18
obr. 6 Hookeův zákon pro obecný ortotropní materiál (Vrbka, 2008).....	19
obr. 7 Inverzní vyjádření Hookeova zákona pro obecný ortotropní materiál (Vrbka, 2008).....	19
obr. 8 Hookeův zákon po doplnění inženýrských konstant (Vrbka, 2008)	19
obr. 9 Mechanismy porušení dlouhovláknového kompozitu při podélném tahovém zatížení (Vrbka, 2008)	21
obr. 10 Porušení kompozitu při podélném tahovém zatížení (Kadlec, 2012)	21
obr. 11 Porušení kompozitu při příčném tahovém zatížení (Vrbka, 2008)	22
obr. 12 Mechanismy porušení dlouhovláknového kompozitu při podélném tlakovém zatížení (Vrbka, 2008)	22
obr. 13 Porušení kompozitu při podélném tlakovém zatížení (Kadlec, 2012)	23
obr. 14 Porušování kompozitu při příčném tlakovém zatížení (Vrbka, 2008)	23
obr. 15 Porušení kompozitu při smykovém zatížení (Kadlec, 2012)	24
obr. 16 Porušení kompozitu rázem (Kadlec, 2012).....	24
obr. 17 Hexagonální mřížka grafitu (Cídllová, a další, 2018).....	25
obr. 18 Závislost napětí v ohybu a změny relativního elektrického odporu na přetvoření v ohybu (Kwon, a další, 2016)	27
obr. 19 Závislost ohybového napětí na poměném prodloužení a relativní změně elektrického odporu uhlíkového senzoru (Horoschenkoff, a další, 2012).....	28
obr. 20 Schéma pro čtyřvodičové měření odporu (Sonel S.A. Company, 2013)	29
obr. 21 Vzájemná indukčnost cívek (reseneulohy.cz, 2019).....	30
obr. 22 RFID tag určený k vlastnímu zapouzdření (RFID4u.com, rok neznámý)	31
obr. 23 Čtečka RFID přenosná (Conrad.cz, rok neznámý)	32
obr. 24 Čtečka pro vlastní naprogramování (Luboš, 2019).....	32
obr. 25 Schéma čtečka-tag na krátkou vzdálenost (Want, 2006)	33
obr. 26 Schéma čtečka-tag na velkou vzdálenost (Want, 2006).....	33
obr. 28 Zkušební těleso.....	35
obr. 28 Rozměry zkušební tělesa.....	35
obr. 29 Detail kontaktů na zkušebním tělese.....	35
obr. 30 Schéma třibodového ohybu (ASTM D790, 2003)	36
obr. 31 Měřicí obvod - vlevo čtecí část, vpravo tag se senzorem (Zrubecký, 2017).....	38
obr. 33 Schéma rozměrů kruhové spirálové cívky (Stročka, rok neznámý).....	40
obr. 33 Vyrobené RFID zařízení	43
obr. 34 Graf závislosti změny proudu RFID obvodu na elektrickém odporu uhlíkového senzoru.....	44
obr. 35 Model rámu na uhlíkové senzory	45
obr. 36 Sloupcový graf - Naměřený elektrický odpor zkušebních těles po výrobě.....	47
obr. 37 Box plot - Naměřený elektrický odpor zkušebních těles po výrobě	47
obr. 38 Sloupcový graf – Elektrický odpor vyrobených uhlíkových senzorů po výrobě.....	48
obr. 39 Box plot – Elektrický odpor vyrobených uhlíkových senzorů po výrobě.....	48
obr. 40 Sloupcový graf změny elektrického odporu senzorů po instalaci.....	49

Možnosti monitorování kompozitních konstrukcí s využitím vodivosti uhlíkových vláken

obr. 41 Schéma experimentu	50
obr. 42 Záznam celé zkoušky na tělesech C1, C2 a C3	51
obr. 43 Porušené zkušební těleso.....	51
obr. 44 Detail porušeného zkušební tělesa	51
obr. 45 Záznam relativní změny elektrického odporu zkušební tělesa D1 na poměrném přetvoření při schodovém zatížení.....	52
obr. 46 Záznam relativní změny elektrického odporu zkušební tělesa D2 na poměrném přetvoření při schodovém zatížení.....	53
obr. 47 Záznam relativní změny elektrického odporu zkušební tělesa D3 na poměrném přetvoření při schodovém zatížení.....	53
obr. 48 Postupné nařezávání zkušební tělesa.....	54
obr. 49 Graf závislosti relativní změny elektrického odporu těles na délce nařiznutí....	55
obr. 50 Graf závislosti absolutní změny elektrického odporu těles na délce nařiznutí ..	55
obr. 51 Časový záznam posuvu, relativního přetvoření a elektrického odporu uhlíkových senzorů tělesa C2	56
obr. 52 Záznam schodového zatěžování tělesa D2.....	57
obr. 53 Porovnání senzorů mezi vzorky C2 a C3	58
obr. 54 Záznam z uhlíkových senzorů a tenzometru při zatížení a odlehčení vzorku....	58

Seznam tabulek

Tabulka 1 Vstupní hodnoty cívek.....	41
Tabulka 2 Hodnoty M pro $k = \{0,005; 0,01; 0,4\}$	41
Tabulka 3 Výpočet změny proudu pro minimální vzájemnou indukčnost.....	42
Tabulka 4 Výpočet změny proudu pro maximální vzájemnou indukčnost	42

1 Úvod

Potřeba přesného dimenzování, optimální bezpečnosti, důraz na šetření váhy a výrobních nákladů nás nutí vyrábět strojní součásti s naprosto přesným definovaným účelem bez výrazných rezerv pro nehody. Součásti však mohou být nečekaně narušeny při malých nehodách, kdy dojde k zatěžování, s nímž při návrhu nebylo počítáno. Toto poškození pak může být pouhému oku skryté (velmi malé, na vnitřní straně součásti, či pouze nepřístupné kvůli konstrukci). Proto je vhodné takovéto součásti periodicky kontrolovat.

Práce se zabývá problémem z praxe se zaměřením na kompozitní konstrukce. Konkrétním příkladem může být robotický manipulátor KUKA Cobra (viz obr. 1), který je osazen pohyblivou konstrukcí tvořenou několika kompozitovými trubkami a profily (součásti černé barvy viz obr. 1). Při provozování takového stroje může dojít například ke špatnému naprogramování pohybu a k následné kolizi, která může součásti z kompozitu vážně porušit. Tato poškození mohou být skrytá i propracovaným měřicím technikám. Standardem při kontrolování kompozitních materiálů jsou NDT metody (nedestruktivní metody), které ale mají také svá úskalí. Například ultrazvuková metoda, která do NDT spadá není úplně vhodná pro tenkostěnné konstrukce nebo se setkává s problémem vzniku echa kvůli vícevrstevnosti kompozitů.



obr. 1 Robotický manipulátor KUKA Cobra (Carter, 2018)

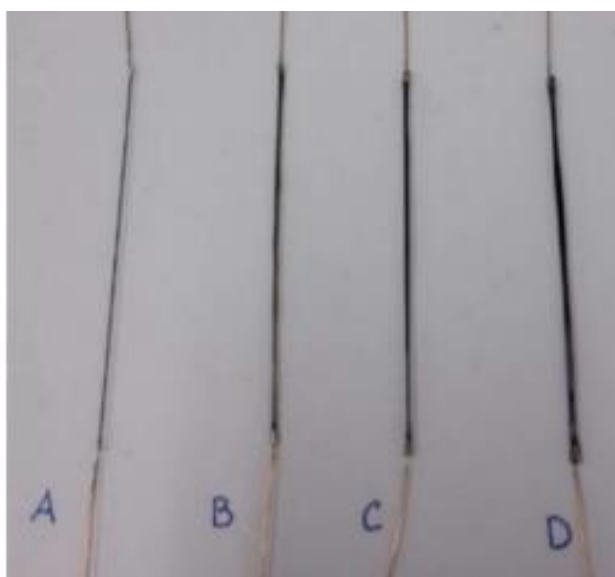
Právě na taková poškození součástí se soustředí tato práce. Pro praktické využití je velmi výhodné umožnit kontrolu jednotlivých součástí bez nutnosti demontáže

Možnosti monitorování kompozitních konstrukcí s využitím vodivosti uhlíkových vláken mechanismu, do kterého jsou součásti zapojeny, protože tím provozovatel šetří náklady (stačí kratší doba odstavení stroje, není nutná kalibrace). Práce se tedy zaměřuje na možnosti takového monitorování, které umožní součást kontrolovat bez demontáže celého mechanismu.

Pro takové měření jsou základní požadavky:

- Bezdrátové propojení snímače a čtecího zařízení (nebo jednoduchá kabeláž s možností připojení/odpojení čtecího zařízení)
- Možnost pokrýt snímač lakem či integrovat do struktury
- Životnost snímače vyšší nebo rovna životnosti součásti

Práce se zabývá možností využít elektrické vlastnosti uhlíkových vláken (elektrický odpor a piezorezistivita) využívaných pro tyto konstrukce tak, aby byly splněny uvedené požadavky. Těchto elektrických vlastností lze využít na celé součásti dle experimentu (Kwon, a další, 2016), který měřil elektrické vlastnosti tyčí z uhlíkového kompozitu při ohybové zkoušce, nebo dle experimentu (Liberton, a další, neznámý), který měřil elektrické chování desky při kvazistatické indentaci. Další možností je využít senzor v podobě svazku vláken spojených pryskyřicí (viz obr. 2), který se následovně chová velmi podobně jako tenzometr – tedy mění svůj elektrický odpor v závislosti na deformaci. Takovéto senzory byly použity v experimentech popsáných v práci (Horoschenkoff, a další, 2012) a (Müller, a další, 2013). Různé typy těchto senzorů pak analyzuje (Schmidová, a další, 2018).



obr. 2 Uhlíkové senzory (Schmidová, a další, 2018)

Možnosti monitorování kompozitních konstrukcí s využitím vodivosti uhlíkových vláken

Poslední už čistě teoretický způsob měření bude využití těchto uhlíkových senzorů pro bezdrátové měření založené na RFID technologii (rádio frekvenční identifikaci) v návaznosti na experiment provedený (Horoschenkoff, a další, 2016).

Pro kontrolu spolehlivosti metod využívajících elektrické vlastnosti uhlíkových vláken bude provedeno experimentální měření, kde budou tyto metody použity zároveň s další kontrolní metodou, a bude vyhodnocováno, do jaké míry odpovídají výsledky hodnotám naměřeným různými metodami.

Práce se nejprve bude zabývat kompozitními materiály obecně, následně se zaměří na poškozování těchto materiálů, způsoby detekce a měření daného poškození a způsoby přenosu měřené informace. Pomocí zmíněného postupu budou shrnuty informace o metodách, které budou použity k měření. Další část práce je věnována experimentálnímu měření – nejprve jeho návrhu a poté vyhodnocení. Naměřené výsledky budou porovnány s podobnými experimenty z literatury. Cílem je z experimentu zjistit, do jaké míry jsou metody založené na elektrických vlastnostech uhlíkových vláken spolehlivé a využitelné v praxi.

S ohledem na výše uvedené byly definovány následující cíle práce:

1. seznámit se s problematikou poškozování kompozitních materiálů
2. provést rešerši možných přístupů detekce poškození uhlíkových kompozitů s využitím elektrických vlastností uhlíkových vláken
3. experimentální ověření možností detekce poškození na zkušebních tělesech
4. porovnání a zhodnocení experimentálních dat

2 Kompozitní materiály

Tato kapitola slouží pro seznámení s kompozitními materiály. Nejprve je nutné vysvětlit, co to jsou kompozitní materiály a jak jsou chápány. Poté budou rozděleny do jednotlivých skupin. Do těchto skupin bude zařazen materiál z konstrukce, která je předmětem práce. Dále bude zmíněn matematicko-fyzikální aparát nutný pro práci s výrobky z kompozitních materiálů.

Dle NASA je kompozitní materiál definován takto: „Kompozitní materiál je kombinace dvou nebo více materiálů (vyztužovací elementy, výplně a spojovací matrice), lišících se v makroměřítku tvarem nebo složením. Složky si v nich zachovávají svou identitu (tzn. vzájemně se úplně nerozpouštějí ani neslučují), ačkoliv na své okolí působí v součinnosti. Každá složka může být fyzikálně identifikována a mezi ní a dalšími složkami je rozhraní.“ (NASA, rok neznámý)

2.1 Obecné rozdělení kompozitních materiálů

Kompozity jsou klasifikovány dle několika základních kritérií dle následujícího schématu (Vrbka, 2008):

- dle materiálu výztuže:
 - kovová (železo, chrom, titan, ...)
 - nekovová
 - organická (aramid, kevlar)
 - anorganická (uhlík, keramika, sklo)
- dle materiálu matrice:
 - kovová (hliník, železo, stříbro, ...)
 - nekovová
 - organická (pryskyřice, polymery)
 - anorganická (keramika, sklo, uhlík)

Možnosti monitorování kompozitních konstrukcí s využitím vodivosti uhlíkových vláken

- dle geometrie výztuže:
 - vláknové
 - jednovrstvé
 - dlouhovláknové
 - jednosměrné vyztužení
 - vícesměrné vyztužení
 - krátkovláknové
 - s náhodnou orientací
 - s přednostní orientací
 - vícevrstvé
 - lamináty
 - hybridy
 - částicové
 - skeletové
- dle využití:
 - žárupevné
 - žáruvzdorné
 - pro letectví
 - ...

Materiál využitý v konstrukci, která je předmětem práce, je v principu vícevrstvý dlouhovláknový kompozit s vícesměrným vyztužením. Jedná se o trubku vyrobenou technologií automatického navíjení na navíjecí trn s využitím jehliček.

2.2 Základní konstitutivní vztahy pro kompozity

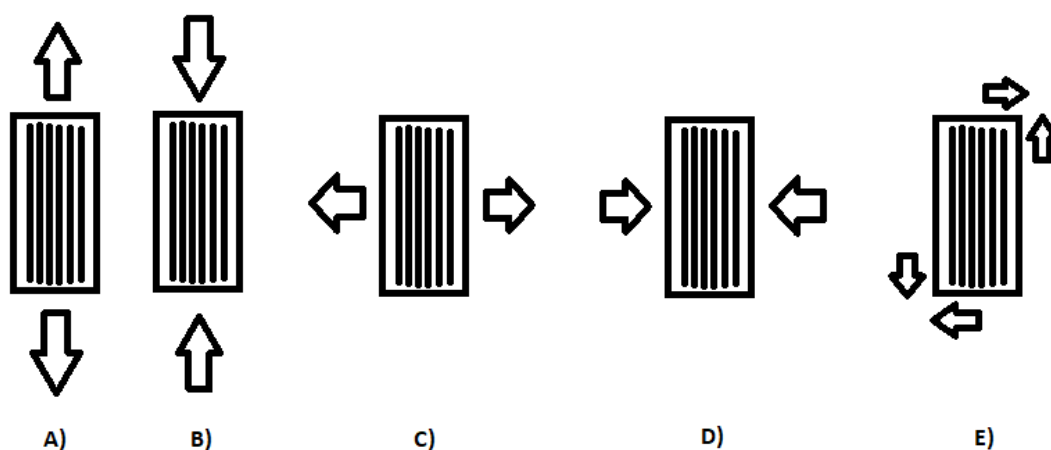
Základní princip chápání a fungování kompozitů je princip synergie. Výsledný materiál získává kombinaci vlastností svých jednotlivých složek. Například pro modul pružnosti v tahovém směru vypadá princip synergie dle směšovacího pravidla s objemovými poměry takto dle rovnice (1). Materiál tedy získává určitý vážený průměr vlastností matrice a vláken.

$$E_L = E_v V_v + E_m (1 - V_v) \quad (1)$$

Kompozitní materiály mohou být vyráběny s orientovanou výztuží nebo s náhodně rozloženou, čímž se snaží co nejvíce přiblížit homogennímu izotropnímu materiálu, tedy materiálu, který má ve všech směrech stejné vlastnosti.

Definice (Vrbka, 2008): „Pokud je izotropní materiál namáhán v určitém směru pouze normálním napětím, potom dochází pouze ke změně rozměrů a nikoliv tvaru, platí tedy $\varepsilon \neq 0, \gamma = 0$. V případě působení smykového napětí dojde pouze ke změně tvaru, nikoliv rozměrů, tedy platí $\varepsilon = 0, \gamma \neq 0$. Pokud je anizotropní materiál namáhán v určitém směru pouze normálním napětím, potom dochází ke změně rozměrů i tvaru, platí tedy $\varepsilon \neq 0, \gamma \neq 0$, což platí i v případě působení smykového napětí.“

Kompozitní materiály s orientovanou výztuží ale nelze zařadit do skupiny izotropních. Záleží na tom, zda kompozit zatěžujeme ve směru výztuže, proti směru výztuže, v tahu, tlaku, či smyku, jak popisuje obr. 3 - A) tah ve směru výztuže; B) tlak ve směru výztuže; C) tah kolmo na výztuž; D) tlak kolmo na výztuž; E) smyk ve směrech vláken a kolmo na vlákna. Přičemž nejvíce rizikové je zatížení na tah ve směru kolmém na výztuž a zatížení smykové. Při náhodném zatížení pak například v případě nehody může dojít k zatížení jiným způsobem, než na který byla součást původně dimenzována a k velmi jednoduchému porušení součásti.



obr. 3 Způsoby zatížení laminy

2.2.1 Kompozity jako čistě anizotropní materiály

Čistě anizotropní model kompozitu je nejobecnějším modelem, který můžeme použít. Pro obecný anizotropní materiál platí Hookeův zákon v takovémto tenzorovém tvaru:

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{41} & C_{42} & C_{43} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{51} & C_{52} & C_{53} & C_{54} & C_{55} & C_{56} \\ C_{61} & C_{62} & C_{63} & C_{64} & C_{65} & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix}$$

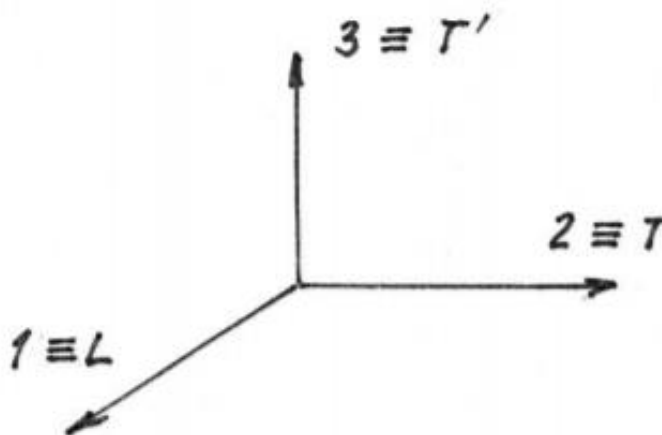
obr. 4 Hookeův zákon pro obecný anizotropní materiál (Vrbka, 2008)

Matice C zde představuje matici tuhostní (matice tuhostních materiálových konstant), která obsahuje celkem 36 prvků, ale pomocí diferenciálu měrné energie lze dokázat, že matice je symetrická, a tedy nezávislých prvků je 21. Bohužel tento model je velmi složitý pro praktické využití pro svůj velký počet materiálových konstant. (Vrbka, 2008)

2.2.2 Kompozity jako ortotropní materiály

Model ortotropního materiálu se využívá proto, že částečně řeší problém velmi velkého počtu materiálových konstant modelu obecně anizotropního. U tohoto modelu existují tři hlavní ortotropní osy, které jsou vzájemně kolmé (viz obr. 5). Pokud normálové napětí působí ve směru jedné z těchto os, pak způsobí pouze poměrné přetvoření ε , ale zkos γ nikoliv.

