



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta strojní

Diplomová práce

Analýza lepených spojů pomocí optovláknových snímačů deformací

2021

Jiří Bidlo



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Bidlo** Jméno: **Jiří** Osobní číslo: **457612**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky**
Studijní program: **Aplikované vědy ve strojním inženýrství**
Specializace: **Aplikovaná mechanika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Analýza lepených spojů pomocí optovláknových snímačů deformací

Název diplomové práce anglicky:

Analysis of adhesive joints using fiber optic strain sensors

Pokyny pro vypracování:

1. Seznámení s problematikou lepených spojů a optovláknových snímačů deformací
2. Sestavení výpočetního modelu lepeného spoje
3. Porovnání výsledků výpočetního modelu s experimentálními daty z optovláknových snímačů
4. Diskuse výsledků, závěr

Seznam doporučené literatury:

Chen D., Cheng S., 1983, An Analysis of Adhesive-Bonded Single-Lap Joints, J. Appl. Mech., pp. 109-115
Boller Ch., Chang F.-K., Fujino Y., 2009, Encyclopedia of Structural Health Monitoring, ISBN: 978-0-470-05822-0

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

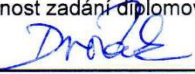
Ing. Milan Dvořák, Ph.D., odbor pružnosti a pevnosti FS


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

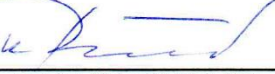
Datum zadání diplomové práce: **12.04.2021**

Termín odevzdání diplomové práce: **13.08.2021**

Platnost zadání diplomové práce: _____

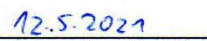

Ing. Milan Dvořák, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce



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


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

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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


Datum převzetí zadání


Podpis studenta

Anotační list

| | |
|-----------------------------|--|
| Jméno autora | Jiří Bidlo |
| Název BP | Analýza lepených spojů pomocí optovláknových snímačů deformací |
| Anglický název | Analysis of adhesive joints using fiber optic strain sensors |
| Akademický rok | 2020/2021 |
| Obor studia | Aplikované vědy ve strojním inženýrství / Aplikovaná mechanika |
| Ústav/Odbor | Ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky / Odbor pružnosti a pevnosti |
| Vedoucí práce | Ing. Dvořák Milan, Ph.D. |
| Bibliografické údaje | počet stran: 86 počet obrázků: 62 počet tabulek: 15 počet příloh: 2 |

Abstrakt:

Tato diplomová práce se zabývá analýzou jednoduchého přeplátovaného lepeného spoje pomocí optovláknových snímačů deformací a porovnáním jimi naměřených výsledků s analytickým a MKP modelem. V první části práce je popsána technologie a použití optovláknových snímačů deformací a následně je představen analytický model použitý pro porovnání s výsledky. Ve druhé části práce jsou představeny a vyhodnoceny výsledky experimentu a jejich porovnání s teoretickými modely.

Klíčová slova analytický model lepeného spoje, Braggova mřížka, FBG senzor, jednoduše přeplátovaný lepený spoj, lepení, MKP model, optovláknový snímač

Abstract:

This thesis deals with the analysis of the adhesive single-lap joint using fiber optic strain sensors and the comparison of the results measured by them with analytical and FEM model. In the first part the technology and use of fiber optic strain sensors is described and the analytical model used for comparison with the results is presented. The second part of the work presents and evaluates the results of the experiment and their comparison with theoretical models.

Keywords adhesive bonding, adhesive joint, analytical model, Bragg grating, FBG sensor, FEM model, fiber optic strain sensor, single-lap adhesive joint

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně a použil pouze podklady uvedené v příloženém seznamu literatury.

V Praze 10. 9. 2021

Jiří Bidlo

Za poskytnuté rady, ochotu, věnovaný čas a přípravu experimentu děkuji vedoucímu práce panu Ing. Milanovi Dvořákovi, Ph.D. Za asistenci při tahové zkoušce děkuji panu Ing. Davidu Blahovi.

Obsah

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | Úvod..... | 9 |
| 1.1 | Cíle práce | 9 |
| 2 | Rešerše | 10 |
| 2.1 | Lepené spoje..... | 10 |
| 2.1.1 | Podstata lepicího procesu | 10 |
| 2.1.2 | Tvar lepených spojů | 11 |
| 2.1.3 | Výhody lepených spojů..... | 11 |
| 2.1.4 | Zkoušky lepených spojů..... | 12 |
| 2.2 | Optická vlákna..... | 12 |
| 2.2.1 | Princip fungování optického vlákna..... | 12 |
| 2.2.2 | Typy optických vláken | 13 |
| 2.2.3 | Základní vlastnosti optických vláken | 14 |
| 2.3 | FBG senzory..... | 15 |
| 2.3.1 | Princip funkce FBG..... | 15 |
| 2.3.2 | Deformační a teplotní citlivost FBG | 17 |
| 2.3.3 | Teplotní kompenzace | 18 |
| 2.3.4 | Typy Braggových mřížek..... | 18 |
| 2.3.5 | Výhody a nevýhody FBG snímačů | 19 |
| 2.4 | Distribuovaný optovláknový snímač..... | 20 |
| 2.5 | Rešerše použití FBG pro sledování mechanických vlastností lepeného spoje | 22 |
| 2.5.1 | Tahové zkoušky lepených spojů..... | 22 |
| 2.6 | Shrnutí rešerše | 23 |
| 3 | Analytické modely lepených spojů | 24 |
| 3.1 | Goland–Reissnerův model | 24 |
| 3.2 | Použití Goland–Reissnerova modelu v této práci | 30 |
| 4 | Testování vlivu vložených FBG vláken na mechanické vlastnosti spoje..... | 32 |
| 5 | Tahová zkouška lepeného spoje..... | 38 |
| 5.1 | Příprava vzorku | 38 |
| 5.2 | Použité lepidlo..... | 43 |
| 5.3 | Tahová zkouška vzorku..... | 43 |
| 6 | Výsledky experimentů a teoretických modelů | 46 |
| 6.1 | Výsledky měření pomocí odporových tenzometrů..... | 46 |
| 6.2 | Výsledky měření pomocí FBG snímačů | 48 |

| | | |
|-------|---|----|
| 6.3 | Výsledky měření pomocí distribuovaného optovláknového snímače | 50 |
| 6.4 | Model pomocí metody konečných prvků | 51 |
| 6.4.1 | Vstupní data..... | 51 |
| 6.4.2 | Okrajové podmínky..... | 51 |
| 6.4.3 | Sít'ování..... | 53 |
| 6.5 | Porovnání výsledků experimentu s MKP modelem | 54 |
| 6.6 | Porovnání výsledků experimentu s analytickým modelem | 58 |
| 7 | Závěr | 61 |
| 8 | Literatura | 63 |
| | Seznam použitých veličin a jednotek | 69 |
| | Seznam obrázků | 71 |
| | Seznam tabulek | 74 |
| | Přílohy | 75 |
| | Datasheet použitého lepidla Spabond 345..... | 75 |
| | Grafické výstupy z měření | 76 |

1 Úvod

Lepené spoje jsou široce používaným druhem spojů v nejrůznějších průmyslových odvětvích, jako jsou třeba letecký nebo automobilový průmysl. Hlavní výhodou lepených spojů oproti jiným druhům spojů je rovnoměrnější rozložení napětí podél spoje. I přesto se ale na krajích lepeného spoje vyskytují vrcholy smykového napětí. Konvenční metody, jako jsou například tenzometry vložené do spoje nebo optická korelace, nejsou pro měření napětí uvnitř spoje vhodné, proto by jiný způsob kontinuálního měření napětí lepených spojů našel široké uplatnění. Analýza uvnitř lepeného spoje je vhodným nástrojem pro optimalizaci vysokopevnostních spojů a základem pro monitorování jejich kondice. Pro analýzu uvnitř spojů nacházejí uplatnění FBG snímače nebo distribuované optovláknové snímače, neboť se díky malým rozměrům dají vkládat přímo do lepených spojů, aniž by výrazně narušovaly původní vlastnosti spoje.

1.1 Cíle práce

Tato práce si dává za cíl zhodnotit vhodnost použití FBG snímačů a distribuovaných optovláknových snímačů pro měření v lepených spojih. Dílčí cíle této práce jsou:

- provést rešerši literatury, která se zabývá lepenými spoji, optickými vlákny, FBG snímači, distribuovanými optovláknovými snímači a použitím optovláknových snímačů pro analýzu lepených spojů;
- provést rešerši analytických modelů lepených spojů;
- otestovat vliv do spoje vložených optických vláken na mechanické vlastnosti spoje;
- vyrobit vzorek s lepeným spojem a umístit do něj optovláknové snímače deformací;
- provést experimentální tahovou zkoušku vzorku s lepeným spojem;
- vytvořit MKP model vzorku s lepeným spojem použitým při zkoušce;
- porovnat naměřené hodnoty z tahové zkoušky s hodnotami z MKP analýzy;
- porovnat naměřené hodnoty z tahové zkoušky s hodnotami z analytického modelu.

2 Rešerše

Pro tuto diplomovou práci jsou rozhodující tři pojmy: lepený spoj, optické vlákno a optovláknové snímače. V teoretické části diplomové práce budou nejprve uvedeny základní informace o lepených spojkách, poté nastíněn princip fungování optických vláken a nakonec konkrétně popsány optovláknové snímače, jež byly při zkouškách použity. Jsou to FBG snímače a distribuovaný optovláknový snímač. Další bodem rešerše je vyhodnocení vhodnosti použití uvedených senzorů pro zkoumání mechanických vlastností lepených spojů. Z tohoto důvodu byly analyzovány předchozí práce různých autorů, kteří danou problematiku zkoumali.

2.1 Lepené spoje

První část rešerše se bude zabývat lepenými spoji a jejich popisem. Lepení je poměrně nová technologie, využívaná díky svým výhodám oproti tradičním způsobům spojování, jako jsou šroubové spoje, nýtování, svařování nebo pájení. Nejprve se lepené spoje objevily v leteckém a kosmickém průmyslu, ale následně se začaly používat i v dalších průmyslových odvětvích [1].

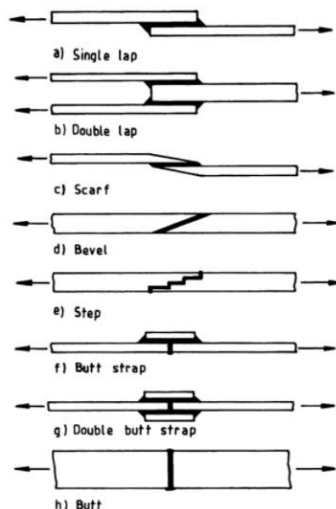
2.1.1 Podstata lepícího procesu

Lepení je proces spojování materiálů (adherendů), při kterém se dosahuje trvalé spojení stejných, případně různých materiálů prostřednictvím lepidel (adheziv). Lepidlo je látka schopná utvořit pevné a trvalé spojení mezi dvěma materiály. Spojení je zajištěno díky kohezi, což je vnitřní pevnost lepidla a adhezi, což je přilnavost lepidla k adherendům.

