

Optická vlákna v aplikované pružnosti

Bc. Norbert Dolejš

Vedoucí práce: Doc. Ing. Jan Řezníček, CSc.

Abstrakt

Tato práce se zabývá vlastnostmi, využitím a aplikací optických vláknových snímačů ve sledování stavu chytrých konstrukcí (smart structures).

Klíčová slova

Smart structures, optické vláknové senzory, experimentální metody.

1. Úvod

V rámci části projektu FT-TA3/043 č. RPN/53/06 ve spolupráci s AERO Vodochody a.s. a VZLÚ a.s. byla v podkapitole „Experimentální zkoušky“ řešena dílčí problematika únavového chování vzorku s trhlinou a kompozitní opravou.

Při těchto zkouškách byla ověřena možnost integrace vláknového snímače do materiálu kompozitní záplaty a dále bylo možno výsledky měření porovnat s měřením pomocí odporového tenzometru.

Průběh a závěry experimentu jsou využity pro poznatky konstruování inteligentních konstrukcí (smart structures SMS) a monitorování stavu konstrukce (structure health monitoring SHM)

Cílem tohoto příspěvku je popsat filozofii problematiky SMS a SHM, princip a aplikace optických vláknových snímačů (fiber optic sensors FOS) a ukázat schopnost FOS detekovat poruchy typu delaminace lepených spojů kompozitních oprav.

1.1 Smart structures

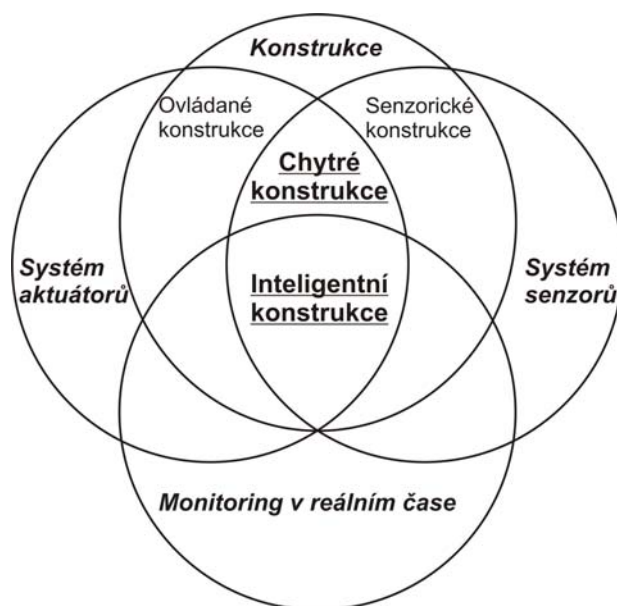
Člověk se vždy nechával inspirovat přírodou, ale až v poslední době začal uvažovat o využití vlastnosti přizpůsobit se v moderním strojírenství. Tato vlastnost je už dlouhou dobu známá u všech živých organismů. Výsledkem těchto úvah je snaha o vytvoření SMS – chytré přizpůsobivé konstrukce. SMS konstrukce by měla umět vykonávat svou funkci v závislosti na působení vnějších vlivů a svém aktuálním stavu. Jejich schopnost odolávat provozním špičkám zatížení a poruchám je kontinuálně monitorován.

Základní rozdělení smart structures:

Senzorické systémy (sensor structures) – konstrukce pasivně zjišťují svůj stav pomocí senzorů.

Chytré konstrukce (reactive smart structures) – konstrukce reagující na svůj stav. Možná zpětná vazba na zatížení atd.

Inteligentní konstrukce (intelligent structures) – konstrukce reagující na svůj stav s možností řídicího systému se učit. Nejvyšší forma smart structures.