Tento model je možné použít, pokud ortotropní osy odpovídají hlavním materiálovým osám.



obr. 5 Hlavní ortotropní souřadnicový systém (Vrbka, 2008)

Hookeův zákon pro obecný ortotropní materiál pak vypadá následovně (viz obr. 6):

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix}$$

obr. 6 Hookeův zákon pro obecný ortotropní materiál (Vrbka, 2008)

Velmi často se ale používá inverzní tvar Hookeova zákona, ve kterém vystupuje matice S, takzvaná matice poddajnosti. Důvodem je, že prvky matice poddajnosti jsou přímo vyjádřitelné pomocí tzv. inženýrských konstant, mezi které patří tahový modul pružnosti E, smykový modul pružnosti G a Poissonovo číslo μ . Jsou zobrazeny na obr. 8. (Vrbka, 2008)

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & 0 & 0 & 0 \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & 0 & 0 & 0 \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{bmatrix}$$

obr. 7 Inverzní vyjádření Hookeova zákona pro obecný ortotropní materiál (Vrbka, 2008)

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\mu_{21}}{E_2} & -\frac{\mu_{31}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\mu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & -\frac{\mu_{32}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\mu_{13}}{E_1} & -\frac{\mu_{23}}{E_2} & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{31}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{bmatrix}$$

obr. 8 Hookeův zákon po doplnění inženýrských konstant (Vrbka, 2008)

Možnosti monitorování kompozitních konstrukcí s využitím vodivosti uhlíkových vláken

3 Poškození uhlíkových kompozitů

Pro pochopení možností detekce možných porušení v kompozitním materiálu, což je hlavním cílem této práce, je nejprve nutné porozumět samotnému porušování kompozitů. Problematika poškození kompozitních materiálů se totiž velmi významně liší od poškození homogenních materiálů. Kompozit je definován jako materiál složený ze dvou či více složek, a tedy i poškození může postihovat pouze jednotlivé složky. Kromě toho, že se používají dvě složky k výrobě jedné vrstvy (laminy), využíváme i skládání více vrstev k výrobě laminátů. Vzhledem k této složkami vytvořené nerovnoměrnosti ve vnitřní struktuře dochází u kompozitů mnohem častěji k šíření poškození z vnitřku materiálu, což s sebou nese velkou řadu problémů při snaze odhalit případné poškození.

Rozdělení porušení kompozitních materiálů (Vrbka, 2008); (Kadlec, 2012):

- porušení vlákna
- porušení matrice
- celkové porušení
 - oddělení vláken od matrice
 - oddělení jednotlivých vrstev

Mechanismy lomu (Greenhlagh, 2009):

- vláknový
 - translaminární
- mezivláknový
 - intralaminární
 - interlaminární

3.1 Porušování v závislosti na typu zatížení

Jak již bylo zmíněno, u kompozitních materiálů závisí výrazně na způsobu zatížení a směru tohoto zatížení. Podle způsobu zatížení kompozitu pak dochází k různým druhům porušení a různým mechanismům šíření trhlin.

3.1.1 Porušování při zatížení podélně tahem

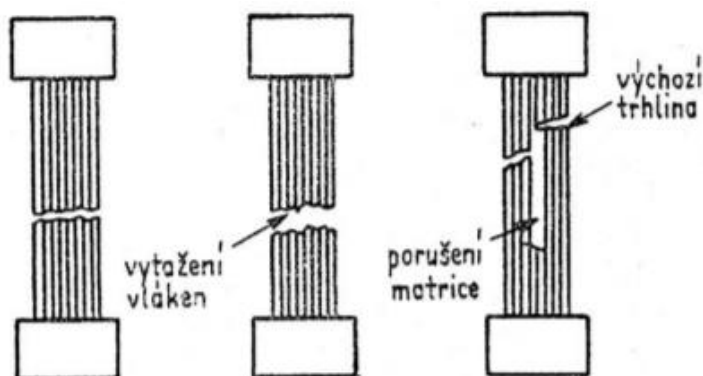
Při namáhání podélným tahovým zatížením se vyskytují tři základní mechanismy porušení, které závisí na materiálových vlastnostech jednotlivých složek a technologii, která byla pro výrobu kompozitu zvolena. (Vrbka, 2008)

Možnosti monitorování kompozitních konstrukcí s využitím vodivosti uhlíkových vláken

Mechanismy porušení dlouhvláknového kompozitu při podélném tahovém zatížení (Vrbka, 2008):

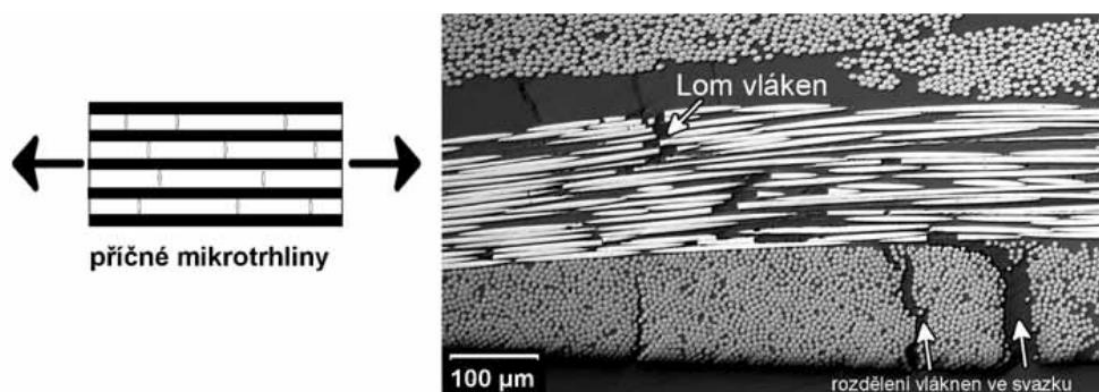
- křehké porušení
- křehké porušení s vytažením vláken
- křehké porušení s oddělením vláken, nebo porušením matrice

Tyto tři body jsou zleva doprava zachyceny na obr. 9.



obr. 9 Mechanismy porušení dlouhvláknového kompozitu při podélném tahovém zatížení (Vrbka, 2008)

Poškození se začíná šířit příčnými mikrotrhlinami v matrici a vláknech (viz obr. 10), přičemž se jedná o náhodný proces. K samotnému lomu dochází, když se přetrhne kritické množství vláken. (Kadlec, 2012)



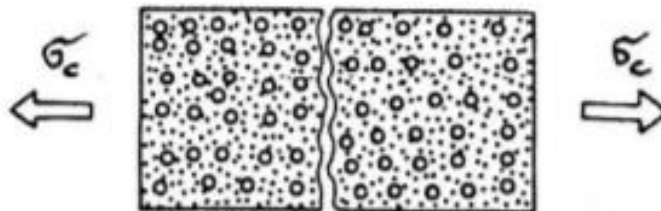
obr. 10 Porušení kompozitu při podélném tahovém zatížení (Kadlec, 2012)

3.1.2 Porušování při zatížení příčně tahem

Příčinou porušování při tomto způsobu namáhání je napětí na rozhraní vlákna a matrice, tedy mezi jednotlivými fázemi. Výjimečněji pak dochází k příčnému porušování vláken, pokud mají nižší pevnost. Při porušování se uplatňují tyto tři hlavní mechanismy (Vrbka, 2008):

Možnosti monitorování kompozitních konstrukcí s využitím vodivosti uhlíkových vláken

- porušování matrice tahovým napětím
- oddělování složek na mezifázovém rozhraní
- štěpení vláken



obr. 11 Porušení kompozitu při příčném tahovém zatížení (Vrbka, 2008)

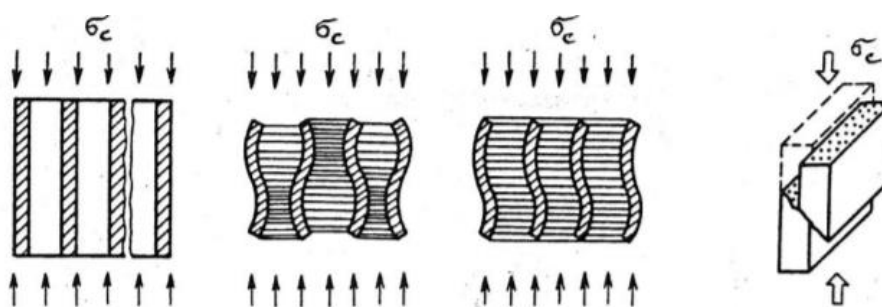
Trhlina se poté šíří směrem kolmým na směr zatížení (prochází rovinou hlavního napětí), jak ukazuje obr. 11. (Vrbka, 2008)

3.1.3 Porušování při zatížení podélně tlakem

Při podélném tlakovém namáhání se objevují čtyři hlavní mechanismy porušování (Vrbka, 2008):

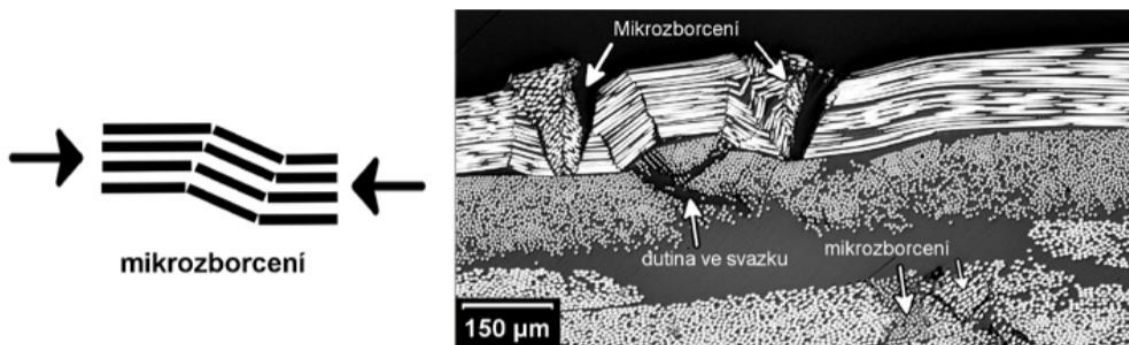
- příčné tahové porušení
- mikroprohnutí vláken s tahovou deformací
- mikroprohnutí vláken se smykovou deformací
- smykové porušování

Tyto čtyři body zobrazuje zleva doprava obr. 12.



obr. 12 Mechanismy porušení dlouhovláknového kompozitu při podélném tlakovém zatížení (Vrbka, 2008)

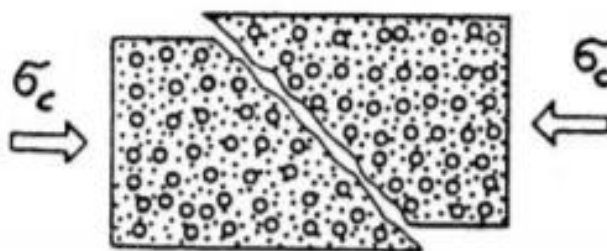
Trhlina se pak začíná šířit pomocí mikrozborecení vláken, které je doprovázeno vznikem dutin v matrici, jak ukazuje obr. 13. Dutiny vznikají díky doprovodnému tahovému napětí. (Kadlec, 2012)



obr. 13 Porušení kompozitu při podélném tlakovém zatížení (Kadlec, 2012)

3.1.4 Porušování při zatížení příčně tlakem

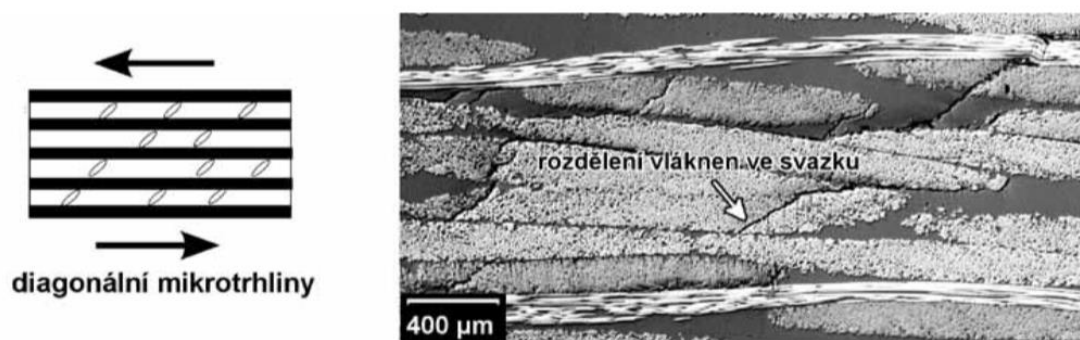
Při zatížení kompozitu příčně tlakem dochází k porušování matrice smykem. Častým doprovodným jevem je štěpení vláken. Trhlina se šíří rovinou, která odpovídá maximálnímu smykovému napětí, což odpovídá úhlu 45° od směru zatížení, jak ukazuje obr. 14. (Vrbka, 2008)



obr. 14 Porušování kompozitu při příčném tlakovém zatížení (Vrbka, 2008)

3.1.5 Porušování při zatížení smykem

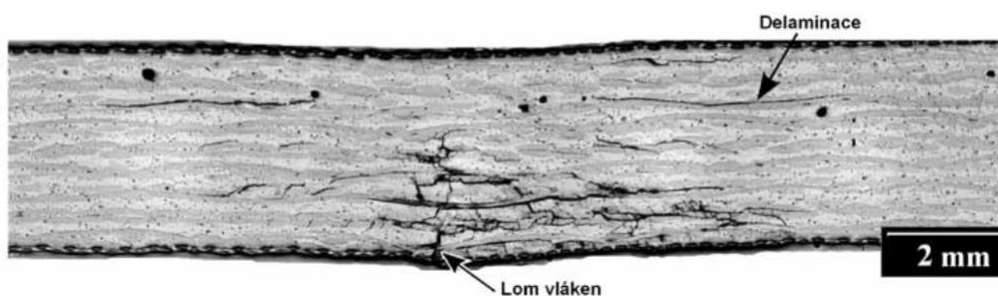
Při zatížení kompozitu smykovým napětím dochází ke dvěma hlavním mechanismům šíření trhlin. Jedná se o smykové porušování matrice (vznik diagonálních trhlin viz obr. 15) a oddělování složek, tedy buď oddělení vláken od matrice nebo oddělení jednotlivých vrstev (delaminace). (Vrbka, 2008) (Kadlec, 2012)



obr. 15 Porušení kompozitu při smykovém zatížení (Kadlec, 2012)

3.1.6 Porušování při zatížení rázem

Při rázovém porušení kompozitního materiálu je důležité rozlišit velikost rázu. Při rázech s nižší energií dochází spíše k tvoření příčných trhlin ve vláknech a matrici. Při nárazech s vyšší energií pak převažuje oddělování vrstev, tedy delaminace. obr. 16 poté ukazuje, jak může v kompozitu vypadat rozložení těchto dvou mechanismů šíření trhlin po rázové zkoušce. (Kadlec, 2012)



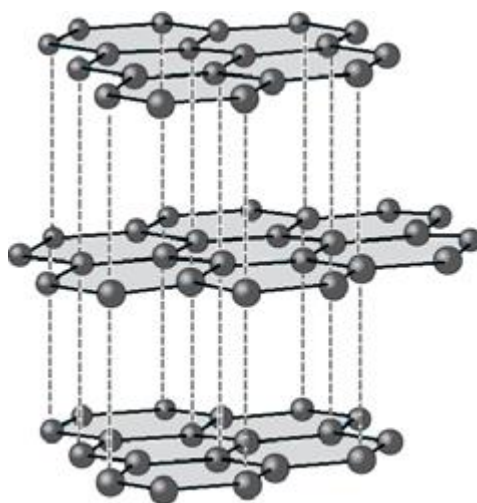
obr. 16 Porušení kompozitu rázem (Kadlec, 2012)

4 Způsoby měření poškození a deformací využívající elektrické vlastnosti uhlíkových vláken

Z rešerše publikovaných experimentů plyne, že hlavní elektrickou vlastností využitelnou pro měření poškození a deformací v uhlíkových kompozitech je elektrický odpor vláken. Půjde tedy o nepřímá měření, kde se ze změn v elektrickém odporu uhlíkových vláken bude vyvozovat deformace a poškození, na kterých bude odpor vláken závislý. Měření elektrického odporu uhlíkových vláken pak lze provést dvěma hlavními způsoby. Prvním je měření elektrického odporu vláken v samotné součásti. Druhým je měření elektrického odporu uhlíkového senzoru (svazek vláken spojený pryskyřicí). Na tyto způsoby se práce zaměřuje.

4.1 Elektrické vlastnosti uhlíkových vláken

Uhlík je znám pro svůj výskyt v různých fázích. Tyto fáze s sebou nesou i různé fyzikální a chemické vlastnosti. Například uhlík ve formě diamantu má vysoký měrný elektrický odpor, a tedy nízkou měrnou elektrickou vodivost. Jinak je tomu ale například u grafitu, který díky své krystalové mřížce (viz obr. 17) funguje jako vodič ve směru grafitických rovin a jako izolant ve směru kolmém na grafitické roviny (proud tímto směrem stále vede, ale výrazně méně). Ve směru grafitických rovin grafit umožňuje jednodušší pohyb volných elektronů než vodivé kovy, má však na rozdíl od těchto kovů méně volných elektronů (Hrazdára, 2010). V praxi grafit a vodivé kovy vedou proud podobně.



obr. 17 Hexagonální mřížka grafitu (Cidlová, a další, 2018)

Možnosti monitorování kompozitních konstrukcí s využitím vodivosti uhlíkových vláken

Uhlíková vlákna mají elektrické vlastnosti velmi podobné grafitu. Jejich vodivost je sice nižší, ale to dodává uhlíkovým vláknům dostatečně velký elektrický odpor, aby byl spolehlivě měřitelný a zároveň ne příliš velký, aby byla vlákna izolanty.

Další důležitou vlastností uhlíkových vláken je jejich piezorezistivita. Jedná se o vlastnost, která dává měrný elektrický odpor materiálu do vztahu s mechanickým namáháním. Díky této vlastnosti je tak možné sledovat velikost změny elektrického odporu a převádět ji na velikost deformace.