Aby byla zajištěna maximální pevnost, lepený spoj vyžaduje určité specifické podmínky, které se liší od jiných konvenčních metod spojování. Jednou z nejdůležitějších je příprava povrchů adherendů, která zajišťuje dokonalou přilnavost lepidla [1, 2].

2.1.2 Tvar lepených spojů

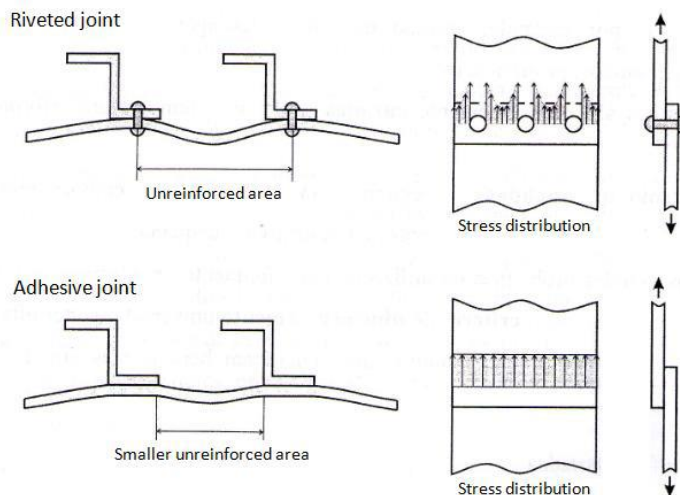
Nejčastějším tvarem lepeného spoje je přeplátovaný spoj, neboť dosahuje lepších mechanických vlastností než spoj tupý. Vybrané druhy lepených spojů jsou uvedeny na Obr. 1 [2].



Obr. 1 – Tvary lepených spojů [3]

2.1.3 Výhody lepených spojů

Ve srovnání s jinými tradičními metodami nabízí lepený spoj rovnoměrnější rozložení napětí, jež je znázorněno na Obr. 2. Výsledkem je větší tuhost spoje, lepší přenos zatížení a únavová pevnost nebo lepší tlumení vibrací. Lepení dále umožňuje spojení materiálů s různými koeficienty tepelné roztažnosti, snížení výrobních nákladů, relativně jednoduchý výrobní proces nebo snížení celkové hmotnosti konstrukce bez ztráty pevnosti [1].



Obr. 2 – Porovnání rozložení napětí u šroubového a lepeného spoje [1]

2.1.4 Zkoušky lepených spojů

Pro zjištění mechanických vlastností lepeného spoje je nutné provést jeho zkoušky. Z výsledků zkoušek se následně vyhodnocuje vhodnost lepidla použitého při výrobě spoje nebo vhodnost typu spoje pro danou aplikaci. Základní dělení zkoušek lepených spojů je [4]:

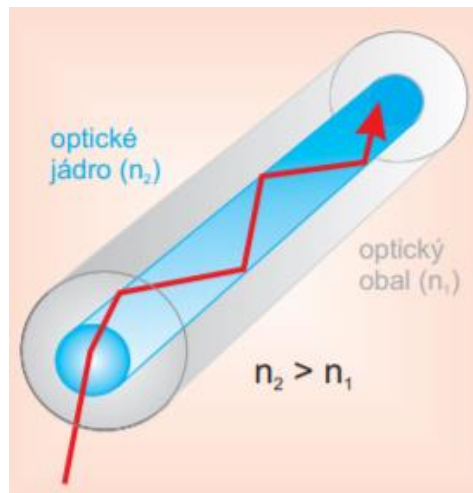
- destruktivní zkoušky,
 - statické zkoušky,
 - pevnost v odlupování,
 - pevnost ve smyku;
 - dynamické zkoušky,
 - rázová pevnost,
 - únavová zkouška;
- nedestruktivní zkoušky.

2.2 Optická vlákna

Další část rešerše se bude zabývat optickými vlákny, která jsou základním stavebním kamenem této práce. Postupně bude popsán princip jejich fungování, jejich typy a nakonec základní vlastnosti. Optické vlákno je přenosové médium, tvořené skleněným nebo plastovým vláknem, které prostřednictvím světla přenáší signály ve směru své podélné osy. Jeho délka je mnohonásobně větší než šířka, a proto je schopno přenášet informace na dlouhé vzdálenosti. K výhodám optických vláken oproti metalickým vodičům patří například menší útlum signálu nebo odolnost vůči elektromagnetickému rušení [5, 6].

2.2.1 Princip fungování optického vlákna

Optické vlákno funguje na principu totálního odrazu světla na rozhraní opticky hustšího prostředí, jež tvoří jádro vlákna (core), a opticky řidšího prostředí, které tvoří tzv. opticky aktivní plášť vlákna (cladding) – viz Obr. 3. Index lomu pláště tedy musí být menší než index lomu jádra. Informace, jež se přenáší optickým vláknem, se šíří různými vidy, které putují po různě dlouhých trajektoriích, a proto se signál při přenosu vláknem deformuje. Tento jev se nazývá intervidová disperze a udává převrácenou hodnotu maximální frekvence, kterou můžeme vláknem přenést tak, abychom na konci ještě rozlišili dva po sobě jdoucí pulsy [5].



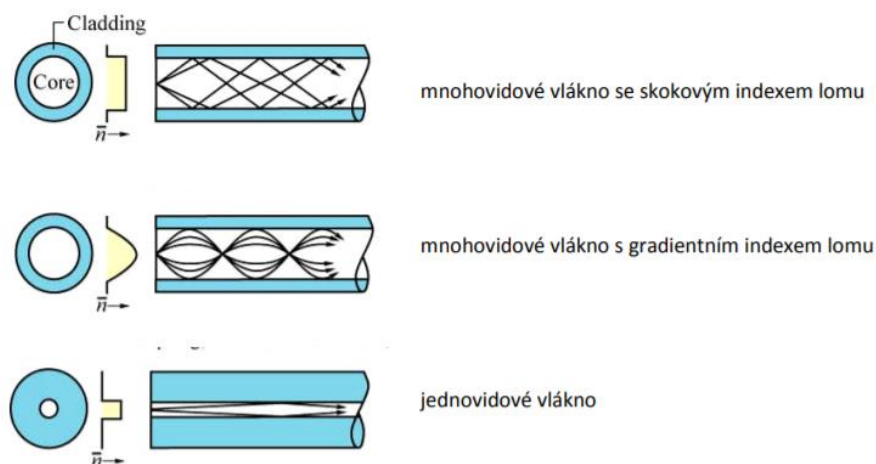
Obr. 3 – Princip fungování optického vlákna [7]

2.2.2 Typy optických vláken

Existuje mnoho rozdělení optických vláken, například podle materiálu, ze kterého jsou vlákna vyrobena, nebo podle způsobu použití. Nejzákladnější je rozdělení podle způsobu šíření optického signálu ve vlákně. Podle tohoto kritéria se vlákna rozdělují na [6]:

- jednovidová,
- mnohovidová,
- gradientní.

Základní typy optických vláken jsou znázorněny na Obr. 4.



Obr. 4 – Základní typy optických vláken [5]

2.2.3 Základní vlastnosti optických vláken

Numerická apertura

Numerická apertura udává, jak velký je maximální vstupní (nebo výstupní) úhel paprsků (θ), které ještě můžeme do vlákna navázat (nebo které z něj na druhé straně vystupují). Čím větší je numerická apertura, tím více světla z bodového zdroje lze do vlákna soustředit a přenést. Je tedy žádoucí, aby rozdíl indexů lomu mezi optickým jádrem a obalem byl co největší. Numerická apertura se vypočítá jako:

$$NA = \sqrt{n_{\text{jádro}}^2 - n_{\text{obal}}^2} = \sin \theta. \quad (1)$$

Optický útlum

Další základní charakteristikou je optický útlum. Ten charakterizuje optické ztráty vlákna způsobené absorpcí a rozptylem světla při jeho průchodu vláknem. Tím nám říká, jaký podíl navázaného světla na dané vlnové délce projde na druhý konec vlákna. Útlum je závislý na vlnové délce, protože absorpce i rozptyl, které jsou jeho příčinou, jsou spektrálně závislé. Optický útlum se vypočítá jako:

$$a(\lambda) = -\frac{10}{L} \cdot \log \frac{P_{\text{výstupní}}}{P_{\text{vstupní}}}. \quad (2)$$

Přenosová kapacita

Přenosová kapacita optického vlákna udává, jaké množství informací lze vláknem přenášet. U mnohovidových vláken je omezena disperzí, respektive šířkou přenášeného pásma frekvencí. Ta se udává v $MHz \cdot km$, což v praxi znamená, že vlákno s šířkou pásma $500 MHz \cdot km$ přeneso na vzdálenost 1 km signál o maximální frekvenci 500 MHz, na vzdálenost 0,5 km signál o maximální frekvenci 1000 MHz nebo na vzdálenost 5 km signál s maximální frekvencí 100 MHz. Z uvedeného je zřejmé, že mnohovidová vlákna jsou vhodná pro krátké a střední vzdálenosti, ale nehodí se na dlouhé vzdálenosti, protože na nich mají velmi malou přenosovou kapacitu. Na dlouhé vzdálenosti jsou používána vlákna jednovidová, jejichž přenosová kapacita je řádově vyšší [5, 7].

2.3 FBG senzory

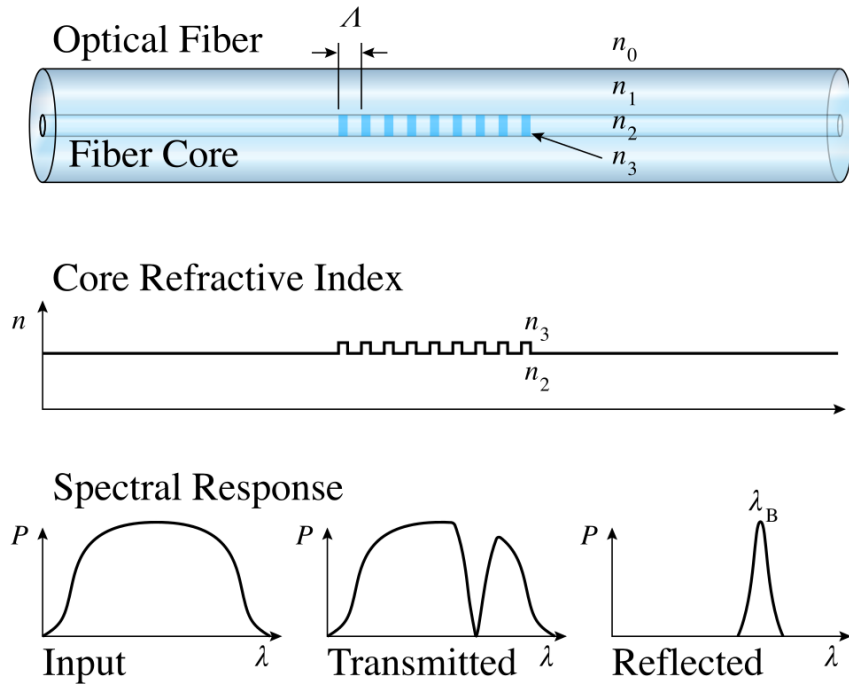
Pro měření namáhání překlátovaného lepeného spoje, jenž je zkoumán v této práci, byly použity FBG (Fiber Bragg Grating) senzory a distribuovaný optovláknový sensor. Nejprve budou nastíněny základní informace o FBG senzorech. Ty jsou schopny měřit průměrnou hodnotu napětí, jemuž je optické vlákno vystavováno, podél mřížky. Základem pro výrobu Braggovy mřížky je jednojádrové optické vlákno, které se vyrábí z křemenného skla. FBG struktury se zapisují nejčastěji UV laserem pomocí bočního osvětlení skrze fázovou masku (záření s vysokou intenzitou). Pro zápis je možné použít speciální optická vlákna s vysokým obsahem germania (GeO), mnohem častěji se ale používají běžná telekomunikační vlákna G.652 nebo G.657. K tomu, je nezbytné použít vodík, čímž dojde ke zvýšení fotocitlivosti pro UV záření laseru. Moderním způsobem je rovněž zápis metodou bod po bodu pomocí femtosekundového laseru. V tomto případě je FBG struktura vytvářena zaostřením optického svazku přímo do jádra vlákna, takže není nutné vlákno zbavovat primární ochrany, čímž zůstane zachována větší mechanická pevnost v porovnání s běžným zápisem [6, 20].