Obr. 1. Princip smart structures

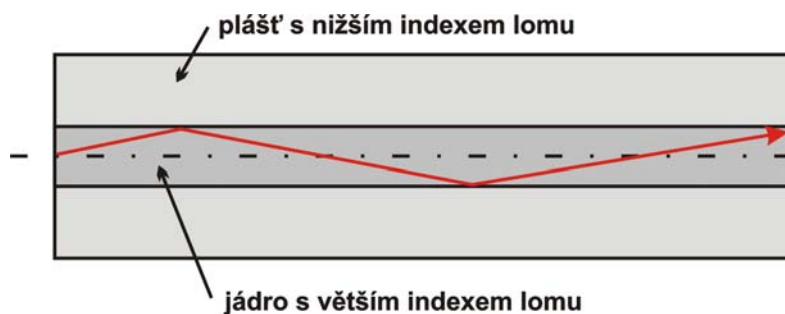
Experimenty na Ústavu mechaniky, biomechaniky a mechatroniky jsou směřovány k vyřešení problémů týkajících se především monitorování stavu konstrukce a jeho využití například v leteckém průmyslu. Hlavním požadavkem je, aby konstrukce sama dala zřetelně vědět o vznikající poruše a dokázala podat informaci o jejím průběhu. Jedná se například o vznik a šíření trhliny. Jednou z problematik senzorických konstrukcí je integrace snímačů přímo do materiálu konstrukce. Jako nejvhodnější materiál pro integraci snímačů se jeví kompozitní struktura.

1.2 Princip optických vláknových snímačů

Hlavní výhodou, využitelnou v rámci smart structures, je u vláknových snímačů jejich minimální velikost a tedy možnost integrace přímo do struktury materiálu, nevodivost a odolnost proti elektromagnetickému rušení využitelná v armádních aplikacích. Sledování mechanických napětí a strukturálních změn přímo v materiálu nám v této podobě zatím žádný přímo aplikovatelný způsob neumožnil.

K ovlivnění materiálu a jeho mechanických vlastností dochází pouze minimálně. Jedinou omezující vlastností je aplikace, kdy nesmí dojít k poškození optického vlákna a možné konstrukční problémy s vyvedením optického vlákna z měřeného objektu. Tato omezení limitují integraci optických vláken zatím pouze do struktury kompozitních materiálů, anebo využití vláknových snímačů podobně jako odporových tenzometrů aplikovaných na povrch součástí.

K přenosu informace pomocí vláknového snímače dochází totálním odrazem na hranici mezi jádrem a jeho obalem. Totální odraz vzniká pouze při změně indexu lomu, kdy jádro má vyšší index lomu a jeho obal nižší.

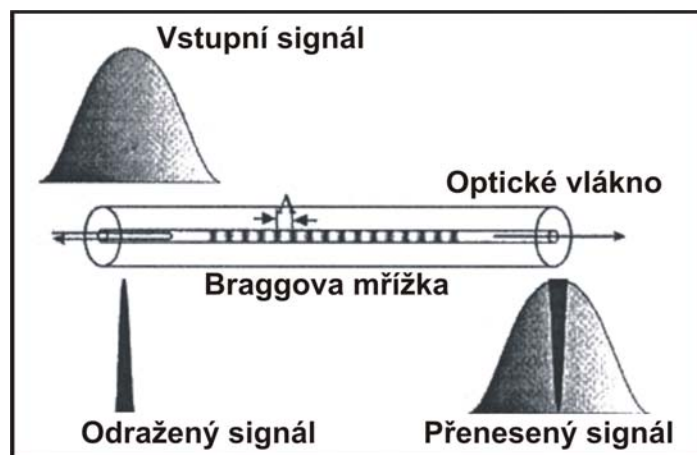


Obr. 2. Vedení světla

Principu odrazu světla při změně indexu lomu využívá i nejrozšířenější vláknový senzor – optický senzor s Braggovou mřížkou (fiber Bragg senzor, FBG).

Jedná se o mřížku skládající se ze série poruch indexu lomu podél délky vlákna vytvořenou lokálně v místě měření deformace. Při průchodu širokopásmového světla optickým vláknem dochází k odrazu části světelného toku Braggovou mřížkou. Perioda mřížky určuje odraženou vlnovou délku světla.

Při měření se využívá změna periody mřížky při deformaci vlákna a tím pádem i posun vlnové délky odraženého světla.