4.1.1 Měření elektrického odporu součástí

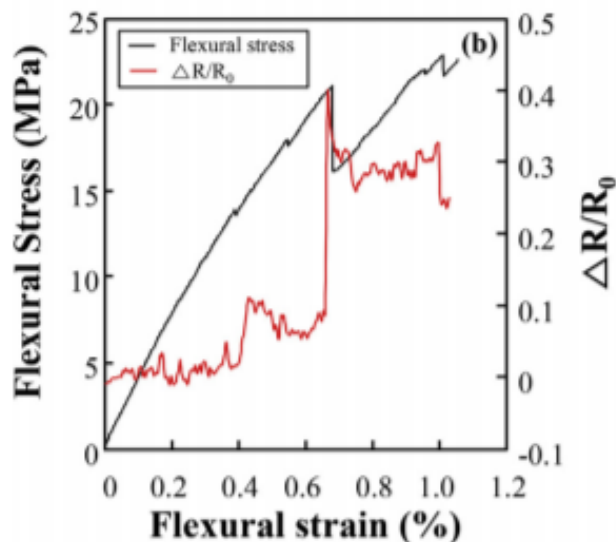
Tento způsob měření využívá schopnosti některých materiálů, takzvané vlastní detekce porušení (self-sensing). Znamená to, že při poškozování těchto materiálů se mění veličiny, které se používají jako charakteristické veličiny senzorů. V případě uhlíkového kompozitu je takovouto veličinou elektrický odpor. (Wang, a další, 2006)

Vzhledem k tomu, že absolutní hodnoty elektrického odporu se výrazně liší například pro různě velké součásti, je zvykem používat relativní změnu elektrického odporu, tedy poměr změny odporu tělesa vůči původnímu odporu nepoškozeného tělesa. Vzorec je popsán v rovnici (2), kde R značí momentální odpor R_0 značí původní odpor a výsledná relativní změna je v procentech.

$$\delta(R) = \frac{R - R_0}{R_0} * 100 \quad (2)$$

Tato metoda už byla využita v několika studiích, mezi nimi (Wang, a další, 2006) a (Kwon, a další, 2016). A vychází z nich hlavní poznatek takový, že změna elektrického odporu při zatěžování má dvě hlavní podoby viditelné v grafu (viz obr. 18):

- slabý nárůst elektrického odporu vlivem deformace
- skokový nárůst elektrického odporu vlivem vzniku trhlin



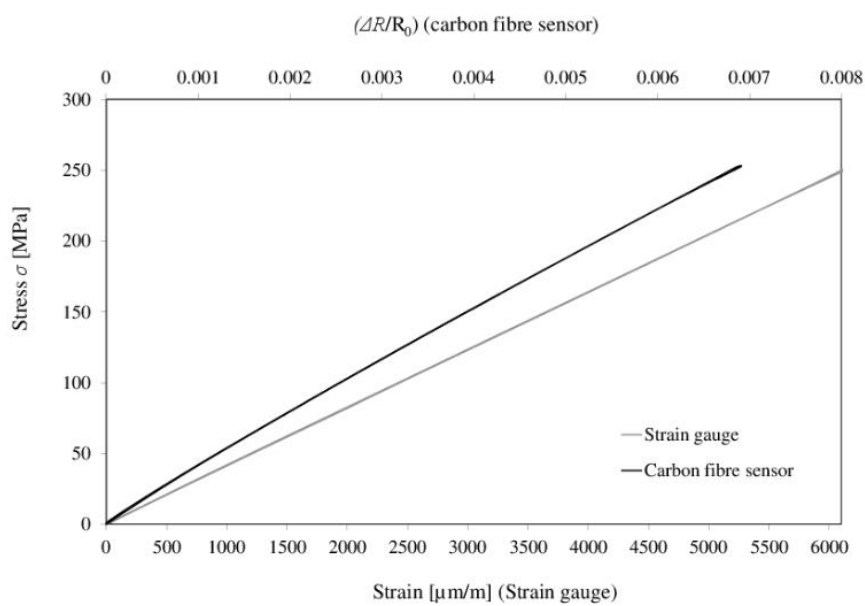
obr. 18 Závislost napětí v ohybu a změny relativního elektrického odporu na přetvoření v ohybu (Kwon, a další, 2016)

4.1.2 Měření elektrického odporu uhlíkových senzorů

Uhlíkové senzory mění svůj elektrický odpor v závislosti na deformaci velmi podobně jako celá součást. Senzor lze ale na součást umístit na libovolné místo. Tedy si můžeme vybrat kritické body na součásti, kde poškození očekáváme.

Studie (Horoschenkoff, a další, 2012) prováděla výzkum piezorezistivního chování uhlíkových senzorů a došla k závěru, že uhlíkové senzory mají požadovanou lineární piezorezistivní charakteristiku (viz obr. 19), dokud se pohybují do určitého limitního přetvoření, a to při zatěžovacím i odlehčovacím režimu. Podobně jako u měření elektrického odporu celé součásti, v případě porušení vláken uvnitř senzoru dochází ke skokové a nevratné změně elektrického odporu.

Možnosti monitorování kompozitních konstrukcí s využitím vodivosti uhlíkových vláken



obr. 19 Závislost ohybového napětí na poměrném prodloužení a relativní změně elektrického odporu uhlíkového senzoru (Horoschenkoff, a další, 2012)

Možnosti monitorování kompozitních konstrukcí s využitím vodivosti uhlíkových vláken

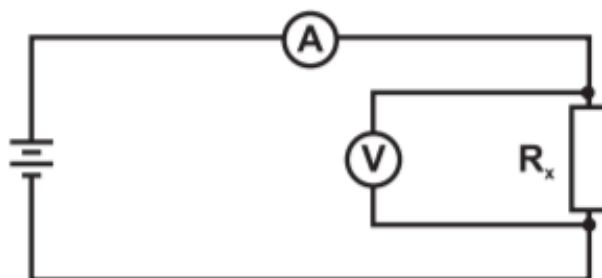
5 Možnosti připojení k měřidlům

Pro dosažení dobrých výsledků měření je nutné vybrat také správnou metodu připojení k měřidlům. Je to potřeba obzvláště v případě měření elektrických odporů, kde je nutné zajistit, aby samotné měřicí vedení nemělo větší elektrický odpor než měřený senzor. V rámci této kapitoly bude ještě teoreticky navržen RFID měřicí zařízení, budou zmíněna jeho úskalí, a to jak pro využití, tak pro jeho výrobu.

5.1 Čtyřvodičové měření elektrického odporu

Nejjednodušší metodou pro měření elektrického odporu je Ohmova metoda. Pro obr. 20 je Ohmova metoda definována rovnicí (3). První zlomek vyjadřuje úplně nejjednodušeji, že elektrický odpor součásti odpovídá poměru napětí na součásti vůči proudu procházejícímu součástí. Poté je vyjádřen proud procházející součástí jako rozdíl proudu ampérmetrem a voltmetrem. Nakonec je využito zjednodušení pro malé elektrické odpory – pokud je odpor R_x výrazně menší než odpor voltmetru, poté je možné zanedbat úbytek proudu do voltmetru.

$$R_x = \frac{U_x}{I_x} = \frac{U_x}{I_A - I_V} \approx \frac{U_x}{I_A} \quad (3)$$



obr. 20 Schéma pro čtyřvodičové měření odporu (Sonel S.A. Company, 2013)

Z důvodu minimalizace chyb v měření byla zvolena čtyřvodičová metoda. Jedná se o metodu, která se obvykle využívá pro měření malých elektrických odporů v řádech i setin ohmů. Tato metoda, jak popisuje (Tichý, 1998), eliminuje odpor samotného vedení, které může představovat odpor v rámci i desetin ohmů. Pro elektrické odpory v řádech jednotek až desítek ohmů toto představuje už zanedbatelnou chybu.

Jedinou citelnou nevýhodou této metody je výrazně větší množství kabeláže pro měřicí aparaturu. To nepředstavuje výrazný problém pro laboratorní měření, ale pro instalaci v praxi to již může znamenat značné komplikace.

Možnosti monitorování kompozitních konstrukcí s využitím vodivosti uhlíkových vláken

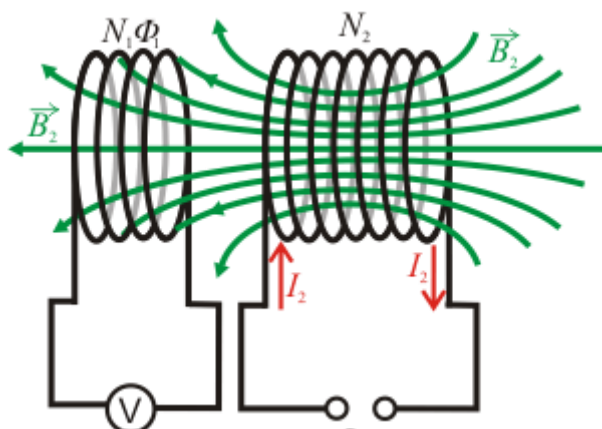
Tento způsob měření elektrického odporu byl využit i v podobném experimentu (Kwon, a další, 2016) a přinesl dle autorů dostatečně přesné výsledky.

5.2 Bezdrátový přenos pomocí RFID

Tato metoda byla úspěšně využita v experimentu provedeném (Horoschenkoff, a další, 2016) a to pro měření za použití senzorů ve formě uhlíkových senzorů. Jedná se o metodu splňující všechny požadavky zmíněné v úvodu práce (hlavně možnost bezdrátového propojení čtečky a senzoru). Bohužel příprava této metody není jednoduchá a její funkčnost není ani při správném návrhu stoprocentně zaručena. Je tomu tak z důvodu vysokých výrobních tolerancí elektronických součástek. Proto je potřeba celý problém hlouběji analyzovat a zjistit všechna jeho úskalí.

Rádio frekvenční identifikace (RFID) je technologií, která v posledním desetiletí získává stále pevnější pozici v každodenním životě. Ať se jedná o odemykání dveří pomocí RFID čipů, řazení zboží ve velkoskladech, nebo o ochranné značení výrobků v obchodech, každý z nás s touto technologií přichází do styku, aniž by to věděl.

Pro pochopení základů funkce RFID technologií je třeba znát hlavní principy v oblasti elektromagnetismu. Tato technologie totiž využívá schopnosti cívek indukovat napětí. obr. 21 ukazuje proud procházející cívkou vpravo, která je napájena ze zdroje. Tím kolem ní vzniká magnetické pole o magnetické indukci B_2 . Tato cívka je tedy vysílačem magnetického pole. Jak ukazují zelené siločáry, cívka vlevo je v dosahu tohoto magnetického pole a toto magnetické pole v ní vyvolává indukované napětí (vzniklé napětí je znázorněno v obrázku voltmetrem zapojeným v obvodu). Cívka vlevo je tedy přijímačem, který zpětně působí na vysílač.



obr. 21 Vzájemná indukčnost cívek (reseneulohy.cz, 2019)

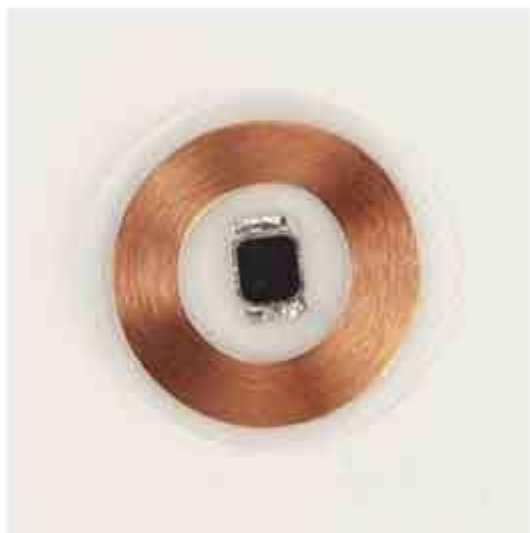
Možnosti monitorování kompozitních konstrukcí s využitím vodivosti uhlíkových vláken

RFID technologie pak využívají jeden obvod s cívkou jako vysílač signálu. Druhá cívka tento signál přijme a odesílá svou odpověď zpět na cívku první.

5.2.1 Součástky pro přenos pomocí RFID

RFID technologie využívá v principu jen dva hlavní komplexní přístroje – čtečku a tag. Tag je menší zařízení (elektrický obvod), které můžeme buď umístit na sledovaný předmět (balík ve skladu) a dát mu tím jasné označení nebo může představovat přenosný identifikátor (karta, čip) například pro vstup do budov. Čtečka potom identifikuje signály z tagů a vyhodnocuje například, zda otevřít zmiňované dveře budovy.

Tagy jsou všech možných druhů a velikostí. Tagy jsou k sehnání v různých pouzdrech například v podobě čipů, karet, samolepek, ale jsou k prodeji i čistě jako obvod, který si každý může zapouzdit sám, viz obr. 22.



obr. 22 RFID tag určený k vlastnímu zapouzření (RFID4u.com, rok neznámý)

Čtečka může být již velmi propracovaný nástroj i s možnostmi vlastního programování, může to být i už naprogramovaný přístroj viz obr. 23 nebo se může jednat čistě o obvod připojený k řídicí stanici typu Arduino a podobným viz obr. 24.



obr. 23 Čtečka RFID přenosná (Conrad.cz, rok neznámý)



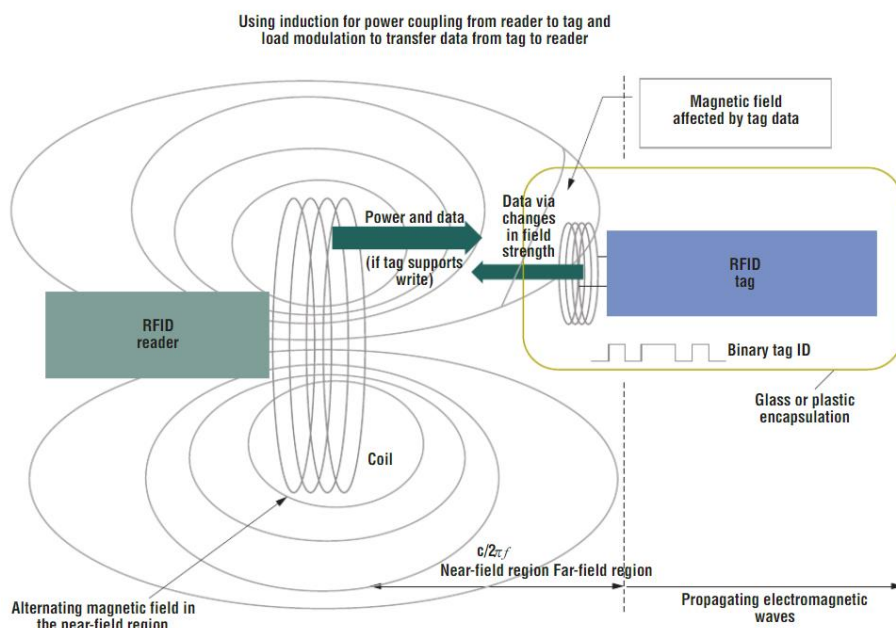
obr. 24 Čtečka pro vlastní naprogramování (Luboš, 2019)

5.2.2 Typy RFID technologií dle frekvencí

Rádio frekvenční identifikace může sloužit jak na malé, tak na velké vzdálenosti. Je k tomu ale nutné využití správného typu této technologie. Základní princip je takový, že vysoké frekvence ve spojení s vhodným typem tagu dosáhnou i na velké vzdálenosti, zatímco nízké frekvence s jednodušším tagem jsou využitelné pouze na pár jednotek centimetrů. (Want, 2006)

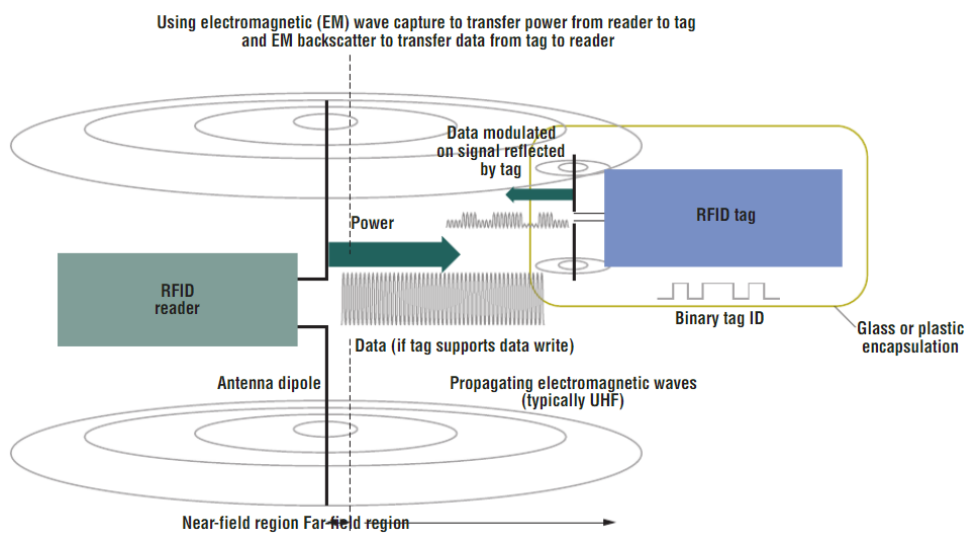
Pro komunikaci na krátké vzdálenosti se využívají nízké frekvence. Za ty se v případě RFID považují hodnoty v řádu stovek kHz. V závislosti na místě využití, a tedy i míře rušení z okolí, se pak vzdálenost přečtení tagu čtečkou pohybuje okolo 3 cm. V nejlepších případech se můžeme dostat až na 10 cm. Pro konfiguraci na krátkou vzdálenost využíváme takzvané pasivní tagy. To jsou tagy bez vlastního zdroje a elektrický proud v nich je vyvozen pouze díky indukovanému napětí z cívky ve čtečce. Cívka ve čtečce tedy zaktivuje cívku v tagu. Tím vzniká oblast ovlivněná oběma magnetickými poli, kterou čtečka přečte a rozkóduje ID tagu, jak popisuje obr. 25. (Want, 2006)

Možnosti monitorování kompozitních konstrukcí s využitím vodivosti uhlíkových vláken



obr. 25 Schéma čtečka-tag na krátkou vzdálenost (Want, 2006)

Pro RFID technologie na velkou vzdálenost už nefunguje princip vzájemné indukčnosti. Je tedy nutné využít tagu s vlastním zdrojem – aktivního tagu. Princip poté funguje tak, že čtečka i tag vysílají každý samostatně jedno magnetické pole. Když se tato dvě pole sejdou, vyšle tag svá data tentokrát na vysoké frekvenci pohybující se nad stovkami MHz až do jednotek GHz. To vše popisuje obr. 26. (Want, 2006)



obr. 26 Schéma čtečka-tag na velkou vzdálenost (Want, 2006)

Možnosti monitorování kompozitních konstrukcí s využitím vodivosti uhlíkových vláken

6 Návrh experimentu

Cílem experimentu je potvrdit či vyvrátit možnosti detekování deformace a poškození pomocí elektrických vlastností uhlíkových vláken popsaných v kapitole 3. Jedná se o využití celé součásti jako senzoru a poté již zmíněných uhlíkových senzorů. Toto s sebou nese i otázku vhodného připevnění uhlíkových senzorů a vhodnou technologii výroby kontaktů na zkušebních tělesech.