2.3.1 Princip funkce FBG

FBG snímač je tvořen periodickými změnami indexu lomu jádra optického vlákna. Při průchodu širokopásmového paprsku vláknem dopadá toto světlo na zmiňovanou periodickou strukturu. Tato struktura odráží určitou vlnovou délku, která se nazývá Braggova vlnová délka. Označuje se λ_b – viz Obr. 5. Braggova vlnová délka závisí na geometrických a optických vlastnostech struktury mřížky a vyjadřuje se vztahem:

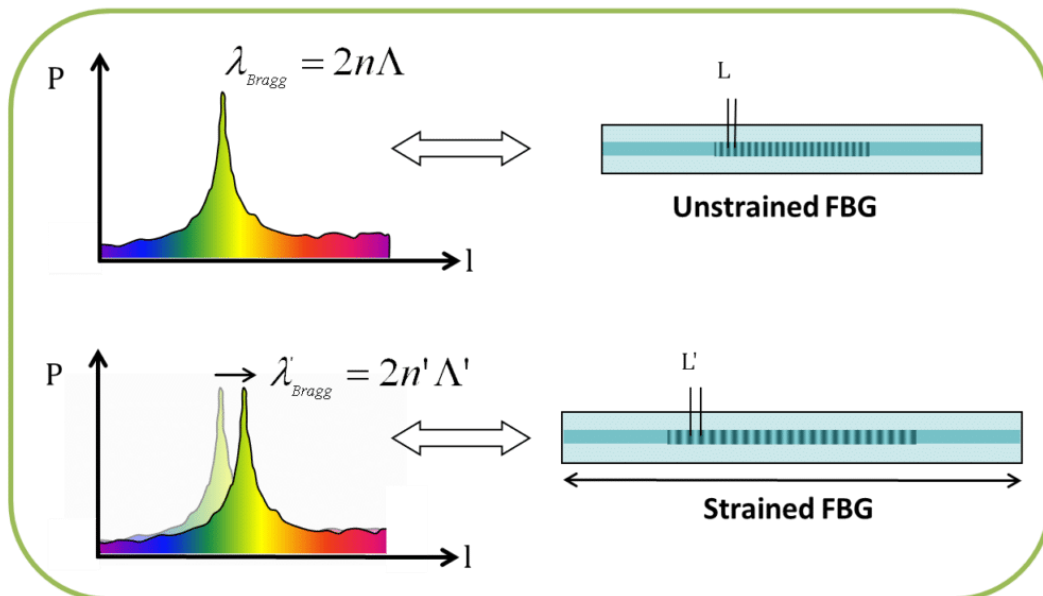
$$\lambda_b = 2n_{eff}\Lambda, \quad (3)$$

kde n_{eff} je efektivní index lomu mřížky a Λ je perioda změny indexu lomu [6].



Obr. 5 – Struktura FBG s indexem lomu jádra a spektrální odezvou [8]

Díky těmto vlastnostem může FBG sloužit jako senzor změny teploty nebo deformace. Například pokud je vlákno napínáno nebo stlačováno, dochází ke změnám ve struktuře vlákna a ke změnám Braggovy vlnové délky, viz Obr. 6 [8].



Obr. 6 – Změna Braggovy vlnové délky při namáhání [9]

2.3.2 Deformační a teplotní citlivost FBG

Jak již bylo uvedeno, výsledná Braggova vlnová délka závisí na teplotě a namáhání optického vlákna. Tyto závislosti jsou vyjádřeny rovnicí:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = k \cdot \varepsilon + \alpha_\delta \cdot \Delta T, \quad (4)$$

kde je $\Delta\lambda$ posun vlnové délky, λ_0 původní vlnová délka, ε poměrná deformace, α_δ změna indexu lomu, ΔT změna teploty a k citlivost. Citlivost k je závislá na fotoelastickém koeficientu p dle rovnice:

$$k = 1 - p. \quad (5)$$

Změna indexu lomu α_δ je dána vztahem:

$$\alpha_\delta = \frac{\delta n/n}{\delta T}. \quad (6)$$

Poměrná deformace ε z rovnice (4) se skládá z mechanické poměrné deformace (ε_m) a poměrné deformace tvořené teplotou (ε_T) dle vztahu:

$$\varepsilon = \varepsilon_m + \varepsilon_T. \quad (7)$$

Vzorec pro výpočet poměrné teplotní deformace je poté:

$$\varepsilon_T = \alpha_{sp} \cdot \Delta T. \quad (8)$$

Dosazením rovnic (5) až (8) do rovnice (4) je odvozen vztah pro chování FBG senzoru vzhledem k napětí a teplotě:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = k \cdot (\varepsilon_m + \alpha_{sp} \cdot \Delta T) + \alpha_\delta \cdot \Delta T. \quad (9)$$

Ze vztahu (9) je následně získána rovnice pro poměrnou deformaci ε_m :

$$\varepsilon_m = \frac{1}{k} \cdot \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} - \left(\alpha_{sp} + \frac{\alpha_\delta}{k} \right) \cdot \Delta T, \quad (10)$$

kde je α_{sp} koeficient roztažnosti (pro ocel $\alpha_{sp} = 12 \cdot 10^{-6} K^{-1}$) [21].

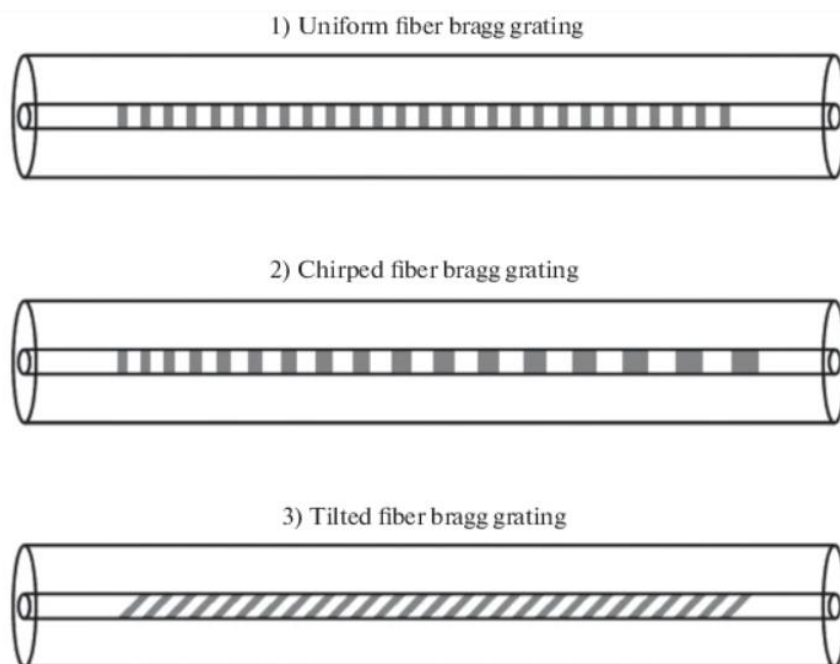
2.3.3 Teplotní kompenzace

Z důvodu vlivu teploty na měření pomocí FBG je nutné pro přesné výsledky měření napětí kompenzovat její vliv. Existují pro to dvě různé metody. Jednodušší z nich je použití kompenzačního senzoru, jenž musí být umístěn v místě vzorku, kde je nulová mechanická deformace ($\varepsilon_m = 0$). Následně je odečtením signálu kompenzačního senzoru od signálu měřicího senzoru získán vzorec pro výsledné poměrné prodloužení ε_m dle rovnice:

$$\varepsilon_m = \frac{1}{k} \cdot \left(\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} - \frac{\Delta\lambda_c}{\lambda_{0c}} \right). \quad (11)$$

2.3.4 Typy Braggových mřížek

Existuje několik typů Braggových mřížek v závislosti na vnitřní struktuře. Tyto typy jsou znázorněny na Obr. 7 a následně blíže popsány.



Obr. 7 – Typy Braggových mřížek [10]

Uniformní mřížka

Tento typ mřížky je považován za základní a nejjednodušší ohledně vnitřní struktury. Jedná se o homogenní strukturu, což znamená, že velikost periody Λ po celé délce mřížky je konstantní. Uniformní Braggovy mřížky se pro jejich vlastnosti využívají zejména v oblasti senzorické techniky (našly využití u snímačů teploty, otřesů nebo pnutí), protože mřížka tohoto typu je schopna zaznamenat veškeré změny způsobené vnějšími vlivy [8].

Lineárně čirpovaná mřížka

Jedná se o speciální typ mřížky, kde se perioda mřížky monotónně mění. Změna může být lineární nebo se může zvyšovat či snižovat rozteč ve středu mřížky. Charakteristické vlastnosti tohoto typu jsou považovány za vhodné především v telekomunikačních a senzorických technologiích. Jedním z příkladů využití je zařízení pro korekci a kompenzaci disperze, které se používá zejména v systémech WDM (vlnový multiplex) [8].

Nakloněná mřížka

Nakloněná Braggova mřížka svírá úhel mezi vlnovým vektorem mřížky a osou vlákna. Proto jsou rezonanční špičky režimů pláště ve srovnání s běžnými mřížkami intenzivnější. Vlnové délky rezonančních režimů pláště nakloněné Braggovy mřížky jsou vysoce citlivé na index lomu média mimo plášť vlákna. Možná hodnota úhlu náklonu je 1–45 ° [11].

Apodizovaná mřížka

Hlavní rozdíl oproti ostatním typům mřížek je ten, že se index lomu v jádře mění s každým dalším segmentem, a to po celou délku mřížky. Využívá se toho například v systému hustých vlnových multiplexů, zkráceně DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing). V tomto systému jsou vlnové délky různých kanálů velmi blízko sebe a mohlo by tak dojít ke vzájemnému splynutí kanálů. To by mělo za následek, že by přijímač nebyl schopen jednotlivé kanály od sebe rozpoznat. Pro zamezení tohoto jevu je nutné použít Braggovou mřížku s apodizovanou strukturou [8].