Obr. 3. Optický senzor s Braggovou mřížkou

Vlnová délka odraženého světla je dána vztahem

$$\lambda_b = 2n_e \Lambda, \quad (1)$$

kde λ_b je vlnová délka odraženého světla,

n_e je index lomu světla ve vlákně a

Λ je perioda mřížky.

V případě ovlivnění experimentu změnou teploty můžeme změnu vlnové délky odražené od Braggovy mřížky vyjádřit vztahem

$$\Delta\lambda(\varepsilon, T) = K_\varepsilon \Delta\varepsilon + K_T \Delta T. \quad (2)$$

K_ε a K_T jsou konstanty získané od výrobce Braggovy mřížky, nebo teplotní kalibrací. Při samotném měření je nutno měřit změnu teploty.

2. Experiment

Experimentální ověření vlastností a použitelnosti integrovaných optických snímačů bylo rozděleno na dvě části.

Část první byla věnována přípravě vzorků skládajících se z duralového jádra s bórovou záplatou z obou stran (Skin double specimen, SDS) a integraci optického snímače do jedné ze záplat.

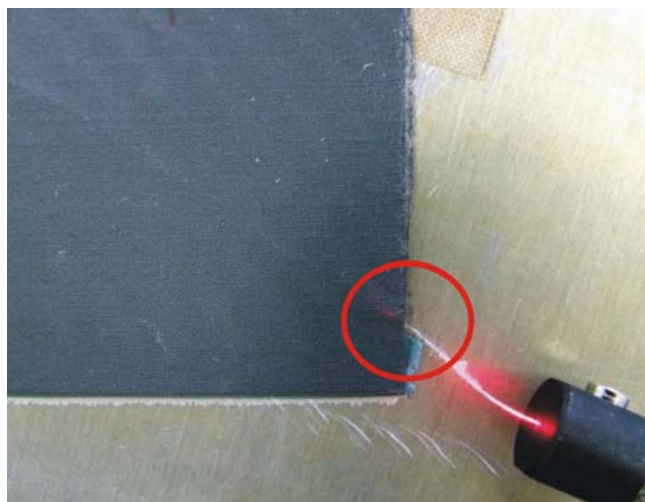
Druhá část byla věnována únavovým zkouškám SDS těles s optickým snímačem.

2.1 Výroba SDS těles s integrovaným optickým snímačem

Při výrobě SDS těles byla ověřována možnost integrace vláknových snímačů do bórové záplaty, anebo integrace snímačů do vrstvy lepidla mezi bórovou záplatou a duralové jádro.

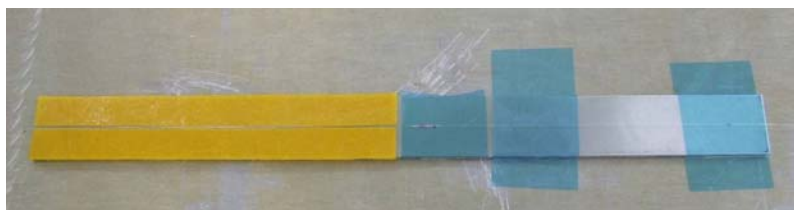
U obou možností byla předpokládána vyšší citlivost při detekci odlepení než u využití odporového tenzometru instalovaného na hranu záplaty. Při testování bylo využito standardního telekomunikačního optického vlákna se stejnými parametry, jako má optický vláknový senzor.

Integrace optického vlákna do bórové příložky proběhla vyjmutím několika vláken a vložení vlákna do vzniklé drážky. Při uložení mimo drážku nebo napříč směru křížení bórových vláken docházelo k rozdrcení vlákna. Následné vytvrzení v autoklávu ukázalo chemickou agresivitu epoxidové pryskyřice vytékající z prepregu vůči polyakrylátovému krytí optického vlákna.