Pro uskutečnění měření je zapotřebí určit nejprve několik vstupních parametrů. Prvním je zkušební těleso, druhým způsob namáhání, třetím způsob zapojení a čtvrtým možnost porovnání dat pro odhadnutí velikosti poškození.

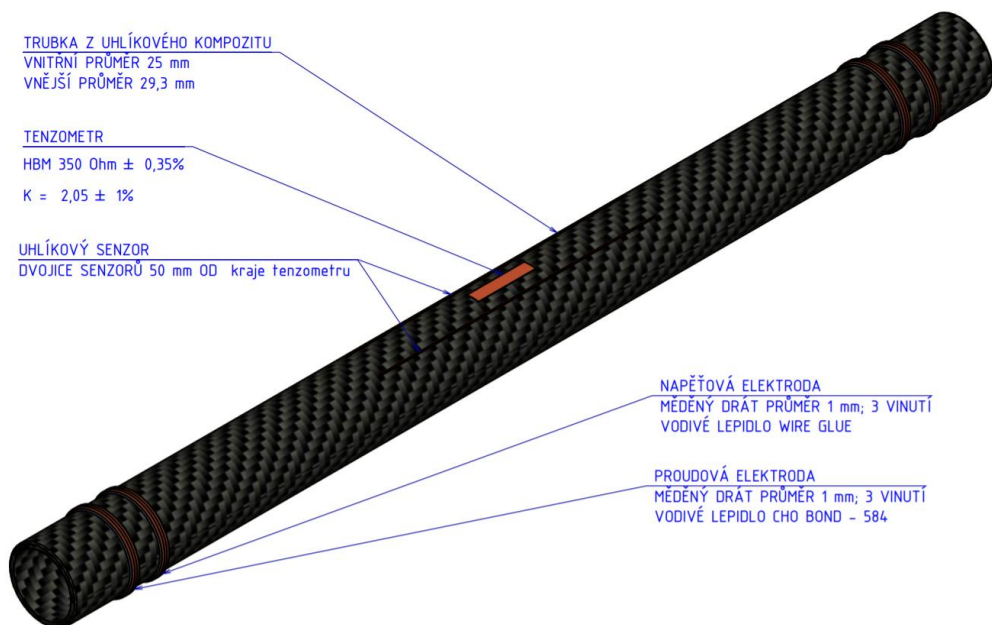
6.1 Zkušební těleso

Jako polotovar pro zkušební těleso bude použita trubka kruhového průřezu z uhlíkového kompozitu o vnitřním průměru 25 mm a vnějším průměru 29,3 mm dodaná firmou CompoTech, která odpovídá svou výrobní technologií součástí využívaným pro konstrukce manipulátorů zmíněným v úvodu práce. Rozměry samotného zkušebního tělesa byly zvoleny na základě doporučení z normy (ASTM D790, 2003) společně s doporučeným počtem zkoušených těles. Norma doporučuje poměr mezi vzdáleností podpor a průměrem trubky větší nebo rovný 16:1 a počet zkoušených těles alespoň 5. Těles bylo vyrobeno 6. Vyrobeny byly ve dvou sadách po třech pro dva různé postupy při zatěžování (na více těles nebyl materiál).

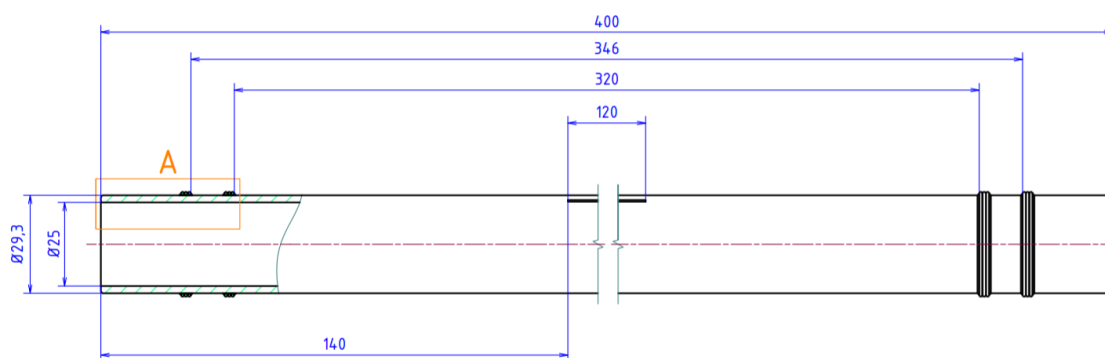
Délka zkušebního tělesa byla tedy zvolena 400 mm a vždy 24 mm od kraje se bude nacházet poslední část vinutí měděného kontaktu, který je součástí proudové elektrody. 10 mm od proudových elektrod budou stejným postupem vyrobeny napěťové elektrody. Elektrody byly vytvořeny ovinutím několika smyček měděného nepovlakovaného drátu o průměru 1 mm. Pro zlepšení kontaktu mezi drátem a uhlíkovými vlákny v trubce bude použito vodivé lepidlo CHO BOND - 584. Toto podrobně zobrazují obr. 28, obr. 28 a obr. 29.

Dále je těleso osazeno třemi senzory. Jedním je tenzometr, který při zkoušce bude měřit poměrné prodloužení spodního vlákna (obr. 28 ho zobrazuje na horním vláknu). Další dva senzory budou vyrobeny z uhlíkových vláken a každý bude připevněn jiným lepidlem. Pro experiment byla vybrána lepidla X60 od firmy HBM a CC-33A firmy Kyowa, ke kterému byl využit ještě aktivátor.

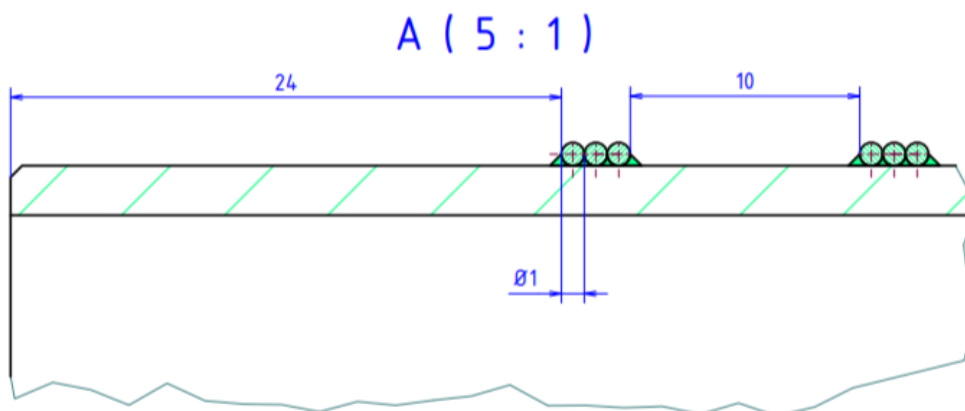
Možnosti monitorování kompozitních konstrukcí s využitím vodivosti uhlíkových vláken



obr. 27 Zkušební těleso



obr. 28 Rozměry zkušebního tělesa

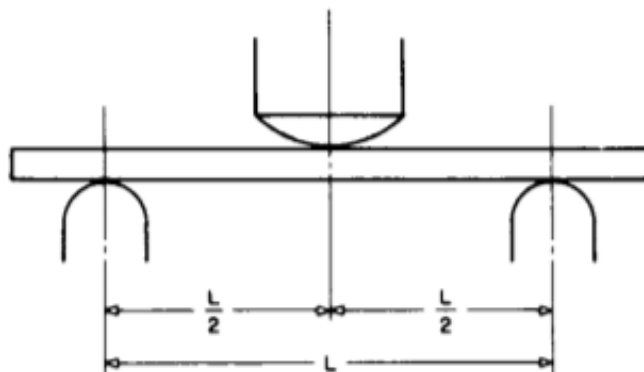


obr. 29 Detail kontaktů na zkušebním tělese

Možnosti monitorování kompozitních konstrukcí s využitím vodivosti uhlíkových vláken

6.2 Zvolený zkušební případ

Zkušební tělesa projdou zkouškou ve třibodové ohybu dle normy (ASTM D790, 2003). Schéma zkoušky zobrazuje obr. 30.



obr. 30 Schéma třibodového ohybu (ASTM D790, 2003)

Vzdálenost podpor L je volena v závislosti na minimálním doporučeném poměru tloušťka stěny trubky na vzdálenosti podpor 1:16, který by měl zajistit, že těleso je skutečně namáháno na ohyb bez výrazného vlivu smyku. Vzdálenost podpor je tedy zvolena 270 mm. Tato vzdálenost by totiž měla být menší, než je vzdálenost kontaktů, která je 320 mm, aby došlo ke změření celé změny elektrického odporu způsobené deformací. Dále byla volena vzdálenost menší, aby nemohlo dojít ke kolizi kontaktů s konstrukcí zkušebního stroje.

6.3 Simulace poškození naříznutím

Pro možnost klasifikace velikosti poškození budou všechna zkušební tělesa vyrobena v párech. Jedno těleso podstoupí klasickou normalizovanou zkoušku třibodovým ohybem do poruchy tělesa, zatímco na druhém tělese proběhne nejprve měření při výrazně menších silách, aby nedošlo k poškození, a následně budou využity k vytvoření umělého poškození naříznutím. Celkem bylo připraveno 6 vzorků, tedy 3 pro destrukční zkoušku a 3 pro nedestrukční zkoušku následovanou naříznutím.

Ze simulovaného poškození bude možné určit, jaká je změna elektrického odporu v závislosti na velikosti trhliny vytvořené naříznutím. Odebraný materiál bude představovat trhlínu v materiálu, zbytek bude zastupovat nepoškozenou část tělesa.

Možnosti monitorování kompozitních konstrukcí s využitím vodivosti uhlíkových vláken

6.4 Vybrané způsoby zaznamenání poškození

Na zkušebním tělese je, jak už bylo zmíněno, více senzorů. Změna elektrického odporu ze samotné součásti bude přenášena pomocí čtyřvodičového zapojení. Toto zapojení umožní minimalizovat chyby dané technikou měření a chybovost se tedy přesune z většiny na zkušební tělesa. Tím bude jednodušší klasifikace metody.

Původně měla být změna elektrického odporu z uhlíkového senzoru přenášena pomocí bezdrátového RFID systému a změna elektrického odporu se měla vypočítat nepřímo ze změny elektrických veličin RFID obvodů. Tato metoda nakonec nebyla využita pro měření z důvodu komplikací popsanych v kapitole 6.5.8. Místo této metody bylo vybráno opět čtyřvodičové zapojení pro měření elektrického odporu pro svou vysokou přesnost a nízkou chybovost.

Jako porovnávací metoda byla vybrána tenzometrie. Vzhledem k tomu, že se od senzorů očekává podobné chování závislé na deformaci. Tenzometr bude k ústředně připojen opět čtyřvodičově za použití předdefinovaného půlmostového zapojení v měřicí ústředně.

6.5 Návrh RFID aparatury

Dle poznatků z kapitoly 5.2 a jejích podkapitol je nutné určit přesné technologie a typy součástek, které budou využity. Po určení typu součástek je nutné určit ještě jejich elektrické vlastnosti a vše převést na výrobitelný model.

6.5.1 Výběr tagu

Při výběru tagu nejprve řešíme otázku typu, tedy aktivní nebo pasivní. V případě měření už bylo zmíněno, že nechceme žádnou kabeláž, tedy napájení aktivního tagu ze sítě je nemožné, zůstává možnost aktivního tagu s vlastní baterií nebo možnost pasivního tagu. Vzhledem k tomu, že tag musí mít delší životnost než měřená součást, je vhodnější volbou pasivní tag, který se nemůže vybit, je i levnější variantou. Tato volba se shoduje i se studií (Horoschenkoff, a další, 2016), která podobné měření prováděla. Vzhledem k volbě pasivního tagu víme, že měření bude prováděno z blízkosti, a tedy využijeme nízké frekvence, opět jako ve studii (Horoschenkoff, a další, 2016).

Další otázkou je výběr vhodného pouzdra. Protože chceme senzor v podobě tagu umístit přímo na kompozit, který se poté bude pravděpodobně ještě lakovat, zůstávají nám dvě možnosti. Jednou je samotný obvod připevněný na epoxidové vrstvě, druhou je samolepka. Vzhledem k dostupnosti je asi jednodušší volbou samolepka, ale její

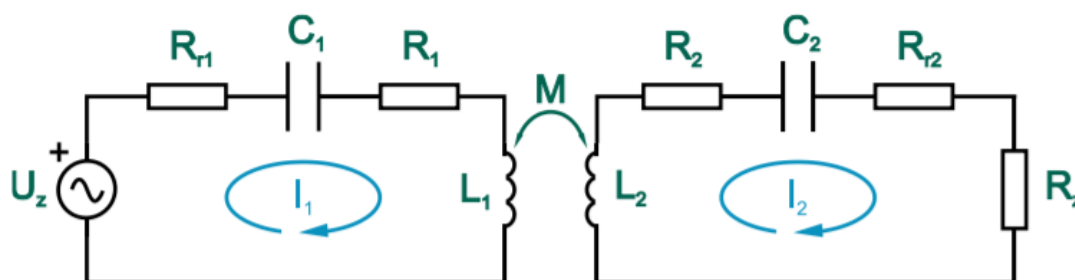
Možnosti monitorování kompozitních konstrukcí s využitím vodivosti uhlíkových vláken nevýhodou je, že k připravené samolepce by nešlo připojit senzory z uhlíkových vláken. Proto je vhodnější volba vlastního obvodu viz obr. 31.

6.5.2 Výběr čtečky

Pro výběr čtečky je nejprve nutné zvolit parametry shodné s tagem, tedy frekvenci a čip. Dále je otázkou, zda se rozhodnout již pro kompletní vyrobenou čtečku, která je i naprogramovaná, nebo vybrat aparaturu pro programovatelnou jednotku (např. Arduino) a mít možnost si určité parametry nastavit přesně podle požadavků, nebo se odklonit od čtečky jako přístroje a využít pouze odpovídající elektrický obvod s použitím laboratorních měřidel. Vzhledem k vysoké ceně čteček vychází jako přijatelnější možnost aparatura pro Arduino. Problémem by bylo naprogramovat celý systém. Řešením tohoto problému by mohl být volně dostupný program a návod k zapojení RFID čtečky na zdroji (Luboš, 2019). Zde je graficky popsáno přesné zapojení a dostupný je i celý zdrojový kód. Tento systém ale funguje pouze na principu shodných ID tagů a neumí už vyhodnotit, jaká byla změna v obvodu. Proto vychází jako vhodná volba vlastní obvod zapojený k laboratorním měřidlům.

Využit bude obvod, který popisuje obr. 31.

6.5.3 Převod vybraných součástí do schématické formy



obr. 31 Měřicí obvod - vlevo čtecí část, vpravo tag se senzorem (Zrubecký, 2017)

Pro návrh měřicího obvodu bude využito schéma, které představuje obr. 31. Hlavním parametrem, kterého je nutno dosáhnout, je co největší změna proudu I_1 v závislosti na změně elektrického odporu uhlíkového senzoru R_z při deformaci. Čím větší bude proudová změna, tím jednodušeji bude měřitelná.

Další požadavky vychází z vlivu vzájemné indukčnosti M cívek L_1 a L_2 . Pro zachování co nejstabilnějšího přenosu je nutné buď zajistit stálou vzájemnou polohu

Možnosti monitorování kompozitních konstrukcí s využitím vodivosti uhlíkových vláken cívek, nebo využít ladicí parametry obvodu tak, aby změna vzájemné indukčnosti M měla ve výsledku zanedbatelný vliv na změnu proudu I_1 . Pro zajištění co největší pravděpodobnosti úspěšného měření bude využito obou těchto metod. Nejprve se naladí vhodné parametry a výsledný obvod bude připevněn k deskám se stálou vzájemnou polohou, zajištěnou čtyřmi kolíky spojujícími desky.

6.5.4 Výpočtové vztahy pro proudy v obvodu

Z metody smyčkových proudů vyjdou dvě rovnice pro dvě proudové smyčky označené I_1 a I_2 v obr. 31 (Zrubecký, 2017):

$$I_1(R_1 + jX_1) + I_2j\omega M = U_z \quad (4)$$

$$I_2(R_2 + R_z + jX_2) + I_1j\omega M = 0 \quad (5)$$

Kde pro $X_{1;2}$ platí tento vztah (Zrubecký, 2017):

$$X_i = \omega L_i - \frac{1}{\omega C_i} \quad (6)$$

$$\text{pro } i = \{1; 2\}$$

Pro realizaci návrhových výpočtů se z těchto základních vztahů vyjádří rovnice pro proudy $I_{1;2}$ v závislosti na jediné proměnné U_z (Zrubecký, 2017).

$$I_1 = \frac{U_z[(R_2 + R_z) + jX_2]}{R_1R_2 + R_1R_z + R_1jX_2 + R_2jX_1 + R_zjX_1 - X_1X_2 + \omega^2M^2} \quad (7)$$

$$I_2 = \frac{U_zj\omega M}{R_1R_2 + R_1R_z + R_1jX_2 + R_2jX_1 + R_zjX_1 - X_1X_2 + \omega^2M^2} \quad (8)$$

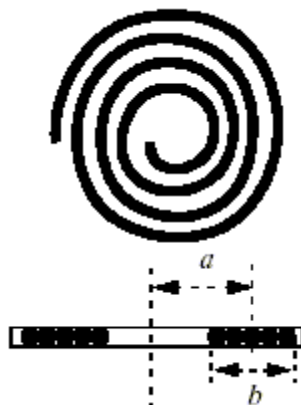
6.5.5 Výpočtové vztahy pro určení vlastních indukčností $L_{1;2}$

Pro udržení plochého tvaru senzoru budou využity spirálové kruhové cívky (ploché), pro něž platí následující výpočtový vztah (Stročka, rok neznámý):

$$L = \frac{(aN)^2}{8a + 11b} \quad (9)$$

Možnosti monitorování kompozitních konstrukcí s využitím vodivosti uhlíkových vláken

Kde N je počet závitů, rozměry cívky a , b jsou rozměry v [cm] viz obr. 33 a výsledná indukčnost L v [μH].



obr. 32 Schéma rozměrů kruhové spirálové cívky (Stročka, rok neznámý)

6.5.6 Výpočtové vztahy pro určení vzájemné indukčnosti M

Pro vyjádření přenosu mezi dvěma cívkami se kvůli velké obecnosti mezi tvary cívek a možnostmi vzájemné polohy využívají nejčastěji empirické vztahy. Hlavním vztahem je určení vzájemné indukčnosti M v závislosti na vlastních indukčnostech $L_{1;2}$ a empiricky určeném koeficientu k jednotkového rozměru, který se nazývá činitelem vazby (Nečásek, 1981).

$$M = k\sqrt{L_1L_2} \quad (10)$$

Hodnoty činitele vazby jsou změřeny podle typu vazby mezi cívkami. Podle zdroje (Nečásek, 1981) byla aparatura vybraná v kapitolách 6.5.1 až 6.5.3 zařazená do kategorií „volná vazba“ a „velmi volná vazba“. Z toho vychází hodnoty činitele vazby k v řádu jednotek setin (0,005-0,05).