2.3.5 Výhody a nevýhody FBG snímačů

Výhody FBG snímačů

Jako optovláknový senzor má Braggova mřížka všechny výhody optických vláken, které už byly uvedeny v předchozích částech rešerše. Dalšími výhodami senzorů s Braggovou mřížkou jsou:

- dlouhodobá stabilita,
- možnost snadné integrace do struktur,
- nevodivost.

FBG snímače dále vykazují dvě velmi důležité vlastnosti. První z nich je možnost sdružovat jednotlivé senzory do řetízků, což znamená zapojení více senzorů na jednom optickém vlákne do série. Například pro pásmo 1510–1590 nm je možné sledovat současně více mřížek optimalizovaných pro různé vlnové délky. Jejich počet pak závisí na tom, jak velký měřicí rozsah bude pro měřenou veličinu požadován, neboť se tento rozsah promítne do rozmezí vlnových délek, ve kterých se senzor bude pohybovat. Další výhodou FBG snímačů je selfreferencing – snímače poskytují absolutní hodnoty bez nutnosti reference [1, 5, 13].

Nevýhody FBG snímačů

Navzdory všem svým výhodám mají FBG snímače ve srovnání s jinými metodami i nevýhody, kterými jsou například [1]:

- vyšší cena,
- vyšší citlivost vůči teplotě,
- přítomnost optických poruch,
- ztráta světla při velkém ohybu vlákna.

2.4 Distribuovaný optovláknový snímač

Druhým optovláknovým snímačem, použitým v této práci, je distribuovaný optovláknový snímač. Měření tímto snímačem je zajištěno pomocí měřicího systému ODiSI 6000 od společnosti LUNA, jehož měřicí okruh pro měření distribuovaným optovláknovým snímačem je znázorněn na Obr. 8. Tento systém umožňuje měřit rozsáhlou síť, složenou z více senzorů (měřících třeba deformaci, teplotu nebo posun), neboť z nich dokáže získávat data současně a při různých vzorkovacích frekvencích. Během sběru dat měří vlnovou délku světla, které prochází optickými vlákny, a poté ji převádí na technické jednotky [31].

Na rozdíl od tradičních senzorů, které se spoléhají na diskrétní měření v předem určených bodech, využívá tato metoda celou délku optického vlákna. Do připojených optických vláken je vysílána série pulzů a je zaznamenáván vracející se signál v závislosti na čase. Distribuované snímací systémy byly vyvinuty pro ropný a plynárenský průmysl, aby pomohly technikům zásobníků s optimalizací životnosti vrtu. V současné době se využívají v mnoha aplikacích, jako jsou například monitoring integrity v potrubních systémech nebo sledování stavu konstrukcí [32].

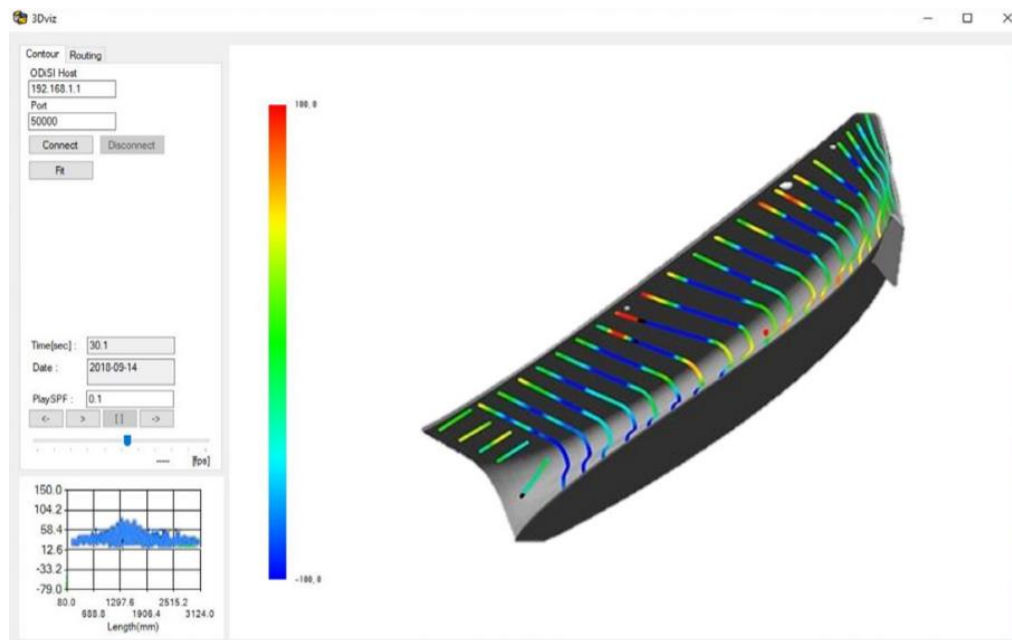


Obr. 8 – Měřící okruh s měřící jednotkou od společnosti LUNA [33]

Hlavními výhodami jsou například:

- vícekanálové měření v reálném čase;
- lehké a flexibilní senzory se snadnou instalací;
- senzory jsou dielektické a odolné proti korozi.

Měřící jednotka umožňuje trojrozměrné zobrazení namáhání nebo teplotních údajů přímo do CAD modelu nebo ve dvou rozměrech na standardní fotografii nebo na 2D obrázku – viz Obr. 9 [33].



Obr. 9 – Výsledný 3D model s naměřenými hodnotami napětí ze softwaru společnosti LUNA [33]

2.5 Rešerše použití FBG pro sledování mechanických vlastností lepeného spoje

Před samotným experimentem je nutné provést analýzu prací jiných autorů, jež se zabývají podobnou tematikou, tedy analýzou mechanických vlastností spoje pomocí optovláknových snímačů deformace. Konkrétně bylo zkoumáno použití FBG senzorů a jejich vhodnost pro měření uvnitř lepeného spoje.

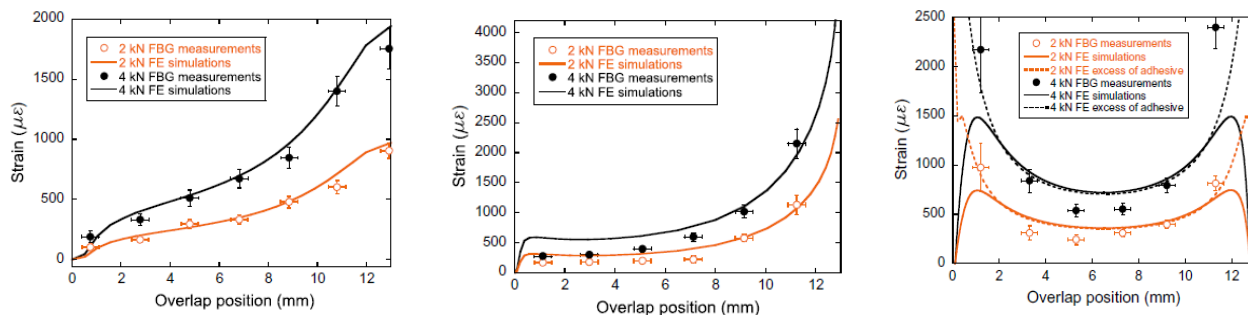
2.5.1 Tahové zkoušky lepených spojů

V disertační práci [1] byly tři FBG snímače použity pro měření deformace jednoduchého přeplátovaného spoje při tahové zkoušce. Jako materiál adherendů byl použit jednosměrný CFRP kompozit a jako lepidlo SikaForce®-7888. Lepené spoje byly následně zatěžovány v zatěžujících cyklech mezi 200 N a 5000 N. Výsledky experimentů byly porovnány s 2D a 3D MKP modelem při zatížení 5kN, viz Obr. 10. Rozdíly, které dosahují až 60 %, byly dle autora pravděpodobně způsobeny kalibrací Braggových senzorů nebo mechanickými vlastnostmi adherendů a lepidla, jež byly použity v MKP analýze [1].

| Analyzed point | Experimental | 2D plastic | 2D difference (%) | 3D plastic | 3D difference (%) |
|----------------|--------------|------------|-------------------|------------|-------------------|
| A | 0.235 | 0.259 | 10.2 | 0.284 | 20.9 |
| B | 0.189 | 0.247 | 30.6 | 0.270 | 42.9 |
| C | 0.254 | 0.377 | 48.4 | 0.407 | 60.2 |

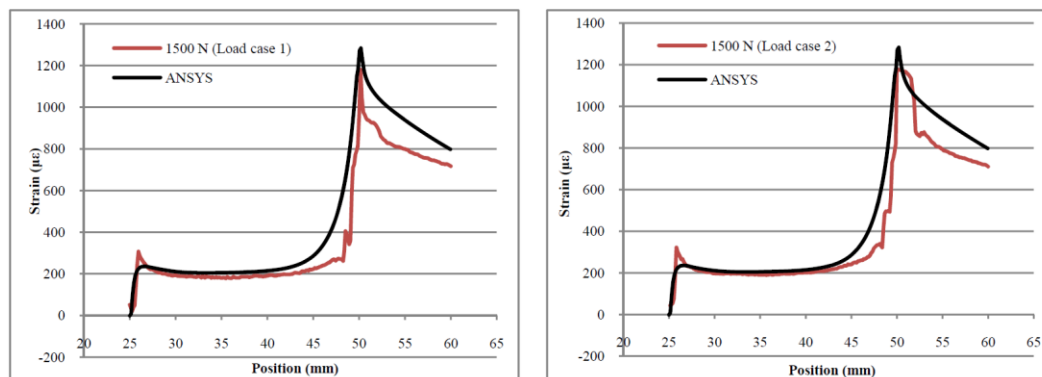
Obr. 10 – Porovnání výsledků experimentu s MKP modelem [1]

V článku [14] byly pro analýzu spoje použita tři různá umístění FBG senzorů: v první vrstvě kompozitu, na rozhraní kompozit/lepidlo a v lepidle. Materiál adherendů byl také CFRP kompozit a lepidlo Araldite 420 A/B. Provedený experiment ukázal, že vložená optická vlákna nemají žádný negativní efekt na mechanické vlastnosti spoje. Vzorky byly následně zatíženy tahovou silou 2 a 4 kN a výsledky tahové zkoušky porovnány s MKP modelem, viz Obr. 11. Numerické modely a experimenty vykazovaly dobrou shodu. FBG senzory umístěné na rozhraní kompozit/lepidlo zachytily maximální gradient deformace, a proto se tato konfigurace ukázala jako optimální [14].



Obr. 11 – Porovnání výsledků experimentu s MKP modelem pro různé umístění FBG (v první vrstvě adherendu, na rozhraní adherend/lepídlo, v lepídle) [14]

V článku [16] byl spoj analyzován pomocí FBG senzoru a poměrné prodloužení podél délky spoje bylo zjištěno pomocí optické reflektometrie ve frekvenční oblasti, která umožňuje měření v libovolné poloze podél FBG senzoru. Byly provedeny tahové zkoušky se zatížením 1500 N a výsledky porovnány s MKP analýzou. Výsledky, znázorněné na Obr. 12, ukázaly dobrou shodu a potvrdila se tak vhodnost použití FBG pro analýzu lepených spojů [16].