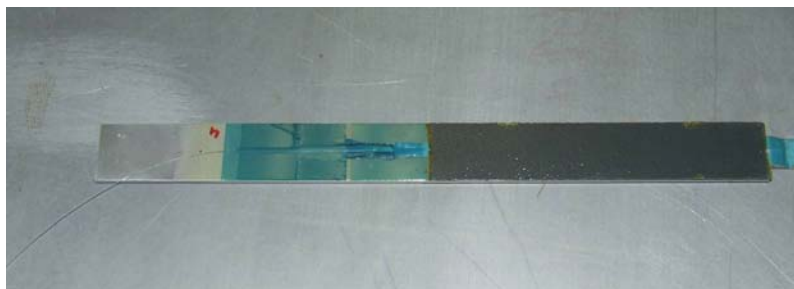
Obr. 4. Vlákn rozdrcené bórovou příložkou

Od aplikace snímačů do vrstvy epoxidového lepidla pod bórovou záplatou bylo po předchozích zkušenostech upuštěno a byla zvolena metoda vkládání optického snímače mezi dva kusy rozříznutého fóliového lepidla FM 73.

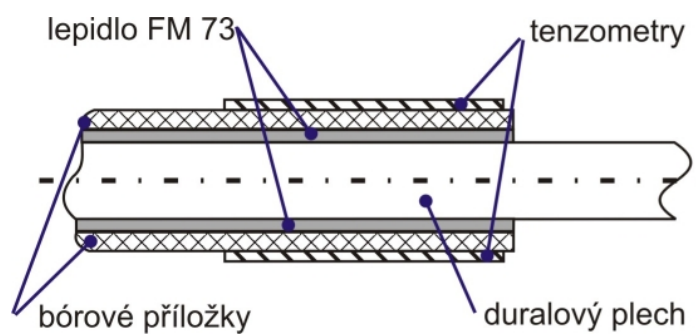


Obr. 5. Optický snímač vložený v podélně rozdělené vrstvě fóliového lepidla

Tato metoda se při následném vytvrzení bórové příložky ukázala jako správná a byla využita pro výrobu SDS vzorku s přesně umístěným měřícím úsekem vlákna ve vzdálenosti od 1mm po 5mm od hrany příložky.



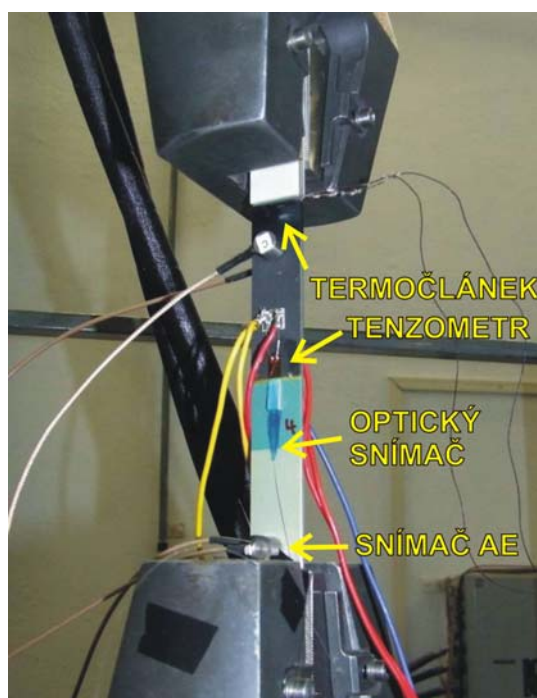
Obr. 6. SDS těleso



Obr. 7. Detail složení SDS tělesa

2.2 Návrh sestavení experimentu

Při měření byl využit jeden FBG snímač, dva odporové tenzometry na obou stranách na hraně příložky, termočlánek a dále také snímač akustické emise.



Obr. 8. Detail SDS tělesa se snímači

Jako zatěžovací stroje byl využit hydraulický stroje MTS typ 810 používaný ve VZLÚ.



Obr. 9. *Zatěžovací stroj MTS*

Optický snímač o délce měřicí mřížky 5mm a deformační citlivosti $K_d = 0,61 \text{ pm}/\mu\text{i}$ a teplotní citlivosti $K_t = 8,84 \text{ }\mu\text{i}/^\circ\text{C}$ byl připojen k měřicí jednotce FBGuard od výrobce Safibra (vzorkovací frekvence 70 Hz). Pro ukládání do PC bylo využito softwaru dodaného výrobcem měřicího přístroje.