V podobném měření, které bylo provedeno zdrojem (Horoschenkoff, a další, 2016), byl ale využit činitel vazby k o velikosti 0,4, což je několikanásobně více.

Z toho vychází nutnost ověřit si měřením, jakých hodnot bude dosahovat kombinace cívek v aparatuře a ideálně naladit celý systém tak, aby změna proudu vzniklá z výchylek ve vzájemné indukčnosti M neměla procentuálně velký vliv vůči změně proudu od elektrického odporu R_z .

Možnosti monitorování kompozitních konstrukcí s využitím vodivosti uhlíkových vláken

6.5.7 Návrh parametrů měřicího obvodu

Pro návrh parametrů měřicího obvodu byl využit tabulkový editor Microsoft Excel, do kterého byly vloženy všechny výpočtové vztahy vyjádřené rovnicemi (4) až (10) (volené hodnoty – modrá; dané hodnoty – žlutá; vypočítávané hodnoty – lososová; výsledné hodnoty – zelená). Volené hodnoty vycházely primárně z napodobení parametrů experimentu (Horoschenkoff, a další, 2016). Dané hodnoty, tedy elektrický odpor R_z vychází z měření porušení uhlíkových senzorů. Výsledné hodnoty pak musely splňovat jednoduchou podmínku, a to měřitelnost na dostupných laboratorních měřidlech. Hodnoty musely být spolehlivě rozeznatelné ve spojení s citlivostí měřidel.

Hodnoty v tabulce 1 byly navrhovány pro dosažení co nejpodobnějších hodnot indukčností L jako v experimentu ve zdroji (Horoschenkoff, a další, 2016) za využití rovnice (9).

vstupní parametry		
Cívka 1	indukčnost [μH]	8,82
	počet závitů N	8
	a (střední poloměr cívky) [cm]	1,68
	b (šířka vinutí) [cm]	0,64
	r (poloměr cívky) [cm]	2
	průměr drátu [cm]	0,08
	d vnitřní průměr [cm]	2,72
	Cívka 2	indukčnost [μH]
počet závitů N		16
a (střední poloměr cívky) [cm]		1,36
b (šířka vinutí) [cm]		1,28
r (poloměr cívky) [cm]		2
průměr drátu [cm]		0,08
d vnitřní průměr [cm]		1,44

Tabulka 1 Vstupní hodnoty cívek

Pro výpočet vzájemných indukčností M byla využita rovnice (10) a hodnoty součinitele vazby byly voleny dle zdrojů (Horoschenkoff, a další, 2016) a (Nečásek, 1981).

M_1 [H]	6,46757E-08
M_2 [H]	1,29351E-07
M_3 [H]	5,17405E-06

Tabulka 2 Hodnoty M pro $k = \{0,005; 0,01; 0,4\}$

Možnosti monitorování kompozitních konstrukcí s využitím vodivosti uhlíkových vláken

Výchozí hodnoty $C_{1;2}$ byly voleny dle experimentu ve zdroji (Horoschenkoff, a další, 2016) a postupnou iterací byly upravovány pro získání co nejvyšší změny proudu I_1 a pro co nejstálější změnu proudu I_1 při různých vzájemných indukčnostech M .

M minimální		M maximální	
Před poškozením senzoru		Po poškození senzoru	
ω [1/rad]	816814,0899	ω [1/rad]	816814,0899
C1 [F]	0,00000022	C1 [F]	0,00000022
R1 [Ω]	0,1	R1 [Ω]	0,1
R2 [Ω]	0	R2 [Ω]	0
Uz [V]	10	Uz [V]	10
Uc [V]	0,288998187	Uc [V]	0,271474245
L1 [H]	0,00000882	L1 [H]	0,00000882
L2 [H]	1,89703E-05	L2 [H]	1,89703E-05
Rz [Ω]	27	Rz [Ω]	29
C2 [F]	0,000000047	C2 [F]	0,000000047
M [H]	6,46757E-08	M [H]	6,46757E-08
X1 [Ω]	1,639442123	X1 [Ω]	1,639442123
X2 [Ω]	-10,5530995	X2 [Ω]	-10,5530995
I1 [A]	4,230934264	I1 [A]	4,432767696
I2 [A]	0,011094716	I2 [A]	0,010421967
$\Delta I1$ [A]	0,201833		

Tabulka 3 Výpočet změny proudu pro minimální vzájemnou indukčnost

M minimální		M maximální	
Před poškozením senzoru		Po poškození senzoru	
ω [1/rad]	816814,0899	ω [1/rad]	816814,0899
C1 [F]	0,00000022	C1 [F]	0,00000022
R1 [Ω]	0,1	R1 [Ω]	0,1
R2 [Ω]	0	R2 [Ω]	0
Uz [V]	10	Uz [V]	10
Uc [V]	19,16173854	Uc [V]	18,32247896
L1 [H]	0,00000882	L1 [H]	0,00000882
L2 [H]	1,89703E-05	L2 [H]	1,89703E-05
Rz [Ω]	27	Rz [Ω]	29
C2 [F]	0,000000047	C2 [F]	0,000000047
M [H]	5,17405E-06	M [H]	5,17405E-06
X1 [Ω]	1,639442123	X1 [Ω]	1,639442123
X2 [Ω]	-10,5530995	X2 [Ω]	-10,5530995
I1 [A]	2,888772523	I1 [A]	3,124093334
I2 [A]	0,735624167	I2 [A]	0,703404772
$\Delta I1$ [A]	0,235321		

Tabulka 4 Výpočet změny proudu pro maximální vzájemnou indukčnost

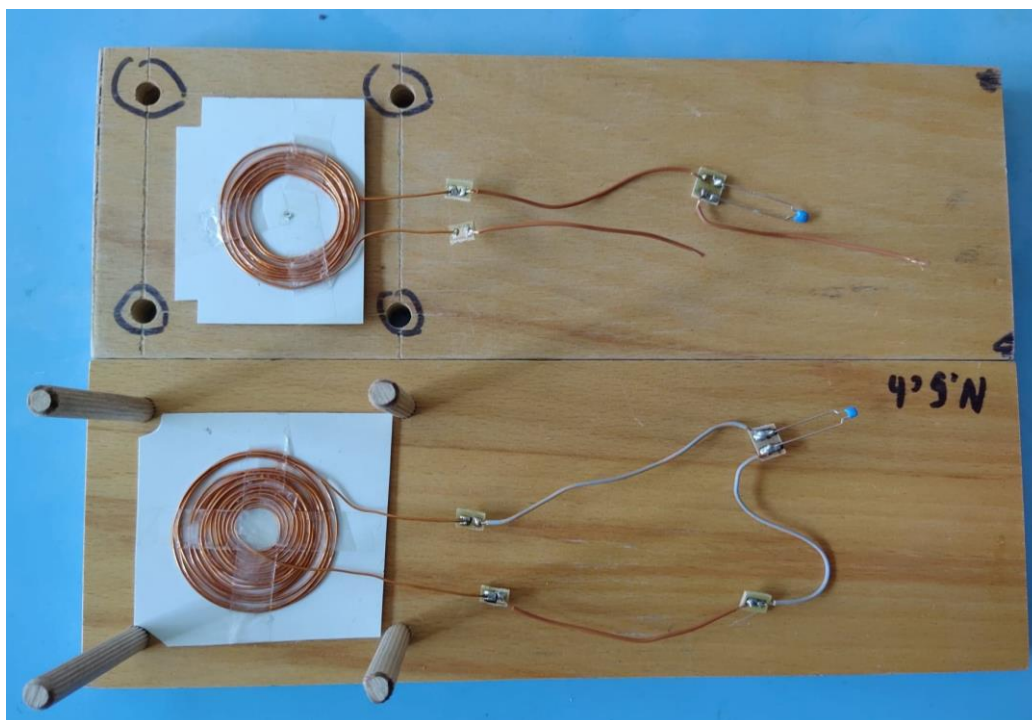
Možnosti monitorování kompozitních konstrukcí s využitím vodivosti uhlíkových vláken

Toto je návrh prvních hodnot pro měřicí obvod. Tyto hodnoty byly zvoleny hlavně s ohledem na menší vliv vzájemné indukčnosti M . Při využití jiných konfigurací totiž docházelo k výraznému nárůstu vlivu M na změnu proudu I_1 . A vzhledem k tomu, že hodnoty činitele vazby zmiňované v kapitole 6.5.6 jsou ve velmi širokém pásmu a nelze je zatím přesně určit, nelze dostatečně dobře předpovídat ani vzájemnou indukčnost, ani následné chování obvodu.

6.5.8 Zhodnocení RFID aparatury

Než bude samotná RFID aparatura použita pro měření, je nejprve nutné se kriticky podívat na to, jakým způsobem jsou dosažitelné navržené hodnoty a jaký vliv na výsledek měření by měla změna způsobená nedodržením těchto hodnot.

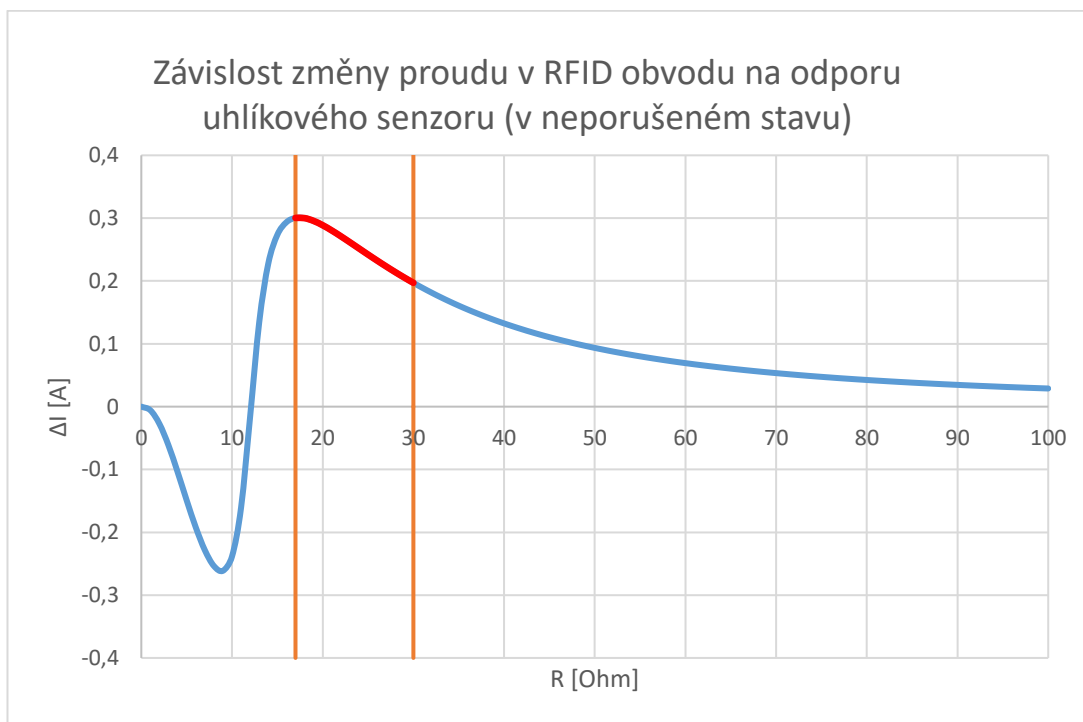
Z důvodů nízké časové náročnosti a možnosti vlastních úprav byl zvolen postup výroby aparatury spájením jednotlivých součástek do obvodu. Součástky byly nakupované (kondenzátory – modré součástky vpravo na obr. 33) a vlastnoručně vyráběné (vinuté cívky – na bílém podkladu vlevo na obr. 33). Výrobní tolerance nakupovaných kondenzátorů se pohybovala v rozmezí 10 až 20 %. Výrobní tolerance u vlastnoručně vyráběných vinutých cívek se vyšplhala až na 50 %. Kombinace dvou takto velkých tolerančních polí může zapříčinit úplnou nefunkčnost měřicího aparátu.



obr. 33 Vyrobené RFID zařízení

Možnosti monitorování kompozitních konstrukcí s využitím vodivosti uhlíkových vláken

Tato technologie je navržena vždy a pouze pro konkrétní senzor, což je jejím dalším úskalím. V případě, že senzor bude mít jiný elektrický odpor v neporušeném stavu, bude se změna proudu způsobená porušením výrazně lišit, jak naznačuje obr. 34. V tomto obrázku je oranžovými čarami vyznačeno pásmo elektrických odporů, pro které by byla RFID aparatura stále funkční (jedná se o pásmo mírně přesahující 10 Ohmů pro navrženou aparaturu).

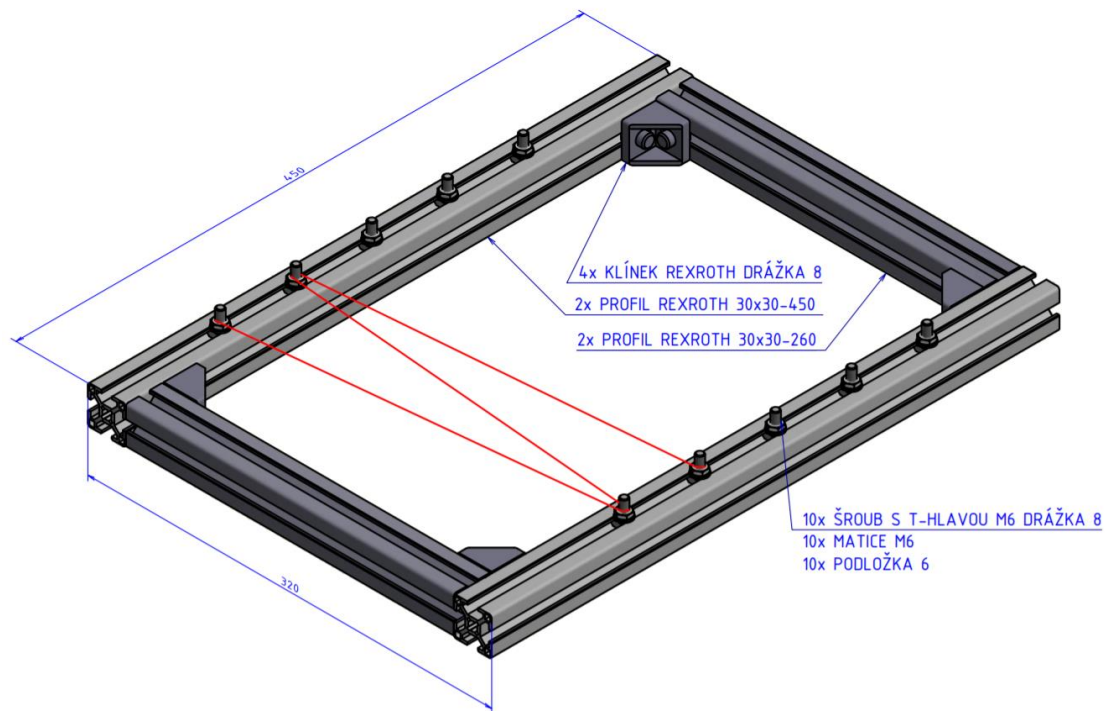


obr. 34 Graf závislosti změny proudu RFID obvodu na elektrickém odporu uhlíkového senzoru

Možnosti monitorování kompozitních konstrukcí s využitím vodivosti uhlíkových vláken

7 Výroba uhlíkových senzorů

Pro výrobu senzorů byla použita uhlíková vlákna T300 od výrobce Toray. Použitý svazek uhlíkových vláken obsahoval 1000 filamentů. Pro výrobu senzorů bylo nutné navrhnout a vyrobit rám. Vše znázorňuje obr. 35, kde červená čára představuje vinutí uhlíkového vlákna.



obr. 35 Model rámu na uhlíkové senzory

Možnosti monitorování kompozitních konstrukcí s využitím vodivosti uhlíkových vláken

8 Experiment

Tato kapitola nejprve shrne a zhodnotí vstupní data pro experiment. Na začátku se zaměří na výrobu zkušebních těles a její výsledky, poté na výrobu uhlíkových senzorů a její výsledky. Dále bude popsáno, jak a za využití jaké aparatury měření proběhlo.

Experimentální zkoušení těles proběhlo ve dvou fázích za využití šesti zkušebních těles. Na jedné polovině těles proběhla zkouška v tříbodovém ohybu (ukončená, když uhlíkové senzory přestaly reagovat na zvětšování deformace zvětšováním svého elektrického odporu), na zbylých tělesech proběhlo první měření při nízkých silách bez poškození těles (do 600 N). To umožnilo tělesa využít i k dalšímu měření a rozšířilo zkušební soubor bez nutnosti výroby dalších vzorků. Následovalo druhé porovnávací měření, kde bylo poškození zastoupeno nařiznutím.

8.1 Vstupní data pro experiment

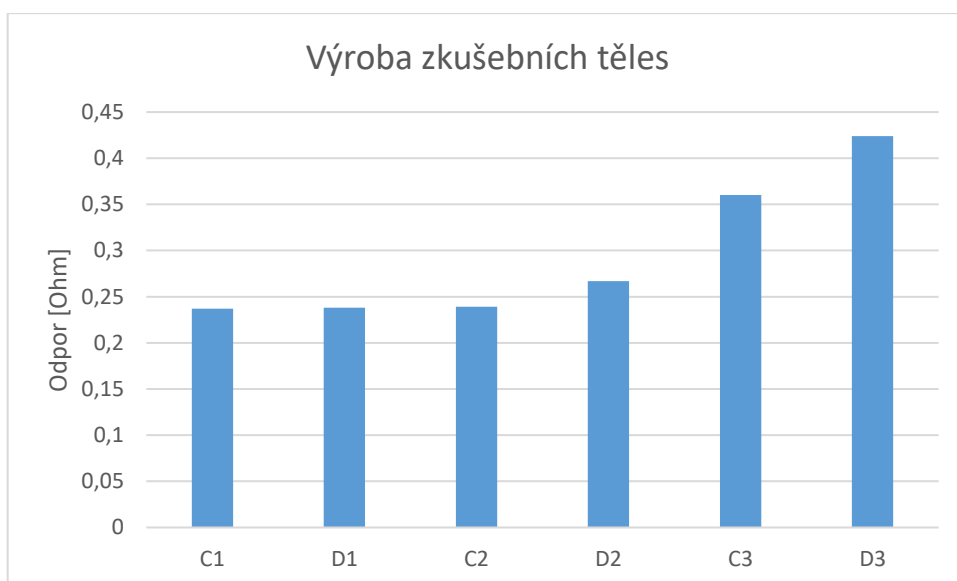
Pro zhodnocení měřicích schopností senzorů je nutné zajistit i to, že budou vyrobeny se stejným elektrickým odporem. V rámci práce byly vyráběny dva druhy senzorů (uhlíkové senzory a celá zkušební tělesa). V obou případech mohlo dojít k chybám ve výrobě, které by poté mohly mít vliv na výsledky měření. Tabulka všech těles se senzory dostupná v přílohách.