Obr. 12 – Porovnání výsledků experimentu s MKP modelem [16]

2.6 Shrnutí řešerše

V řešerši byly teoreticky popsány všechny důležité pojmy a technologie, kterými se tato diplomová práce zabývá. Byla představena technologie lepení a základní charakteristiky lepených spojů, byl popsán základní princip fungování optických vláken a byly představeny dva druhy optovláknových snímačů: FBG snímač a distribuovaný optovláknový snímač. Následně bylo zkoumáno použití FBG snímačů pro analýzu mechanických vlastností lepených spojů v pracích jiných autorů. Z výsledků získaných v těchto pracích a z jejich porovnání s MKP modely vyplývá, že FBG snímače jsou vhodné pro zkoumání mechanických vlastností lepených spojů, neboť výsledky měření a teoretických modelů byly v dobré shodě.

3 Analytické modely lepených spojů

Vzhledem ke své geometrické jednoduchosti a snadné výrobě je jednoduchý lepený překlátovaný spoj nejběžnějším adhezivním spojením v praxi a nejčastěji studovaným v literatuře. Ačkoliv se může zdát, že jeho použití s homogenním lepidlem vede k rovnoměrnému přenosu zatížení, pole napětí v lepidle vykazuje výraznou nerovnoměrnost s lokálními vrcholy napětí na koncích překrytí. Přestože napětí v lepených spojkách může být vypočteno metodou konečných prvků, mají analytické spoje stále zásadní význam a jsou široce využívány [22].

3.1 Goland–Reissnerův model

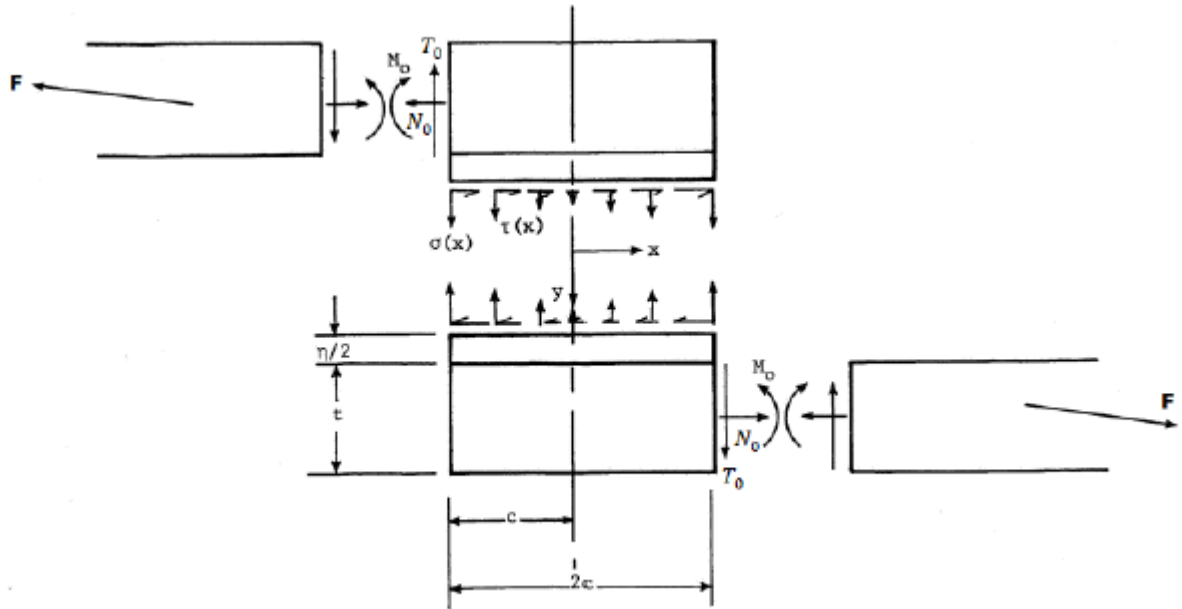
Jako první odvodil analytický model pro jednoduché překlátované spoje Volkersen a na jeho základech začaly vznikat další modely. V této práci byl pro porovnání s experimentálními hodnotami použit model Goland–Reissnerův, jehož rozložení napětí v lepidle je dostatečně přesné, aby bylo možné předpovědět distribuci smykového napětí pro krátký i dlouhý spoj, jak bylo zjištěno v práci [42].

Tento model vychází z poznatků Volkersenovy metody a jako první uvažuje i účinky, které jsou způsobeny excentrickým zatížením jednoduchého překlátovaného spoje. Při tomto zatížení vzniká ohybový moment (M) a posouvající síla (T) na koncích oblastí překlátování, díky kterým se spoj při zatěžování otáčí. S narůstajícím natočením spoje velikost ohybového momentu klesá. Silové účinky na oblast překlátování podle Golanda a Reissnera jsou znázorněny na Obr. 13. Goland a Reissner definovali faktor ohybového momentu (k) a faktor posouvající síly (k'), které vyjadřují vztah mezi zatížením vztaženým na jednotku šířky (\bar{F}) a ohybovým momentem, respektive posouvající silou na koncích překlátování dle vztahů:

$$M_o = k \frac{\bar{F}t}{2}, \quad (12)$$

$$T_o = k' \frac{\bar{F}t}{c}, \quad (13)$$

kde t je tloušťka adherendu a c je polovina délky překlátování. Pokud se spoj neotáčí, jsou oba faktory přibližně rovny 1. S narůstajícím otáčením spoje se faktory zmenšují, čímž se zmenšují i velikosti posouvající síly a ohybového momentu.

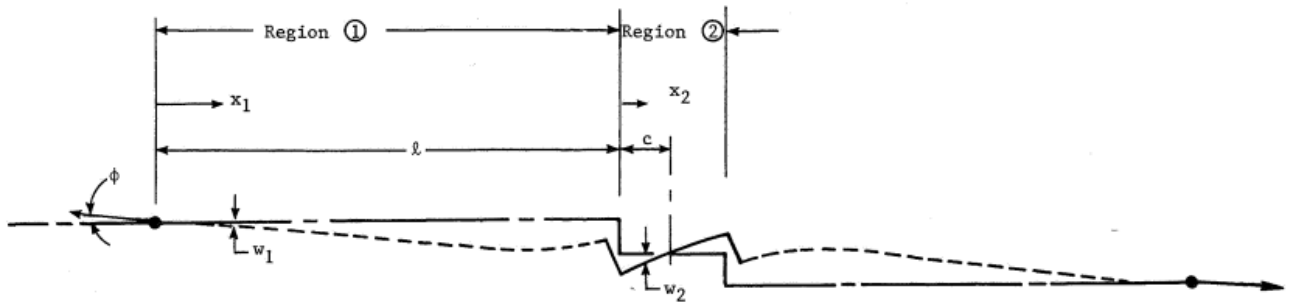


Obr. 13 – Silové účinky v oblasti přelátování [35]

Ohybové momenty pro oblasti 1 a 2 (Obr. 14) se vypočítají jako:

$$M_1 = F \cos(\phi) [x_1 \tan(\phi) - v_1] \quad (0 \leq x_1 \leq l), \quad (14)$$

$$M_2 = F \cos(\phi) \left[(l + x_2) \tan(\phi) - v_2 - \frac{t + t_a}{2} \right] \quad (0 \leq x_2 \leq c). \quad (15)$$



Obr. 14 – Deformace střední čáry adhérendu s vyznačenými oblastmi 1 a 2 [35]

Neboť $\eta \ll t$ a $t \ll l$ rovnice se zjednoduší na:

$$M_1 = F [\phi x_1 - v_1] \quad (0 \leq x_1 \leq l), \quad (16)$$

$$M_2 = F [\phi (l + x_2) - v_2] \quad (0 \leq x_2 \leq c). \quad (17)$$

Posuvy v_1 a v_2 se dají vyjádřit jako:

$$\frac{d^2 v_1}{dx_1^2} = -\frac{M_1}{D_1}, \quad (18)$$

$$\frac{d^2 v_2}{dx_2^2} = -\frac{M_2}{D_2}, \quad (19)$$

kde D_1 a D_2 jsou ohybové tuhosti adherendů, respektive lepidla. Dosazením do rovnic (16) a (17) vzniknou rovnice:

$$\frac{d^2 v_1}{dx_1^2} = -\frac{F}{D_1} [\phi x_1 - v_1] \quad (0 \leq x_1 \leq l), \quad (20)$$

$$\frac{d^2 v_2}{dx_2^2} = -\frac{F}{D_2} \left[\phi(l + x_2) - v_2 - \frac{t}{2} \right] \quad (0 \leq x_2 \leq c). \quad (21)$$

Okrajové podmínky jsou poté:

$$\text{pro } x_1 = 0; \quad v_1 = 0, \quad (22)$$

$$\text{pro } x_1 = l, x_2 = 0; \quad v_1 = v_2,$$

$$\text{pro } x_1 = l, x_2 = 0; \quad \frac{dv_1}{dx_1} = \frac{dv_2}{dx_2},$$

$$\text{pro } x_2 = c; \quad v_2 = 0.$$

Řešení systému rovnic (20) až (22) dává vztahy pro ohybový moment a posouvající sílu na rozhraní mezi adherendům a překlátováním:

$$M_o = k \frac{Ft}{2}, \quad (23)$$

$$T_o = k\bar{F} \left[3(1 - \nu^2) \frac{\bar{F}}{Et} \right]^{1/2}. \quad (24)$$

Faktory k a u_2 , použité v rovnicích (23) a (24), se vypočítají ze vztahů:

$$k = \frac{\cosh(u_2 c)}{\cosh(u_2 c) + 2\sqrt{2} \sinh(u_2 c)}, \quad (25)$$

$$u_2 = \sqrt{\frac{3(1 - \nu^2)}{2} \frac{1}{t} \sqrt{\frac{\bar{F}}{tE}}}. \quad (26)$$

Rovnice rovnováhy pro nekonečně malý element vyjmutý z oblasti přeplátování podle Obr. 15:

$$\frac{dM_U}{dx} - T_U + \tau \frac{t}{2} = 0, \quad (27)$$

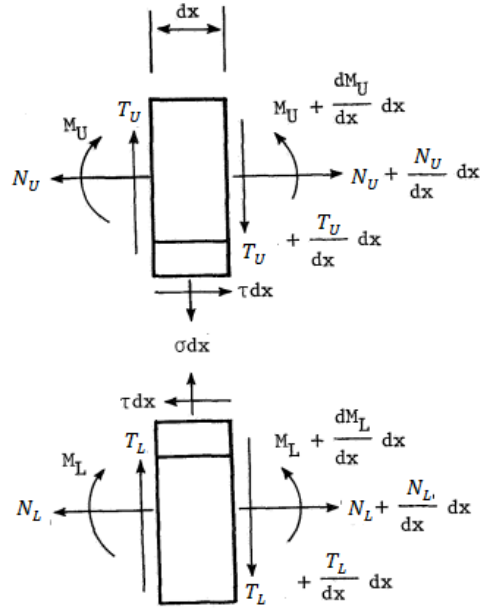
$$\frac{dM_L}{dx} - T_L + \tau \frac{t}{2} = 0, \quad (28)$$

$$\frac{dN_U}{dx} + \tau = 0, \quad (29)$$

$$\frac{dN_L}{dx} - \tau = 0, \quad (30)$$

$$\frac{dT_U}{dx} + \sigma = 0, \quad (31)$$

$$\frac{dT_L}{dx} - \sigma = 0. \quad (32)$$



Obr. 15 – Silové účinky na vyňatý element [35]