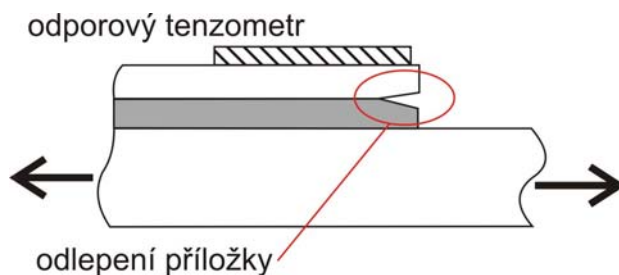
Obr. 10. *FBGuard*

Na tenzometrickou ústřednu BMC meM-ADFo (vzorkovací frekvence 220 Hz) byly připojeny odporové tenzometry Vishay Micro-Measurements typ CEA-06-125UN-35 a termočlánky pro měření teploty. Záznam z měření byl vytvořen pomocí softwaru NextView4.

2.3 Metodika měření

Těleso SDS bylo zatěžováno míjivým tahem v postupně navyšovaných hladinách zatížení. Tenzometr na povrchu příločky snímá amplitudu deformace a je umístěn ve stejném místě jako mřížka optického vláknového senzoru. Pokud nedojde během 50 000 cyklů na příslušné hladině k poklesu amplitudy deformace snímané tenzometrem většinu než 10 % (kritérium rozlepení příločky), je hladina zatěžování zvýšena a měření pokračuje.

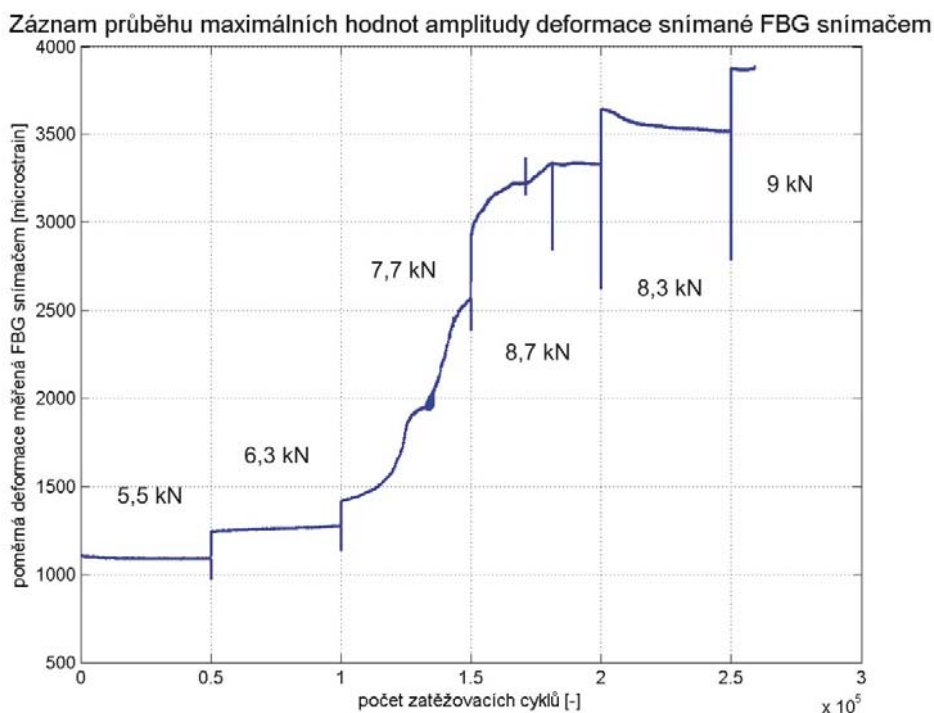
Těleso bylo zatěžováno až do porušení.