8.1.1 Vyrobená zkušební tělesa

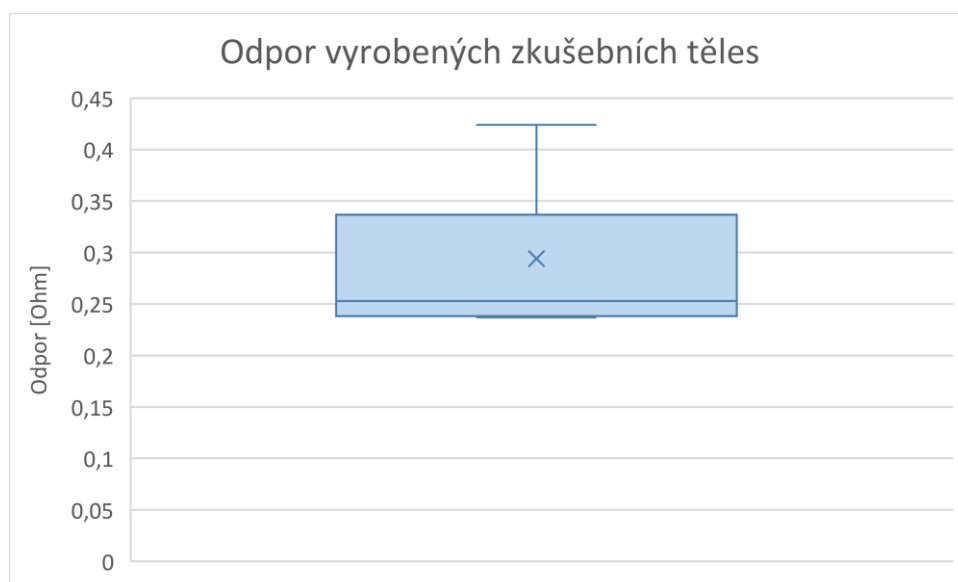
Očekávané výsledky elektrických odporů těles jsou dány geometrií těles (průřezová plocha S a délka l) a rezistivitou uhlíkových vláken podle (Schmidová, a další, 2018) jak ukazuje rovnice (11).

$$R = \rho * \frac{l}{S} = 0,017 * \frac{320}{\pi * \frac{29^2 - 26^2}{4}} = 0,042 \text{ Ohm} \quad (11)$$

Skutečná vyrobená tělesa pak měla elektrický odpor několikanásobně větší, jak je vidět v grafech viz 36 a obr. 37. Jednou z možností je, že rezistivita vláken je výrazně odlišná od vláken využitých v (Schmidová, a další, 2018). Druhou možností je, že prosycení vláken pryskyřicí netvoří dostatečně vodivé prostředí, aby byl využit celý průřez zkušebního tělesa.



obr. 36 Sloupcový graf - Naměřený elektrický odpor zkušebních těles po výrobě



obr. 37 Box plot - Naměřený elektrický odpor zkušebních těles po výrobě

obr. 37 slouží hlavně k vynesení odchylky vyrobených těles. Je zde vidět, že výroba nebyla perfektní, ale že většina vzorků (4 ze 6 těles) se pohybují s velmi malou odchylkou. Na grafu je také vidět, že hodnoty jsou zdola omezené minimálním možným elektrickým odporem, tedy v tomto případě 0,237 Ohm, tudíž ve spodní oblasti se nenachází žádná odlehlá pozorování. Pro zkoušku budou využita všechna vyrobená tělesa a poslouží ke zjištění, zda má výrobní rozptyl výrazný vliv na výsledek experimentu.

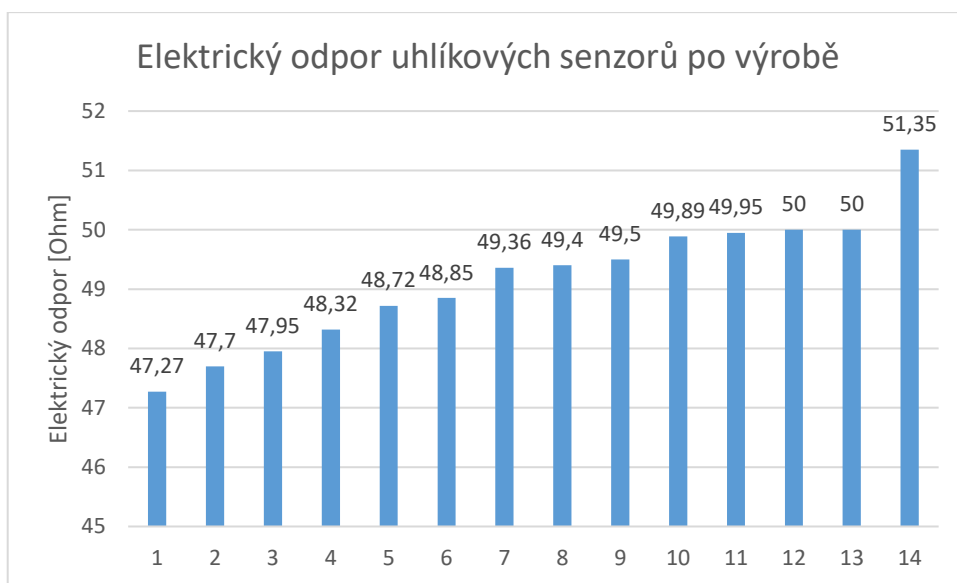
8.1.2 Vyrobené uhlíkové senzory

Očekávané výsledky elektrických odporů senzorů jsou dány geometrií vláken, z informací od výrobce o počtu vláken ve svazku (vlákna T300 od firmy Toray, svazky 1000 filamentů) a rezistivitou vláken dle (Schmidová, a další, 2018). Průměr jednoho

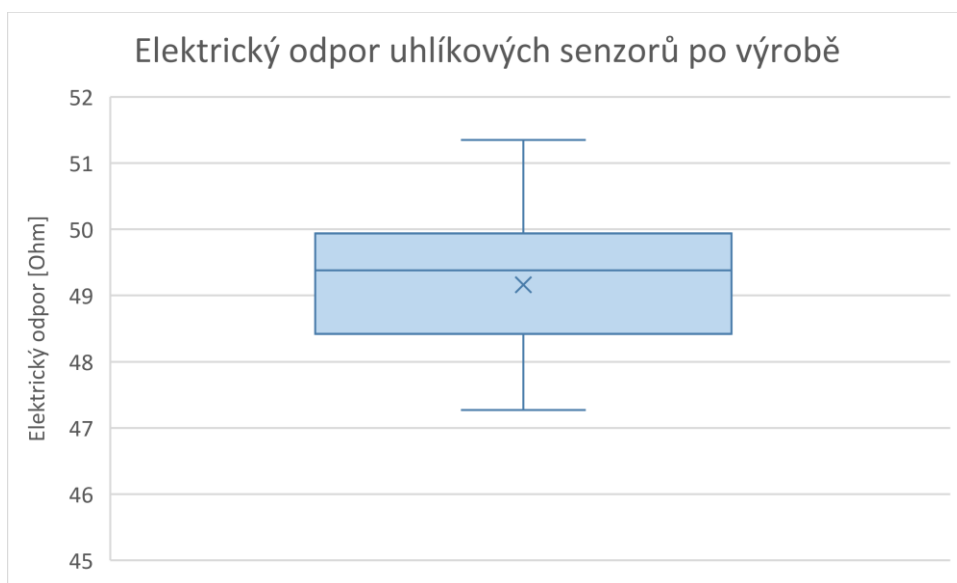
Možnosti monitorování kompozitních konstrukcí s využitím vodivosti uhlíkových vláken filamentu byl pro výpočet využit 7,5 μm . Výpočet elektrického odporu senzoru ukazuje rovnice (12).

$$R = \rho * \frac{l}{S} = 0,017 * \frac{120}{1000 * \pi * \frac{0,0075^2}{4}} = 46,18 \text{ Ohm} \quad (12)$$

Skutečně vyrobené senzory se pohybovaly v rozmezí 47 až 52 Ohm, jak je vidět v grafech viz obr. 38 a obr. 39. Všechny vyrobené senzory měly větší elektrický odpor, než jak předpokládá výpočet. Jedním z důvodů by mohlo být narušování vláken již při samotném napínání a prosycování pryskyřicí. Další zvýšení elektrického odporu může vzniknout při technologických operacích nutných pro připevnění drátků k sensorům.



obr. 38 Sloupcový graf – Elektrický odpor vyrobených uhlíkových senzorů po výrobě



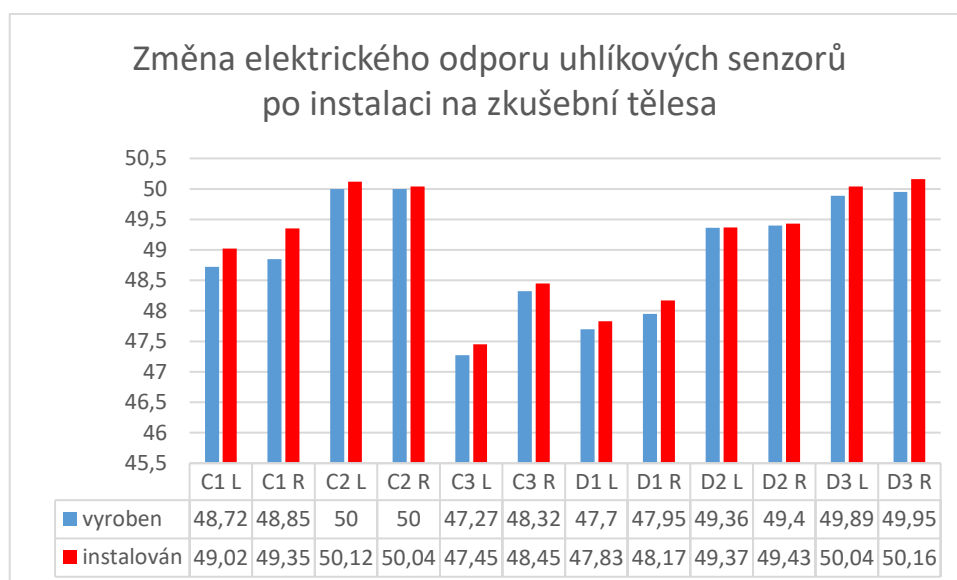
obr. 39 Box plot – Elektrický odpor vyrobených uhlíkových senzorů po výrobě

Možnosti monitorování kompozitních konstrukcí s využitím vodivosti uhlíkových vláken

I v tomto případě jsou hodnoty elektrického odporu zdola omezeny minimálním možným elektrickým odporem daným geometrií a fyzikálními vlastnostmi vláken, což by pravděpodobně byl elektrický odpor blízký se ideální hodnotě z rovnice (12). Z grafu viz obr. 39 lze zjistit, že 50 % vzorků bylo vyrobeno s relativní odchylkou od mediánu menší než 2,5 %. Největší odchylku od mediánu měl pak senzor číslo 1 (4,2 %) a za ním senzor 14 (3,9 %).

Pro měření byly senzory vybírány po dvojicích tak, aby na jednom tělese byly (pokud možno) dva senzory s co nejpodobnější hodnotou elektrického odporu.

Elektrický odpor senzorů byl kontrolován ještě po samotné instalaci na zkušební tělesa. Změnu odporu po instalaci popisuje graf viz obr. 40.



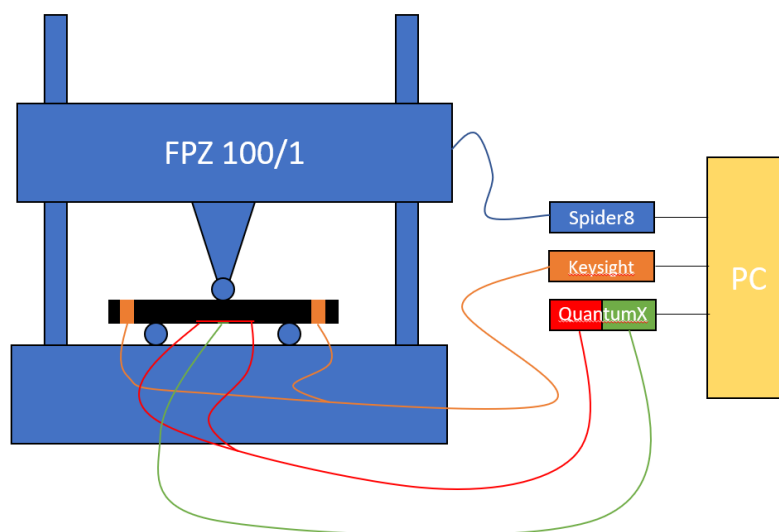
obr. 40 Sloupcový graf změny elektrického odporu senzorů po instalaci

Z grafu je možno vyčíst, že u všech senzorů došlo po instalaci k mírnému zvýšení elektrického odporu, ale pouze v řádech kolem 1 %. Tento nárůst mohl být způsoben vnesením malých deformací při lepení senzorů. Proto byla instalace vyhodnocena jako úspěšná bez podezření na poškození nebo zničení jakéhokoliv ze senzorů.

8.2 Zkušební zařízení využítá pro experiment

Zkouška v ohybu probíhala na zatěžovacím stroji Heckert FPZ 100/1 dle normy (ASTM D790, 2003). Zatěžovací stroj byl řízen konstantním posuvem. Data ze zatěžovacího stroje byla zaznamenávána pomocí ústředny HBM Spider 8. Elektrický

Možnosti monitorování kompozitních konstrukcí s využitím vodivosti uhlíkových vláken odpor zkušební tělesa byl měřen pomocí multimetru Keysight 34461A. Elektrický odpor uhlíkového senzoru byl měřen společně s daty z tenzometru (HBM 6/350 LY11) ústřednou HBM QuantumX MX1615B. Vše schematicky vyznačeno viz obr. 41.



obr. 41 Schéma experimentu

8.3 Výstupní data z experimentu

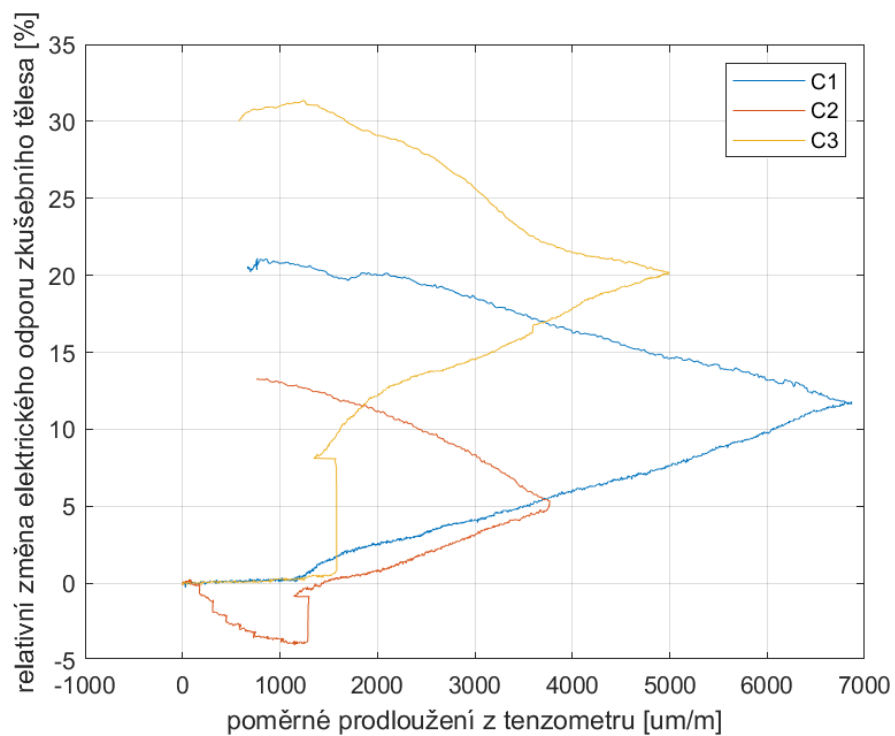
Výstupní data byla zkoumána z pohledu závislosti změn elektrických odporů senzorů, a to v závislosti na deformaci a poškození. Hlavní důraz bude na sledování skokových změn v grafu. Takovéto změny by měly značit vznik trhlin. Plynulé změny pak zastupují nárůst deformace.

Všechna naměřená data jsou demonstrována v grafech vzniklých na základě záznamů ze zkoušek. Někdy je využit graf zkoušky pouze jednoho tělesa. Grafy ze zkoušek všech těles jsou dostupné k nahlédnutí v přílohách.

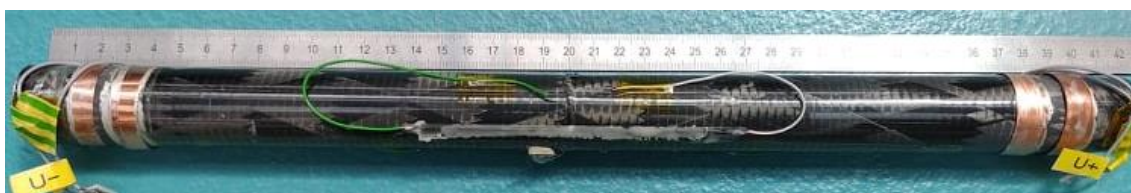
8.3.1 Výsledky měření elektrického odporu zkušebních těles při strojním zatěžování

Výsledky měření elektrického odporu zkušebních těles při destrukčních zkouškách jsou vyneseny do grafů viz obr. 42. Z důvodu rozdílných počátečních odporů těles je odpor převeden na relativní změnu elektrického odporu v %. Tato relativní změna byla vynesena do závislosti s poměrnou deformací z tenzometru. Na obr. 43 a obr. 44 je potom foto porušeného vzorku po této zkoušce.