Pro vertikální posuvy horního a dolního adherendu, označené v_u a v_l , z teorie tenkých desek platí rovnice:

$$\frac{d^2 v_U}{dx^2} = -\frac{M_U}{D_1}, \quad (33)$$

$$\frac{d^2 v_L}{dx^2} = -\frac{M_L}{D_1}, \quad (34)$$

$$D_1 = \frac{Et^3}{12(1-\nu^2)}, \quad (35)$$

kde E je Youngův modul, ν Poissonova konstanta a D_1 ohybová tuhost adherendů. Pomocí podélných posuvů adherendů na hranicích s lepidlem u_u a u_l lze získat vztahy pro podélné prodloužení adherendů ε_U a ε_L jako:

$$\varepsilon_U = \frac{du_U}{dx} = \frac{1}{E} \left(\frac{N_U}{t} + 6 \frac{M_U}{t^2} \right), \quad (36)$$

$$\varepsilon_L = \frac{du_L}{dx} = \frac{1}{E} \left(\frac{N_L}{t} - 6 \frac{M_L}{t^2} \right). \quad (37)$$

Pomocí Youngova a smykového modul adheziva E_a , respektive G_a vzniknou rovnice:

$$\frac{\tau}{G_a} = \frac{u_L - u_U}{t_a}, \quad (38)$$

$$\frac{\sigma}{E_a} = \frac{v_L - v_U}{t_a}. \quad (39)$$

Po sloučení výše uvedených rovnic vzniknou vztahy:

$$\frac{d^3\tau}{dx^3} - \frac{8G_a}{Et t_a} \frac{d\tau}{dx} = 0, \quad (40)$$

$$\frac{d^4\sigma}{dx^4} + \frac{24(1 - \nu^2)E_a}{Et^3 t_a} \sigma = 0, \quad (41)$$

s okrajovými podmínkami:

$$\text{pro } x = c; \quad M_U = N_U = T_U = 0, \quad (42)$$

$$M_L = -M_o, \quad T_L = T_o, \quad N_l = N_o = \bar{F}.$$

$$\text{Pro } x = -c; \quad M_L = N_L = T_L = 0,$$

$$M_U = M_o, \quad T_U = T_o, \quad N_U = N_o = \bar{F}.$$

Na základě rovnic (40) a (41) spolu s okrajovými podmínkami jsou odvozeny rovnice pro σ a τ v adhezivní vrstvě:

$$\sigma = \frac{1}{\Delta c^2} \bar{F} \left[\left(R_2 \lambda^2 \frac{k}{2} + \lambda k' \cosh(\lambda) \cos(\lambda) \right) \cosh\left(\frac{\lambda x}{c}\right) \cos\left(\frac{\lambda x}{c}\right) + \left(R_1 \lambda^2 \frac{k}{2} + \lambda k' \sinh(\lambda) \sin(\lambda) \right) \sinh\left(\frac{\lambda x}{c}\right) \sin\left(\frac{\lambda x}{c}\right) \right], \quad (43)$$

$$\tau = -\frac{\bar{F}}{8c} \cdot \left[\frac{\beta c}{t} (1 + 3k) \frac{\cosh\left(\frac{\beta x}{t}\right)}{\sinh\left(\frac{\beta c}{t}\right)} + 3(1 - k) \right]. \quad (44)$$

Koeficienty použité v rovnicích (43) a (44) se získají ze vztahů:

$$\lambda = \gamma \frac{c}{t}, \quad (45)$$

$$k = \frac{\cosh(u_2 c)}{\cosh(u_2 c) + 2\sqrt{2} \sinh(u_2 c)}, \quad (46)$$

$$\gamma^4 = 6 \frac{E_a t}{E t_a}, \quad (47)$$

$$\beta^2 = 8 \frac{G_a t}{E t_a}, \quad (48)$$

$$R_1 = \cosh(\lambda) \sin(\lambda) + \sinh(\lambda) \cos(\lambda), \quad (49)$$

$$R_2 = -\cosh(\lambda) \sin(\lambda) + \sinh(\lambda) \cos(\lambda), \quad (50)$$

$$\Delta = \frac{1}{2} (\sin(2\lambda) + \sinh(2\lambda)), \quad (51)$$

$$k' = \frac{kc}{t} \sqrt{3(1-v^2) \frac{\bar{F}}{tE}}. \quad (52)$$

Vybrané vztahy Goland–Reissnerova modelu a jejich použití v této práci bude blíže popsáno v následující kapitole [34, 35, 36, 42].

3.2 Použití Goland–Reissnerova modelu v této práci

Goland–Reissnerův analytický model lepeného spoje bude sloužit pro porovnání výsledků takové zkoušky s analytickými hodnotami, zjištěnými z tohoto modelu. Tento model byl vybrán, neboť se v jeho odvození vyskytují vztahy pro poměrná prodloužení adherendů, která byla měřena během provedené tahové zkoušky. Do modelu se dosadí rozměry a známé vlastnosti spoje a následně budou zjištěny teoretické hodnoty poměrného prodloužení.

Nejprve budou vypočteny hodnoty σ a τ v adhezni vrstvě podle rovnic:

$$\tau = -\frac{\bar{F}}{8c} \cdot \left[\frac{\beta c}{t} (1 + 3k) \frac{\cosh\left(\frac{\beta x}{t}\right)}{\sinh\left(\frac{\beta c}{t}\right)} + 3(1 - k) \right], \quad (53)$$

$$\sigma = \frac{1}{\Delta c^2} \bar{F} \left[\left(R_2 \lambda^2 \frac{k}{2} + \lambda k' \cosh(\lambda) \cos(\lambda) \right) \cosh\left(\frac{\lambda x}{c}\right) \cos\left(\frac{\lambda x}{c}\right) \right. \\ \left. + \left(R_1 \lambda^2 \frac{k}{2} + \lambda k' \sinh(\lambda) \sin(\lambda) \right) \sinh\left(\frac{\lambda x}{c}\right) \sin\left(\frac{\lambda x}{c}\right) \right]. \quad (54)$$

Tyto hodnoty budou následně dosazeny do rovnic:

$$\frac{dM_U}{dx} - T_U + \tau \frac{t}{2} = 0, \quad (55)$$

$$\frac{dM_L}{dx} - T_L + \tau \frac{t}{2} = 0, \quad (56)$$

$$\frac{dN_U}{dx} + \tau = 0, \quad (57)$$

$$\frac{dN_L}{dx} - \tau = 0, \quad (58)$$

$$\frac{dT_U}{dx} + \sigma = 0, \quad (59)$$

$$\frac{dT_L}{dx} - \sigma = 0, \quad (60)$$

ze kterých budou zjištěny hodnoty M_U, N_U, T_U, M_L, N_L a T_L . Tyto hodnoty budou dosazeny do rovnic:

$$\varepsilon_U = \frac{du_U}{dx} = \frac{1}{E} \left(\frac{N_U}{t} + 6 \frac{M_U}{t^2} \right), \quad (61)$$

$$\varepsilon_L = \frac{du_L}{dx} = \frac{1}{E} \left(\frac{N_L}{t} - 6 \frac{M_L}{t^2} \right), \quad (62)$$

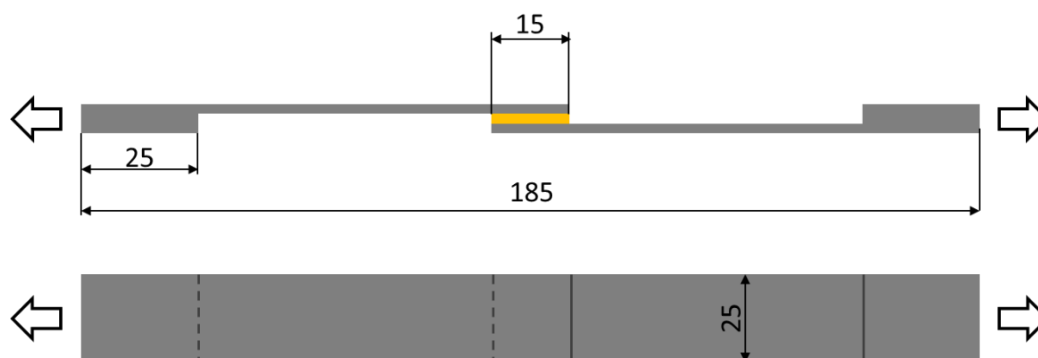
ze kterých bude zjištěno poměrné prodloužení obou adherendů podél celé délky přeplátování.

Následně proběhne porovnání těchto hodnot s výsledky experimentu.

4 Testování vlivu vložených FBG vláken na mechanické vlastnosti spoje

V praktické části této práce byly nejprve otestovány jednoduché přeplátované spoje a jejich mechanické vlastnosti v závislosti na vložených FBG snímačích. Bylo nutné zjistit, jestli mají vložené snímače vliv na pevnost spoje, ať už pozitivní nebo negativní. Tato informace je důležitá pro další zkoumání dané problematiky, neboť pokud by byla vloženými snímači ovlivněna integrita spoje, mělo by to zásadní vliv na výsledky zkoušky.

Experimentální data pro tyto účely byla poskytnuta vedoucím diplomové práce Ing. Milanem Dvořákem, Ph.D. Pro otestování vlivu vložených vláken na mechanické vlastnosti spoje bylo použito šest konfigurací vzorků: bez vlákna (vyroben z desky), bez vlákna (vyroben kusově), jednou OV v podélném směru, jednou OV v příčném směru, dvakrát OV v příčném směru a třikrát OV v podélném směru. Materiálem adherendů byl uhlíkový kompozit s epoxidovou matricí a jako lepidlo pak epoxidové HYSOL EA 9394 2K. Rozměry použitých lepených spojů jsou uvedeny na Obr. 16. Konkrétní příklad použitého lepeného spoje je uveden na Obr. 17.