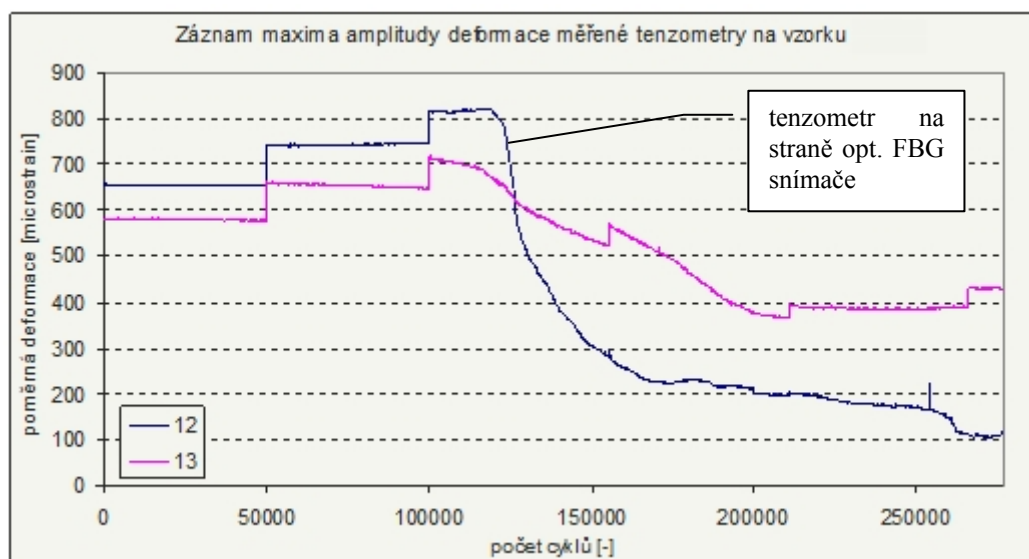
Obr. 11. Princip stanovení okamžiku rozlepení

3. Výsledky experimentu

Zatěžování SDS tělesa bylo zakončeno únavovým lomem v duralu. K rozlepování začalo docházet současně na obou stranách vzorku na hladině 7,0 kN. Detekce rozlepování indikovaná optickým snímačem je ilustrována na obr. 12. K delaminaci došlo na rozhraní mezi lepidlem a příložkou. Optický vláknový senzor zůstal nalepen ve vrstvě lepidla na duralovém plechu a snímá deformace až do destrukce vzorku. Deformace zaznamenaná tenzometrem je na obr. 13. Při odlepování příločky deformace měřená tenzometrem klesá.



Obr. 12. Průběh amplitud deformace snímaných FBG snímačem



Obr. 13. Průběh amplitud deformace snímaných odporovým tenzometrem

4. Závěr

Výsledky zkoušky potvrdily schopnost aplikace FOS jako snímačů SHM. Redistribuce napětí v důsledku delaminace opravy detekuje počátek růstu poruchy.

V průběhu zkoušek bylo dosaženo kvalitativního souhlasu s paralelně prováděným měřením pomocí tenzometrů. Také kvantitativní změna nárůstu lokálních deformací na okraji delaminované opravy a změna hladin únavové zkoušky si odpovídají. Integrace optického snímače nezpříčinila rychlejší odlepení oproti straně bez optického snímače. Vzhledem k omezenému rozsahu měření není možné prozatím dojít k dalším přesnějším závěrům.

Seznam symbolů

λ_b	vlnová délka odraženého světla	[m]
n_e	index lomu vlákna	[1]
Λ	perioda mřížky	[m]
K_ε	deformační citlivost	[pm/ μ i]
K_T	teplotní citlivost	[μ i/ $^{\circ}$ C]
ε	deformace	[1]
T	teplota	[$^{\circ}$ C]

Seznam použité literatury

Dvořák M., Růžička, M.: Experimentální zkoušky k projektu kompozitní opravy - Závěrečná zpráva za rok 2009, ČÍSLO ZPRÁVY: 12105/09/18, 12105 Ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky Fakulty strojní ČVUT, Praha, 2009

Edited by Boller C., Fou-Kuo Chang, Yozo Fujino: Encyclopedia of Structural Health Monitoring, Wiley, New York, 2009. ISBN: 978-0-470-05822-0.