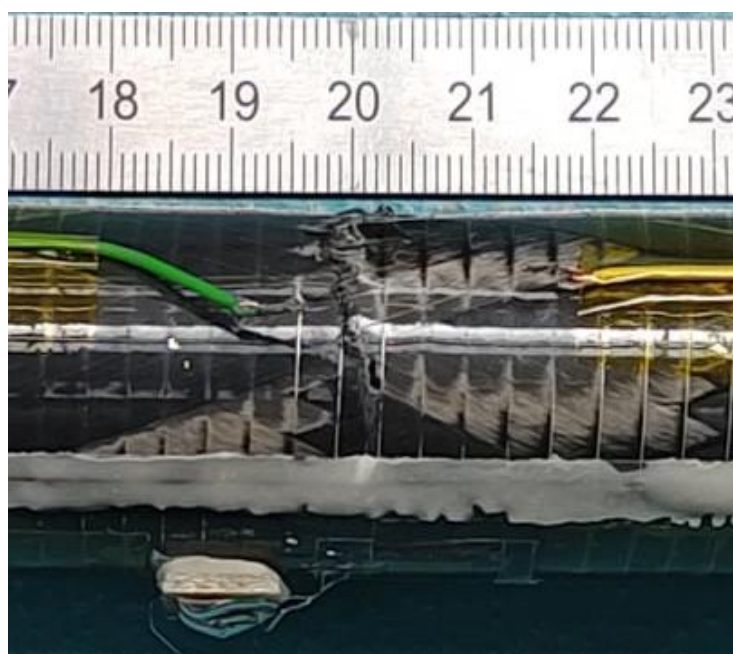
Možnosti monitorování kompozitních konstrukcí s využitím vodivosti uhlíkových vláken



obr. 42 Záznam celé zkoušky na tělesech C1, C2 a C3



obr. 43 Porušené zkušební těleso



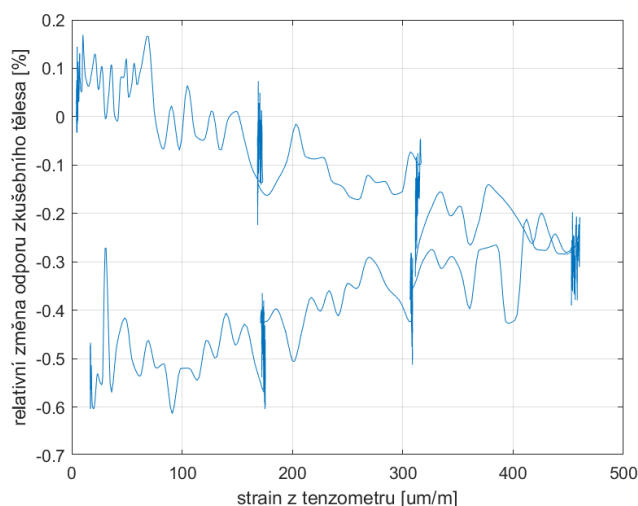
obr. 44 Detail porušeného zkušebního tělesa

Možnosti monitorování kompozitních konstrukcí s využitím vodivosti uhlíkových vláken

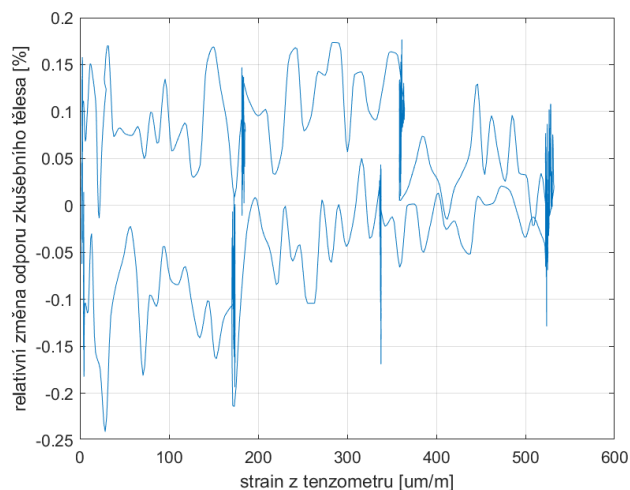
Z těchto záznamů je vidět, že přestože změny elektrického odporu následují alespoň podobný trend, nejsou stejné. Hlavní podobnost všech zkoušek spočívá v tom, že odpor těles se výrazně zvětšoval i při odlehčovací fázi. Toto bylo nejspíš zapříčiněno volbou zkoušky a jejím průběhem. Volba zkoušky v ohybu a fakt, že u všech těles docházelo k porušení ztrátou stability (zborcení) na horním vlákně, tvořily podmínky takové, že vlákna trubky, přestože už na zničeném vzorku, byla stále v kontaktu a tudíž vodivá. Až po odlehčení docházelo k rozevření trhliny na zničeném vzorku a tedy dalšímu nárůstu elektrického odporu.

I přes převedení elektrických odporů na relativní hodnoty je velmi výrazný rozptyl hodnot mezi jednotlivými tělesy. Proto je tato metoda velmi komplikovaně použitelná pro měření deformace. Záznamy zkoušky u těles C2 a C3 mají obě viditelný skok v elektrickém odporu při přetvoření okolo 1300 $\mu\text{m}/\text{m}$. Tato hodnota odpovídá hodnotě 1,7 kN na záznamu ze siloměru na FPZ 100/1. Jedná se o čas, kdy došlo již k rychlému šíření trhliny (první poškození se dle tenzometrů a siloměru objevovalo již při cca 750 N).

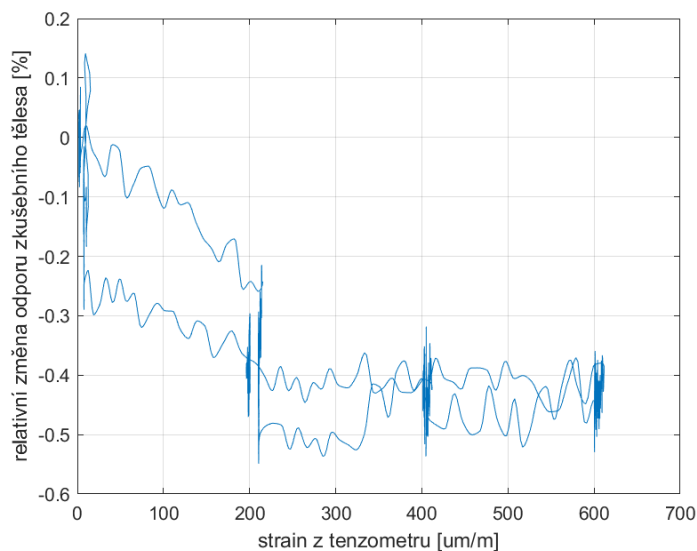
Záznamy z nedestrukční zkoušky se schodovým zatěžováním jsou v grafech viz obr. 45, obr. 46 a obr. 47. Na grafech není viditelný žádný trend nárůstu či poklesu elektrického odporu v závislosti na zatížení či odlehčení (nebyl vidět ani v absolutních změnách v čase). Jediné, co lze z grafu vyčíst, jsou vertikální šumy ze senzorů v bodech, kdy měl odpor být konstantní, protože nedocházelo ke změně v deformaci.



obr. 45 Záznam relativní změny elektrického odporu zkušebního tělesa D1 na poměrném přetvoření při schodovém zatížení



obr. 46 Záznam relativní změny elektrického odporu zkušebního tělesa D2 na poměrném přetvoření při schodovém zatížení



obr. 47 Záznam relativní změny elektrického odporu zkušebního tělesa D3 na poměrném přetvoření při schodovém zatížení

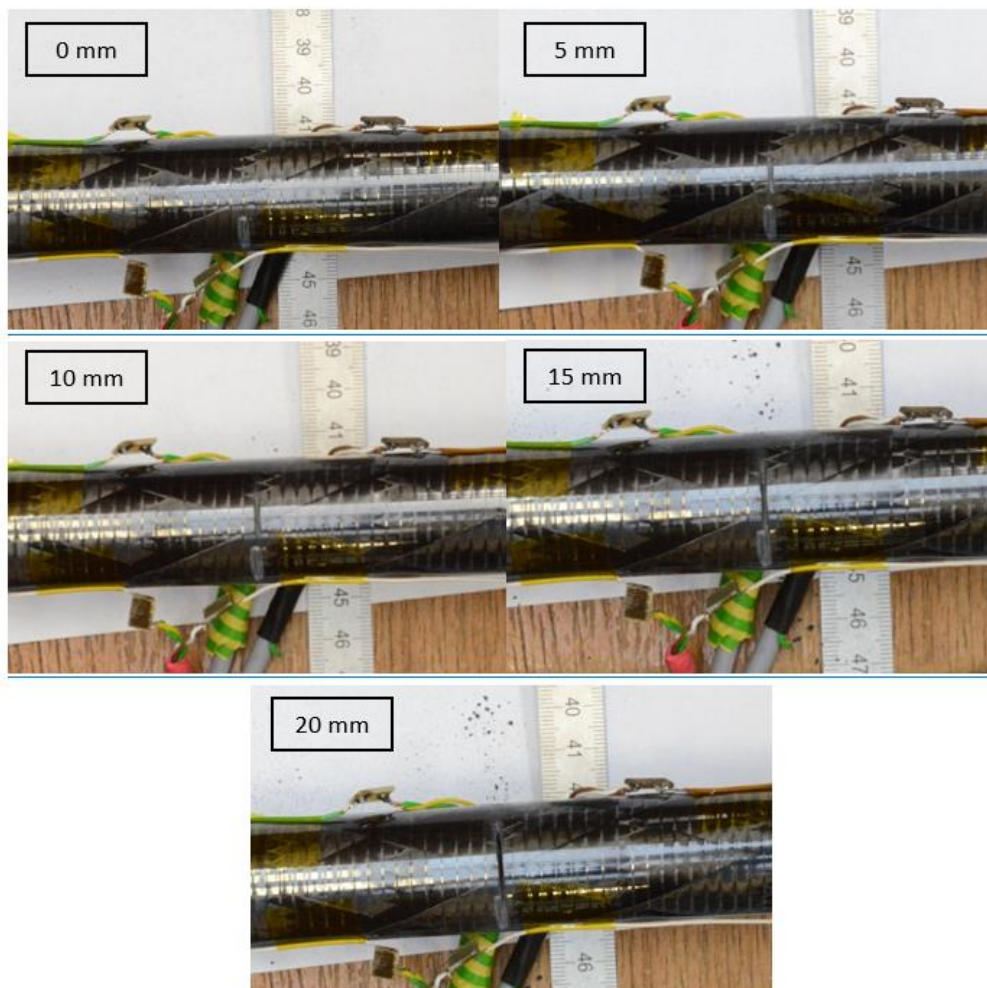
Při vynesení závislosti relativní změny elektrického odporu na síle, zůstává tvar křivek velmi podobný jako při vynesení závislosti na deformaci (graf k nahlédnutí v příloze).

8.3.2 Výsledky porovnávacího měření zkušebních těles naříznutím

U tří těles bylo provedeno měření při postupném nařezávání, které mělo za cíl simulovat trhlinu v materiálu. Pro naříznutí byla charakteristickým rozměrem délka a vždy bylo měřeno 5 stavů tělesa (naříznutí 0 mm, 5 mm, 10 mm, 15 mm a 20 mm) viz obr. 48. Maximální délka naříznutí 20 mm byla volena tak, aby došlo k vniknutí do dutiny trubky.

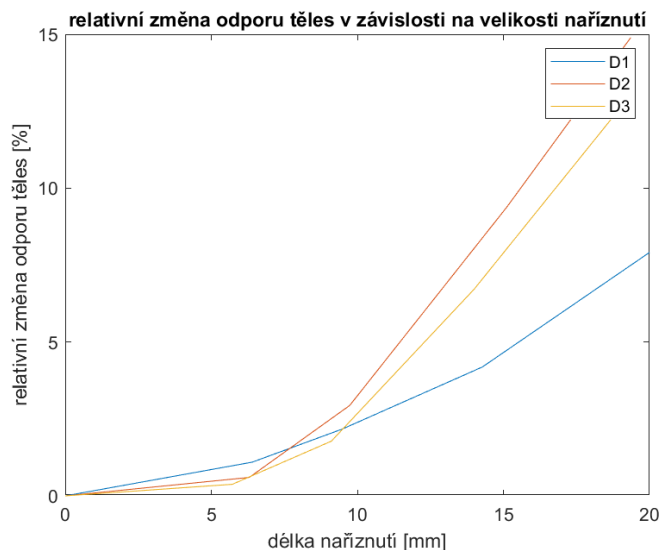
Možnosti monitorování kompozitních konstrukcí s využitím vodivosti uhlíkových vláken

Pro vyhodnocení elektrického odporu tělesa po naříznutí byl vytvořen 10s záznam z multimetru, ze kterého byl vypočítán průměrný elektrický odpor při každé délce naříznutí.

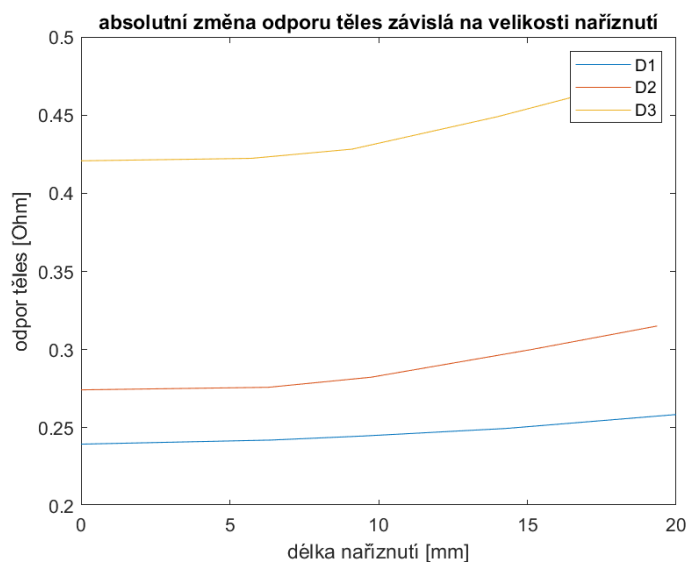


obr. 48 Postupné nařezávání zkušebního tělesa

Z výsledků zaznamenaných v grafech viz obr. 49 a obr. 50 je jasné, že při naříznutí vždy docházelo k nárůstu elektrického odporu. Bohužel procentuální nárůst u různých těles není výrazně podobný. U těles D2 a D3 došlo k nárůstu elektrického odporu v rozmezí 10 až 15 % při konečném naříznutí. U tělesa D1 tomu bylo pod 10 %.



obr. 49 Graf závislosti relativní změny elektrického odporu těles na délce nařiznutí



obr. 50 Graf závislosti absolutní změny elektrického odporu těles na délce nařiznutí

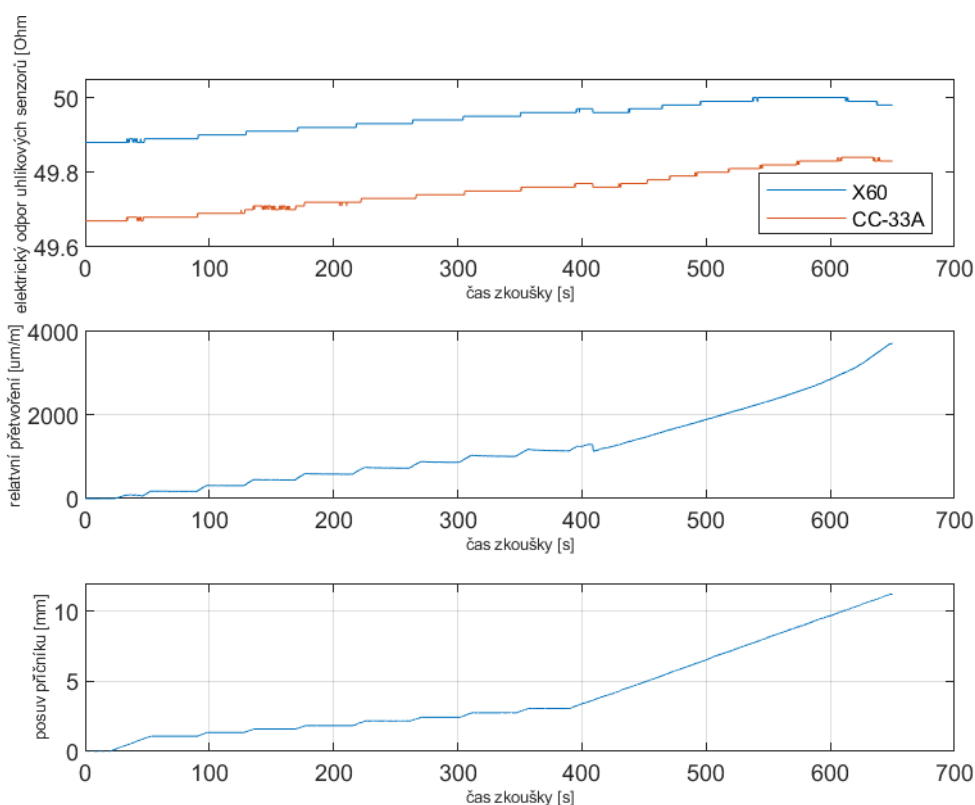
8.3.3 Výsledky měření elektrického odporu uhlíkových senzorů

Uhlíkové senzory byly hodnoceny ze dvou hlavních pohledů. Do jakého zatížení (deformace) dokážou měřit, tedy jestli vydrží měřit do zničení součásti. S tím souvisí i vyhodnocení chování lepidel, zda senzory připevněné jedním lepidlem nebudou měřit jinak než ty přilepené druhým. Druhý aspekt byl návrat ke své původní hodnotě elektrického odporu při postupném zatěžování a odlehčování za nízkých zatížení.

Pro demonstraci výsledků měření slouží graf viz obr. 51, na kterém je záznam z destrukční zkoušky (ukončení záznamu při zátěžné síle rovné 0 N).