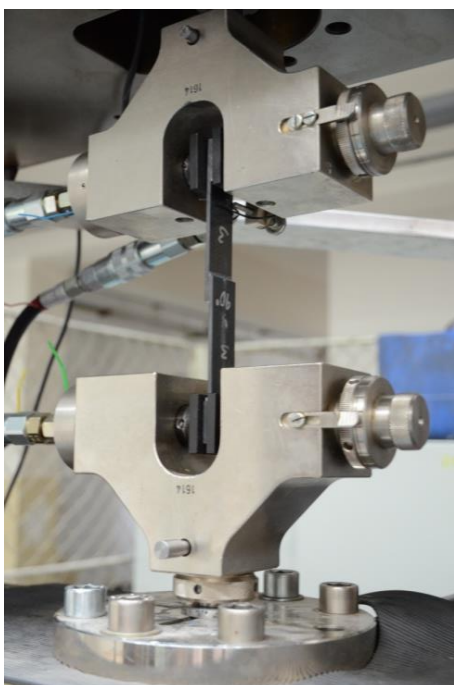


Obr. 16 – Rozměry použitých lepených spojů



Obr. 17 – Vybraný lepený spoj, jenž byl analyzován během zkoušek

Na vzorcích byly provedeny tahové a únavové zkoušky do porušení vzorku. Při tahové zkoušce byl vzorek podroben kvazistatickému zatěžování s posuvem 2 mm/min a byla zaznamenána maximální síla při porušení vzorku (viz Obr. 18). Během únavové zkoušky byl vzorek zatěžován dynamicky s parametrem asymetrie $R = 0,15$ a frekvencí $f = 70 \text{ Hz}$ a byl zaznamenán počet cyklů do poškození vzorku (viz Obr. 19). Následně byly výsledky tahových zkoušek vyhodnoceny pomocí analýzy rozptylu ANOVA.



Obr. 18 – Vzorek během tahové zkoušky



Obr. 19 – Vzorek během únavové zkoušky

Analýza rozptylu je základní metodou pro testování hypotéz o středních hodnotách více než dvou skupin, která využívá srovnání pozorované variability mezi výběry a pozorované variability uvnitř výběrových souborů. Značení používané při analýze rozptylu je uvedeno na Obr. 20. Použití analýzy rozptylu jako parametrické metody je však opět podmíněno určitými předpoklady, jmenovitě normalitou hodnot jednotlivých výběrových souborů a srovnatelným rozptylem v jednotlivých skupinách. Používá se tam, kde se nedá použít T-test, tedy máme-li více než dva vzorky a více než jednu nezávisle proměnnou. Z důvodu zachování úrovně statistické významnosti není vhodné použít více T-testů a testovat vždy dva vzorky proti sobě. Výsledkem analýzy rozptylu je ověření nebo zamítnutí tvrzení, že zvolený parametr všech vzorků je shodný – mezi vzorky nejsou rozdíly [39, 40].

| | Rozsah výběru | Výběrový součet | Výběrový průměr |
|----------------|---------------|--|-------------------------|
| Výběr 1 | n_1 | $Y_1 = \sum_{j=1}^{n_1} Y_{1j}$ | $\bar{y}_1 = Y_1 / n_1$ |
| Výběr 2 | n_2 | $Y_2 = \sum_{j=1}^{n_2} Y_{2j}$ | $\bar{y}_2 = Y_2 / n_2$ |
| : | : | : | : |
| Výběr k | n_k | $Y_k = \sum_{j=1}^{n_k} Y_{kj}$ | $\bar{y}_k = Y_k / n_k$ |
| Všechny výběry | n | $Y = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} Y_{ij}$ | $\bar{y} = Y / n$ |

Obr. 20 – Zavedení značení k analýze rozptylu [39]

Testovou statistikou v analýze rozptylu je statistika F, která má za platnosti nulové hypotézy (H_0) Fisherovo F rozdělení s parametry $k - 1$ a $n - k$. Rovnice pro výpočet testové statistiky F je:

$$F = \frac{\frac{\sum_{i=1}^k n_i (\bar{y}_i - \bar{y})^2}{k - 1}}{\frac{\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} (Y_{ij} - \bar{y}_i)^2}{n - k}} \quad (63)$$

V případě, že neplatí nulová hypotéza, bude číselník statistiky F větší než její jmenovatel a výsledná hodnota statistiky F tak bude větší než 1. Hranici pro zamítnutí nulové hypotézy ale představuje kvantil rozdělení F ($k - 1, n - k$) příslušný zvolené hladině významnosti testu α [39, 40].

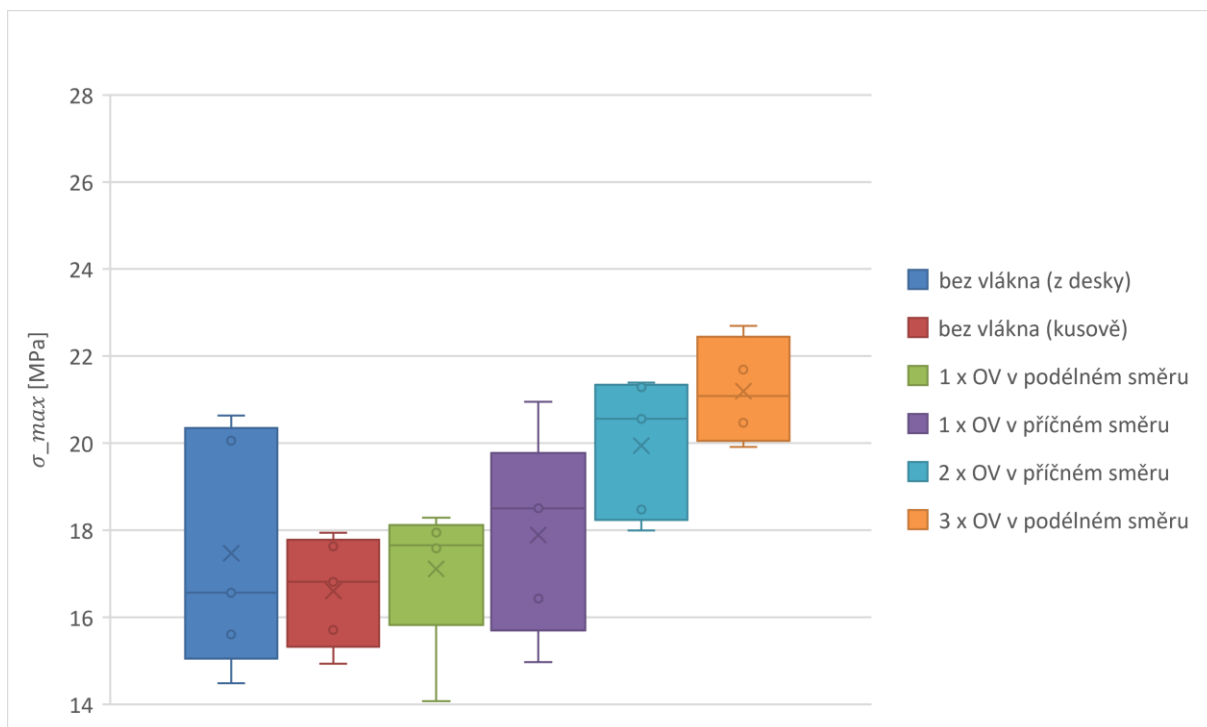
V případě tahových zkoušek bylo testováno 29 vzorků ($n = 29$) rozdělených do 6 skupin ($k = 6$). Naměřené hodnoty σ_{max} z tahových zkoušek pro jednotlivé vzorky jsou uvedeny v Tab. 1. Krabicový graf pro hodnoty σ_{max} je poté na Obr. 21.

Tab. 1 – Naměřené hodnoty σ_{max} jednotlivých vzorků v MPa

| σ_{max} [MPa] | vzorek 1 | vzorek 2 | vzorek 3 | vzorek 4 | vzorek 5 | průměrná hodnota |
|------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|------------------|
| bez vlákna (z desky) | 15,612 | 14,490 | 16,567 | 20,061 | 20,636 | 17,473 |
| bez vlákna (kusově) | 17,942 | 14,934 | 15,713 | 17,629 | 16,816 | 16,607 |
| 1x OV v podélném směru | 17,659 | 14,075 | 17,583 | 17,951 | 18,286 | 17,111 |
| 1x OV v příčném směru | 18,600 | 16,430 | 20,954 | 18,505 | 14,970 | 17,892 |
| 2x OV v příčném směru | 17,996 | 21,288 | 18,474 | 21,395 | 20,561 | 19,943 |
| 3x OV v podélném směru | 20,473 | 21,693 | 22,691 | 19,913 | | 21,193 |

Nulová hypotéza H_0 je v tomto případě definována jako: Optická vlákna vložená do spoje nemají vliv na mechanické vlastnosti lepeného spoje. Z naměřených hodnot se podle rovnice (63) vypočte testová statistika F a porovná se s tabulkovou hodnotou pro hladinu významnosti $\alpha = 0,05$. V tomto případě je testová statistika $F = 3,96$ a tabulková hodnota $F_{krit} = 2,64$.

Jelikož je $F > F_{krit}$, nulová hypotéza je zamítnuta. Z toho vyplývá, že optická vlákna vložená do lepeného spoje mají vliv na jeho mechanické vlastnosti při tahové zkoušce. Při pohledu na průměrné hodnoty σ_{max} lze sledovat trend zvyšující se hodnoty pevnosti v tahu s rostoucím počtem vložených vláken.



Obr. 21 – Krabicový graf pro σ_{max} vzorků při tahové zkoušce

V případě únavových zkoušek bylo testováno 33 vzorků ($n = 33$) rozdělených do šesti skupin ($k = 6$). Byly sledovány tři veličiny: σ_h , σ_d a počet cyklů N . Postup vyhodnocení výsledků byl stejný jako v předchozím případě. Naměřené hodnoty sledovaných veličin pro jednotlivé vzorky jsou uvedeny v Tab. 2, Tab. 3 a Tab. 4. Krabicové grafy pro jednotlivé měřené veličiny jsou uvedeny na Obr. 22, Obr. 23 a Obr. 24.