Možnosti monitorování kompozitních konstrukcí s využitím vodivosti uhlíkových vláken

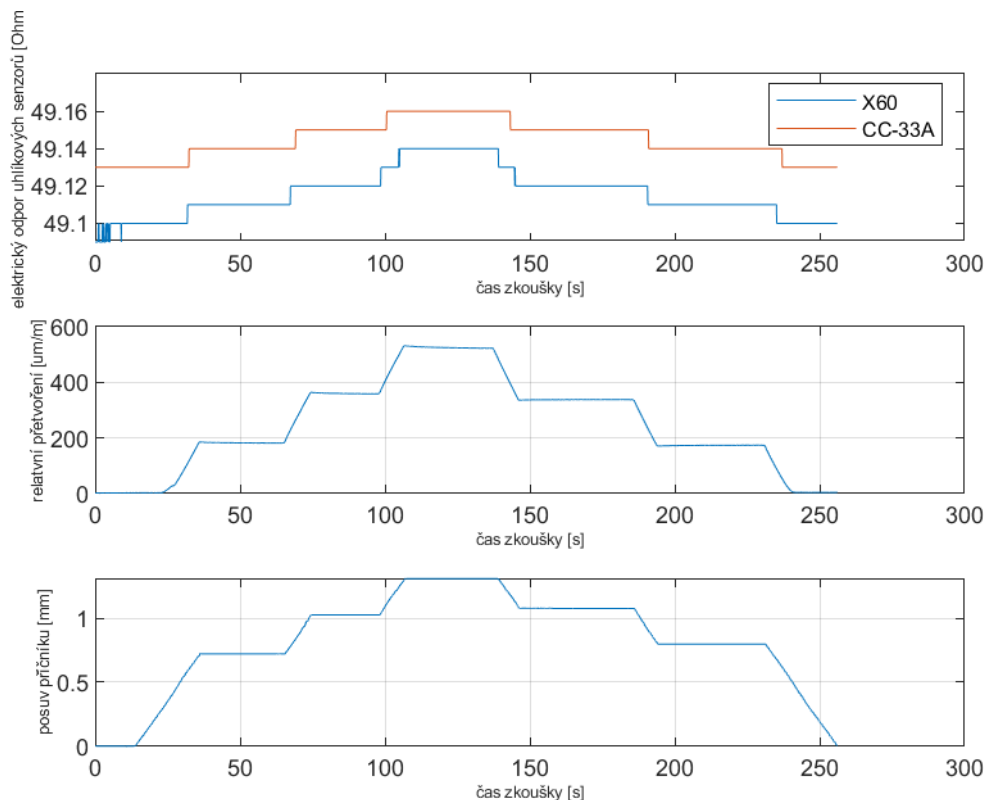
Pro posouzení funkčnosti senzorů byl sledován nárůst odporu za nárůstu posuvu. Pokud posuv rostl a odpor již ne, bylo předpokládáno, že senzor už neměří správně. Z grafu je vidět, že senzory měří společně s tenzometrem až do poměrného přetvoření okolo 3000 $\mu\text{m}/\text{m}$. V tento moment u všech těles došlo k dosažení maxima elektrického odporu a následně bylo těleso odlehčeno. Vzhledem k tomu, že u všech třech měření přestal nejprve měřit senzor přilepený lepidlem X60, je velmi pravděpodobné, že tímto přetvořením bylo dosaženo limitů lepidla, nikoliv však senzoru. Senzor připevněný lepidlem CC-33A vydržel měřit závisle s tenzometrem při jedné ze zkoušek do hodnoty až 40000 $\mu\text{m}/\text{m}$. Tato zjištění nejsou ale překvapivá, pokud je bráno v potaz, že X60 je lepidlo určené pro zdrsňený povrch, zatímco CC-33A je určeno pro hladký povrch. Tyče měly povrch hladký a nebyl zdrsňován, aby nedošlo k narušení vláken.



obr. 51 Časový záznam posuvu, relativního přetvoření a elektrického odporu uhlíkových senzorů tělesa C2

Pro kontrolu opakovatelnosti měření byl vybrán způsob zatěžování po 200N schodech do zatížení 600 N, aby nedošlo k poškození zkušebního tělesa (tedy se předpokládal návrat do původního stavu bez deformace). Na grafu viz obr. 52 je vidět, že záznam ze senzorů kopíruje tvar schodového zatěžování jak při zatěžovací, tak při odlehčovací fázi. Pro demonstraci bylo využito těleso D2, které mělo nejhladší průběh

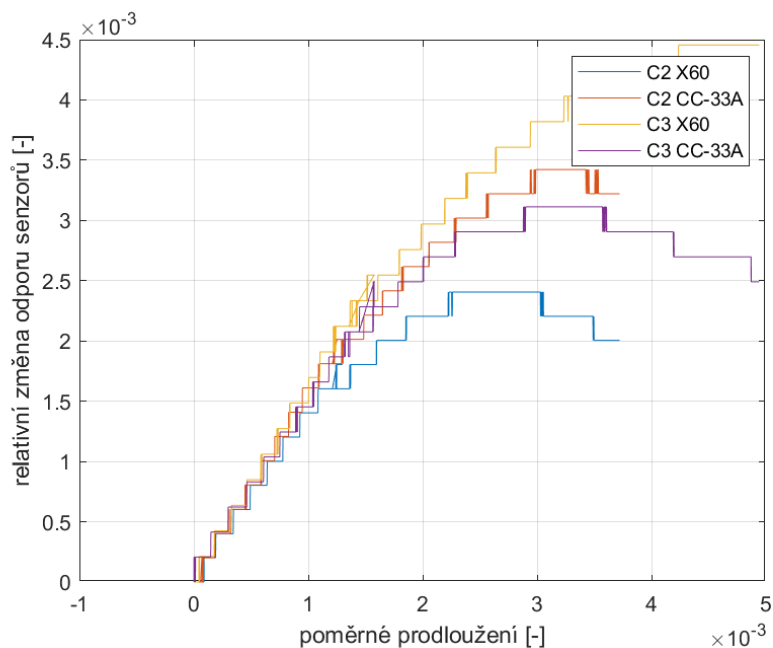
Možnosti monitorování kompozitních konstrukcí s využitím vodivosti uhlíkových vláken zkoušky (u tělesa D1 došlo velmi pravděpodobně k narušení jednoho ze senzorů a u tělesa D3 nedošlo k úplnému navrácení elektrických odporů senzorů po odlehčení).



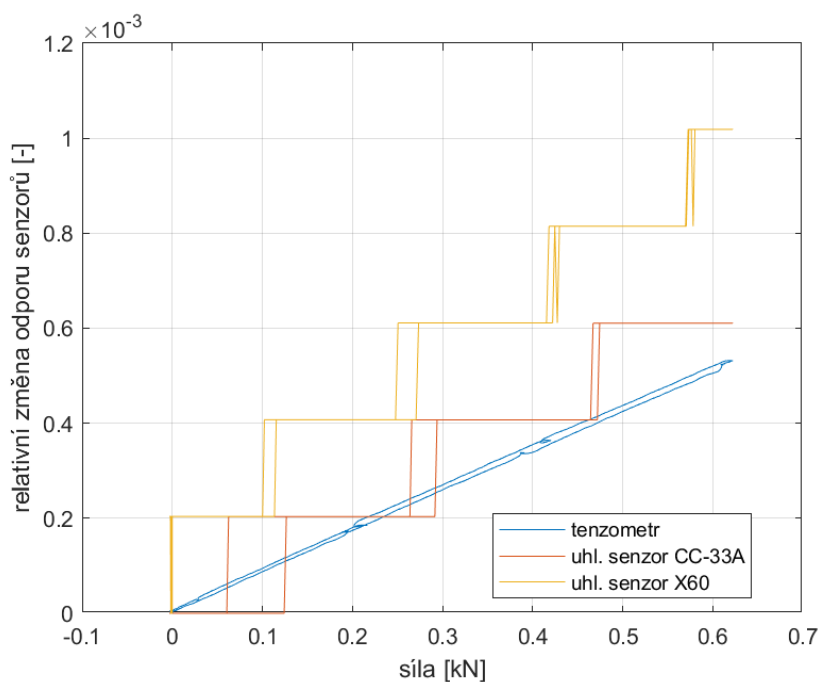
obr. 52 Záznam schodového zatěžování tělesa D2

Z grafu na obr. 53 je vidět, že do poměrného prodloužení 1000 µm/m měřily senzory i mezi dvěma různými vzorky se stejnou směrnici (tedy stejnou citlivostí). Vliv na to neměl ani původní odpor senzorů ani lepidlo, kterým byly připevněny.

Na grafu v obr. 54 je poté porovnán průběh relativní změny odporu a relativního prodloužení z tenzometru v závislosti na síle. Je vidět, že oba průběhy jsou (po proložení dat křivkou) lineární, pouze s odlišnou směrnici.



obr. 53 Porovnání senzorů mezi vzorky C2 a C3



obr. 54 Záznam z uhlíkových senzorů a tenzometru při zatížení a odlehčení vzorku

8.3.4 Porovnání výsledků s literaturou

Výsledky měření z uhlíkových senzorů se velmi dobře shodují s (Horoschenkoff, a další, 2012) a popisem lineárního chování senzorů v závislosti na deformaci, tedy s pozorováním faktu, že uhlíkový senzor může plně zastávat funkci tenzometru.

Vytvoření trhliny ve zkušebním tělese ale neuvolnilo dostatek energie na to, aby prasknutí tělesa simulovalo náraz a došlo ke skokové a nevratné změně v elektrickém

Možnosti monitorování kompozitních konstrukcí s využitím vodivosti uhlíkových vláken odporu uhlíkového senzoru, která byla pozorována při impaktivých zkouškách v (Schmidová, a další, 2018).

Výsledky z měření na celých součástech jsou porovnány čistě s jednou studií (Kwon, a další, 2016) vzhledem k výrazné shodě v geometrii a technologii výroby zkušebních těles (trubky navíjené z vláken) a také vzhledem k volbě zkoušky (tělesa byla zatěžována v ohybu). Tato studie se vyjadřovala k různým tvarům prasklin a vlivem tohoto tvaru na změnu elektrického odporu tělesa. V této studii bylo vyzorováno, že při vzniku fatální trhliny dojde ke skokové změně v odporu až o 30 %. V měření provedeném v této práci byla tato změna naměřena v maximu pouze 10 %.

Pro porovnání schopností měření deformace za použití celých těles jako senzorů nebyly v dostupných zdrojích nalezeny dostatečné informace. Většina autorů si pro výpočet deformace vybrala uhlíkové senzory, spíše než celé součásti.

9 Diskuse

V rámci provedeného experimentu vyvstalo několik závěrů a několik otázek pro možná použití senzorů a pro další možné experimenty s těmito metodami spojené.

První jsou poznatky plynoucí z využitelnosti senzorů. Na těchto tělesech se ukázalo, že použití uhlíkového senzoru je vhodnou metodou pro měření deformace, ale bohužel při vzniku trhlin v materiálu k žádné výraznější odpovědi ze senzoru nedošlo, protože senzory byly instalovány na opačné straně, než na které trhlina vznikala, tedy senzory byly od trhliny příliš vzdálené. Jiným chováním se vyznačovaly senzory v podobě celých zkušebních těles. Pro měření deformace se tělesa ukázala jako nevhodná vzhledem různorodým reakcím na deformaci. Jak bylo řečeno, elektrický odpor těles například dosahoval maxima až při odlehčení, nikoliv při maximálním zatížení. Samotná tělesa se ukázala být lepší volbou pro detekci vzniku trhlin, ale bohužel, reakce v podobě skokové změny přicházela až při takřka fatálním poškození materiálu, nikoliv při vzniku prvních malých trhlin.

Z pozorovaného chování elektrických odporů zkušebních těles vzešla myšlenka sledování elektrického odporu samotných zkušebních těles při cyklickém zatěžování, které by zajistilo opakované stlačení a roztahování trhliny. V rámci takového měření by pravděpodobně měly být změny v elektrickém odporu zkušebního tělesa více čitelné (alespoň v růstu amplitudy změny elektrického odporu v závislosti na růstu trhliny).

Další otázky a odpovědi se týkají možností využití RFID přenosu. Tak, jak byl přenos navržen, v kombinaci s uhlíkovým senzorem je nutné zajistit dostatečně přesnou výrobu například v podobě zakázkového tištěného spoje. Pro rozšíření pásma elektrických odporů senzorů, se kterými je obvod schopný spolehlivě fungovat, by teoreticky bylo možné navrhnout obvod pro spíše vyšší elektrické odpory a k senzorům pak do série zapojovat elektrické odpory přídavné pro vyrovnání na návrhovou hodnotu.

Další zásadní otázka se týká vhodnosti kombinace RFID a uhlíkových senzorů pro kontrolu mechanismů po nehodách. Z měření vycházelo, že senzory (i při destruktivních zkouškách) se vracely velmi blízko svému původnímu elektrickému odporu, rozdíl byl pouze v desetinách Ohmů. Takováto změna ale není dostatečná pro vychýlení RFID obvodu ro rezonance, aby detekoval poškození. Proto je nutné nejprve spolehlivě zajistit, že při nehodě dojde k dostatečnému porušení senzoru (většinou pozorováno u impaktivních zkoušek) a jeho elektrický odpor naroste a na této vyšší hodnotě zůstane.

10 Závěr

Tato práce se zabývá problematikou využití elektrických vlastností uhlíkových vláken k detekci poškození kompozitních konstrukcí. Nejprve bylo popsáno, co to jsou kompozitní materiály, jak je nutné je chápat a jaký matematicko-fyzikální aparát se využívá k popisu jejich chování. Byla provedena rešerše možných přístupů k využití jejich elektrických vlastností. Elektrický odpor se ukázal být vlastností, která se u uhlíkových vláken mění v závislosti na deformaci, tedy uhlíková vlákna jsou piezorezistivní. Z rešerše vyšly i různé přístupy k využití piezorezistivity uhlíkových vláken pro volbu různých typů senzorů. Jedním významným typem senzoru byl tzv. uhlíkový senzor (svazek vláken vyztužený pryskyřicí). Druhý typ senzoru byla samotná zkoušená součást vybavená kontakty pro měření vlastního elektrického odporu (self-sensing).

Na základě těchto zjištění byla navržena zkušební tělesa vybavena kontakty pro měření svého vlastního elektrického odporu. Navíc na nich byla nainstalována dvojice uhlíkových senzorů a jeden tenzometr. Pro tato tělesa byla navržena zkouška v ohybu, kde data z uhlíkových senzorů a samotných zkušebních těles stála proti datům z tenzometru. Zkouška probíhala trojího typu – zkouška destrukční do zničení tělesa, zkouška nedestrukční se schodovým zatěžováním i odlehčováním, zkouška porovnávací nařezáváním těles bez zatížení.

Z těchto zkoušek vyšlo, že uhlíkové senzory spolehlivě měří deformaci vzorku, a to s lineární charakteristikou (do mezní deformace). Na druhou stranu při vzniku trhlin ve zkušebním tělese k porušení senzorů nedocházelo a dále měřily pouze deformaci. Senzory v podobě celých zkušebních těles pak na deformaci reagovaly různorodě. Jediné, v čem se v tomto došlo ke shodě byl fakt, že maximálního elektrického odporu dosáhly až po odlehčení, nikoliv při maximální deformaci. Pro detekci poškození byly senzory v podobě celých součástí lepší volbou než uhlíkové senzory, ale pořád ne volbou ideální. U těles docházelo ke skokovému navýšení elektrického odporu v závislosti na přetvoření, když vznikaly trhliny, ale až skutečně fatální trhliny neslučitelné s nosností těles. Při vzniku počátečních trhlin nebyla odpověď ze zkušebních těles dostatečně výrazná. Všechna tato pozorování byla porovnána s podobnými experimenty publikovanými v literatuře. V případech, kde byla nalezena podobná měření, se výsledky experimentů v principu shodovaly.

Možnosti monitorování kompozitních konstrukcí s využitím vodivosti uhlíkových vláken

Cíle práce byly naplněny, na základě všech výše uvedených poznatků je experiment hodnocen pozitivně. Ukázal, že měření pomocí uhlíkových senzorů je možné i bez umístění senzorů přímo do skladby kompozitu, což byl standard všech zaznamenaných předchozích experimentů. Z oblasti využití celých součástí jako senzorů by se výsledky mohly zdát horší, ale vychází z nich poznatky pro budoucí experimenty využívající jiné zatížení při zkoušce, nejpravděpodobněji únavovou zkoušku se střídavým či mříjivým cyklem.

11 Bibliografie

ASTM D790. 2003. *Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials.* 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States : ASTM International, 2003.

Carter, H. 2018. Kompozity na EuroBlech 2018. *Compotech.com.* [Online] 18. 10 2018. [Citace: 20. 10 2019.] <https://compotech.com/cs/kompozity-na-euroblech-18/>.

Cídlová, H., Mokrý, M. a Valová, B. 2018. *Obecná chemie.* Brno : Masarykova univerzita, 2018.

Conrad.cz. rok neznámý. *RFID čtečka HellermannTyton 556-00700 556-00700.* [Online] rok neznámý. [Citace: 10. 10 2019.] <https://www.conrad.cz/rfid-ctecka-hellermanntyton-556-00700-556-00700.k1530047>.

Greenhlagh, E.S. 2009. *Failure Analysis and Fractography of Polymer Composites.* Cambridge : Woodhead Publishing, 2009. ISBN 978-1845692179.

Horoschenkoff, A. a Christner, Ch. 2012. *Carbon fibre sensor: theory and application.* místo neznámé : Intechopen, Intechopen, 2012. 10.5772/50504.

Horoschenkoff, A., a další. 2016. *Wireless damage monitoring system based on RFID.* Munich University of Applied Sciences, Dachauer Straße 98b, DE-80335 München, Germany. ECCM17 - 17th European Conference on Composite Materials Munich, Germany : autor neznámý, 2016.

Hrazdírka, M. 2010. *Materiály na bázi uhlíku a jejich využití.* Brno : Vysoké učení technické v Brně, 2010.

Kadlec, M. 2012. *Fraktografie vláknových kompozitů na bázi epoxid/uhlík pro letecké aplikace.* Praha : Konference Transfer – výzkum a vývoj pro letecký průmysl, 2012.

Kwon, D.-J., a další. 2016. *Detection of damage in cylindrical parts of carbon fiber/epoxy composites using electrical resistance measurements.* Gyeongsang National University : Elsevier, 2016.

Liberton, A. S., a další. neznámý. *Damage Quantification in Electrically Conductive Composite Laminates.* neznámé : neznámý, neznámý.

Luboš, M. 2019. RFID čtečka RDM6300 125kHz. *Návody Arduino.* [Online] 15. 1 2019. [Citace: 8. 10 2019.] <https://navody.arduino-shop.cz/navody-k-produktum/rfid-ctecka-rdm6300-125khz.html>.

Müller, T., Horoschenkoff, A. a Rapp, H. 2013. *Carbon fibre sensor for crack monitoring of composite materials.* Mnichov : Universität der Bundeswehr, University of applied sciences, 2013.

NASA. rok neznámý. What are composites? *NASA.gov.* [Online] rok neznámý. [Citace: 14. 3 2020.]

Možnosti monitorování kompozitních konstrukcí s využitím vodivosti uhlíkových vláken

https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/aeronautics_what_are_composites.pdf.

Nečásek, S. 1981. Radiotechnika do kapsy (Něco o cívkách). [Online] 1981. [Citace: 18. 11 2019.] http://ok1ike.c-a-v.com/soubory/neco_o_civkach.htm.

reseneulohy.cz. 2019. *Sbírka řešených úloh.* [Online] 11. 1 2019. [Citace: 7. 10 2019.] <http://reseneulohy.cz/68/vzajemna-indukcnost-civek>.

RFID4u.com. rok neznámý. *How to select a correct tag - frequency.* [Online] rok neznámý. [Citace: 10. 10 2019.] <https://rfid4u.com/rfid-basics-resources/how-to-select-a-correct-tag-frequency/>.

Schmidová, N., Horoschenkoff, A. a Růžička, M. 2018. *Investigation of the electrical resistivity of damaged carbon fibers sensors with regard to SHM.* místo neznámé : Department of Mechanics, Biomechanics and Mechatronics, Faculty of Mechanical Engineering, Czech Technical University in Prague. Technická 4, Praha 6, Czech Republic, 2018.

Sonel S.A. Company. 2013. *Měření malých odporů.* [Online] 2013. [Citace: 22. 3 2020.] http://apos-auto.cz/wp-content/uploads/09-katalog_sonel_cz_2013-mereni-malych-odporu.pdf.

Stročka, M. rok neznámý. Indukčnost různých typů cívek. [Online] rok neznámý. [Citace: 18. 11 2019.] <http://members.chello.cz/mstrocka/indukcnost/Indukcnost.html>.

Tichý, M. 1998. *Elektronika.* Praha : CUNI, 1998.

Vrbka, J. 2008. *Mechanika kompozitů.* Brno : Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky, Fakulta strojního inženýrství VUT v Brně, 2008.

Wang, S., Chung, D. D. L. a Chung, J. H. 2006. Self-sensing of Damage in Carbon Fibre Polymer-Matrix Composite Cylinder by Electrical Resistance Measurement. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures.* 2006, Vol. 17-January 2006.

Want, R. 2006. *An introduction to RFID technology.* místo neznámé : Pervasive Computing, 2006. IEEE. 5. 25 - 33.10.1109/MPRV.2006.2..

Zrubecký, F. 2017. *Vliv stínění elektromagnetického pole na účinnost systému bezkontaktního přenosu energie.* Plzeň : Západočeská univerzita v Plzni, 2017.