Tab. 2 – Naměřené hodnoty σ_h jednotlivých vzorků v MPa

| σ_h [MPa] | vzorek 1 | vzorek 2 | vzorek 3 | vzorek 4 | vzorek 5 | vzorek 6 | vzorek 7 | průměr |
|------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|--------|
| bez vlákna (z desky) | 8,86 | 8,71 | 8,82 | 8,76 | 8,82 | | | 8,80 |
| bez vlákna (kusově) | 8,25 | 8,30 | 8,00 | 7,76 | 8,15 | | | 8,09 |
| 1x OV v podélném směru | 8,52 | 8,41 | 8,41 | 8,41 | 8,57 | | | 8,46 |
| 1x OV v příčném směru | 8,71 | 8,71 | 8,92 | 8,71 | 8,80 | 8,80 | 8,76 | 8,77 |
| 2x OV v příčném směru | 8,67 | 8,80 | 8,74 | 8,80 | 8,86 | | | 8,77 |
| 3x OV v podélném směru | 8,76 | 8,63 | 8,68 | 8,74 | 8,80 | 8,68 | | 8,72 |

Tab. 3 – Naměřené hodnoty σ_d jednotlivých vzorků v MPa

| σ_d [MPa] | vzorek 1 | vzorek 2 | vzorek 3 | vzorek 4 | vzorek 5 | vzorek 6 | vzorek 7 | průměr |
|------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|--------|
| bez vlákna (z desky) | 1,34 | 1,32 | 1,34 | 1,33 | 1,34 | | | 1,33 |
| bez vlákna (kusově) | 1,25 | 1,26 | 1,21 | 1,18 | 1,23 | | | 1,23 |
| 1x OV v podélném směru | 1,29 | 1,27 | 1,27 | 1,27 | 1,30 | | | 1,28 |
| 1x OV v příčném směru | 1,32 | 1,32 | 1,35 | 1,32 | 1,33 | 1,33 | 1,33 | 1,33 |
| 2x OV v příčném směru | 1,31 | 1,33 | 1,32 | 1,33 | 1,34 | | | 1,33 |
| 3x OV v podélném směru | 1,33 | 1,31 | 1,32 | 1,32 | 1,33 | 1,32 | | 1,32 |

Tab. 4 – Počet cyklů N jednotlivých vzorků

| počet cyklů N [-] | vzorek 1 | vzorek 2 | vzorek 3 | vzorek 4 | vzorek 5 | vzorek 6 | vzorek 7 | průměr |
|------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|--------|
| bez vlákna (z desky) | 294907 | 257906 | 220517 | 430064 | 686729 | | | 378025 |
| bez vlákna (kusově) | 151820 | 95814 | 184225 | 93928 | 67190 | | | 118595 |
| 1x OV v podélném směru | 998184 | 534888 | 370553 | 415921 | 289145 | | | 521738 |
| 1x OV v příčném směru | 299122 | 343942 | 263021 | 503233 | 479084 | 33247 | 58209 | 282837 |
| 2x OV v příčném směru | 510798 | 1063753 | 497098 | 364204 | 428437 | | | 572858 |
| 3x OV v podélném směru | 878958 | 607397 | 809927 | 1005917 | 1166419 | 434359 | | 817163 |

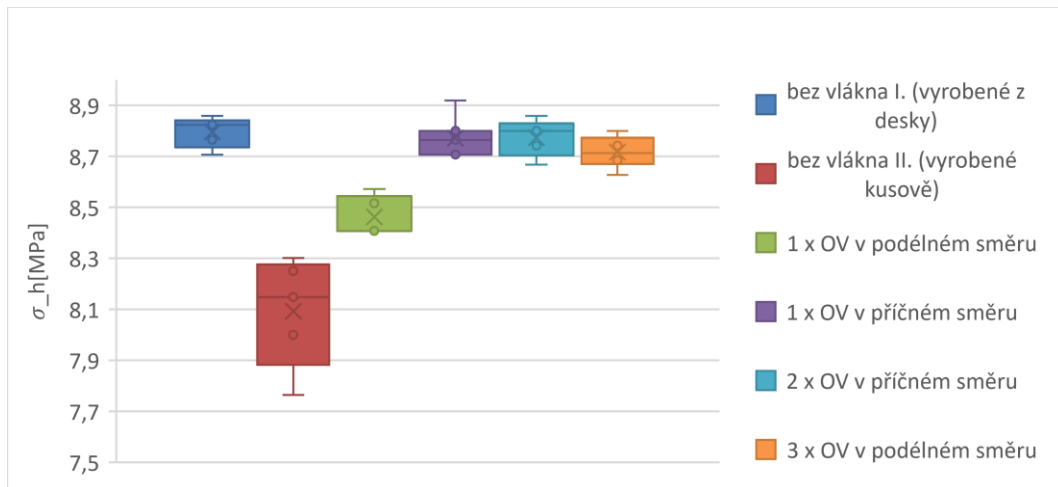
Nulová hypotéza zůstává stejná jako v předchozím případě, stejně tak vzorec pro výpočet testové statistiky. Tabulková hodnota F_{krit} je pro hladinu významnosti $\alpha = 0,05$ a daný počet vzorků $F_{krit} = 2,57$. Vyhodnocení analýz rozptylu pro sledované veličiny je uvedeno v Tab. 5.

Tab. 5 – Vyhodnocení analýz rozptylu při únavové zkoušce

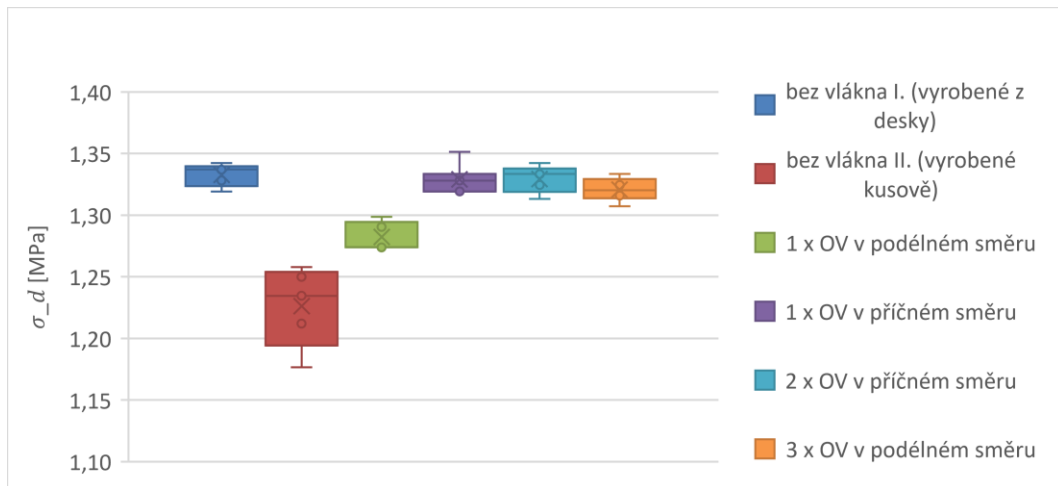
| testovaná veličina | F | F_{krit} | $F > F_{krit}$ |
|--------------------|-------|------------|----------------|
| σ_h | 35,72 | 2,57 | ANO |
| σ_d | 35,72 | 2,57 | ANO |
| počet cyklů N | 6,77 | 2,57 | ANO |

Ve všech případech je $F > F_{krit}$. Nulová hypotéza je tedy zamítnuta, z čehož vyplývá, že optická vlákna vložená do lepeného spoje mají vliv na jeho mechanické vlastnosti při únavové zkoušce. Se zvyšujícím se počtem vláken roste i počet cyklů, které daný spoj vydržel.

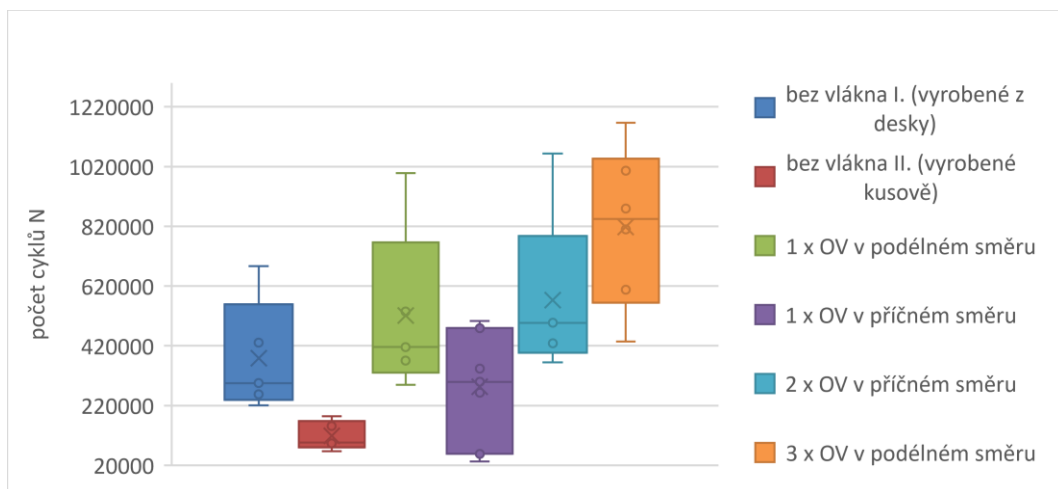
Při únavových i tahových zkouškách se tedy s rostoucím počtem vláken vložených do spoje zlepšovaly jeho mechanické vlastnosti. Tato skutečnost je pravděpodobně zapříčiněna tím, že se vlákna ve spoji chovala jako distanční podložky a vymezila tak optimální tloušťku lepidla, která je při lepení epoxidovým lepidlem 0,2 mm. Jak při tahových, tak při únavových zkouškách se neprokázal negativní vliv vložených vláken na kvalitu spoje, čímž se potvrdila možnost použití FBG snímačů vložených přímo do spoje.



Obr. 22 – Krabicový graf pro σ_h vzorků při únavové zkoušce



Obr. 23 – Krabicový graf pro σ_d vzorků při únavové zkoušce



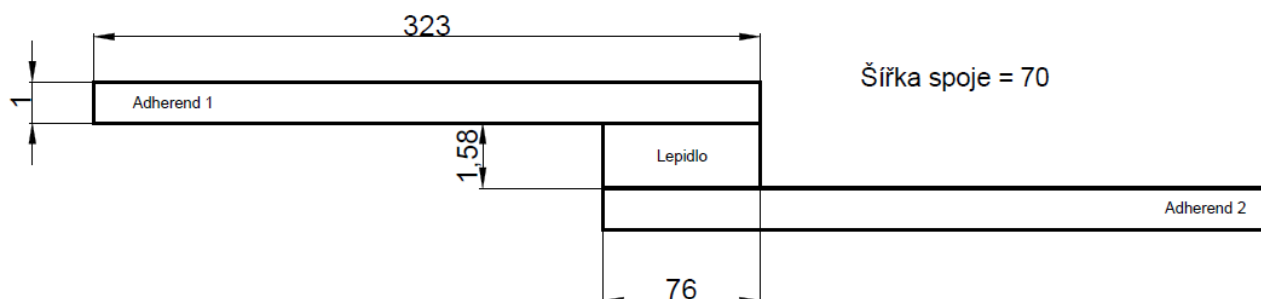
Obr. 24 – Krabicový graf pro počet cyklů N vzorků při únavové zkoušce

5 Tahová zkouška lepeného spoje

V této části diplomové práce je popsán průběh tahové zkoušky lepeného spoje, která byla provedena z toho důvodu, aby vyhodnotila vhodnost použití optovláknových snímačů deformace při testování mechanických vlastností lepených spojů. Jeden distribuovaný optovláknový senzor s tloušťkou vlákna $155 \mu\text{m}$ a dva FBG snímače s tloušťkou vlákna $250 \mu\text{m}$ byly vloženy přímo na povrch adherendu uvnitř oblasti překlátování. Na zadní stranu jednoho z adherendů byly dále umístěny tři odporové tenzometry pro měření technikou backface. Tato technika je blíže představena například v práci [46]. Výsledný spoj byl zatěžován tahovou silou a naměřené hodnoty následně porovnány s analytickým modelem lepeného spoje a MKP modelem.

5.1 Příprava vzorku

Lepený spoj, kterým jsem se ve své práci zabýval, je znázorněn na Obr. 25. Rozměry jsou uvedeny v milimetrech a nejsou kvůli přehlednosti v odpovídajícím měřítku (tloušťky lepidla a adherendů jsou 20x zvětšeny).



Obr. 25 – Geometrie lepeného spoje

Lepený spoj byl vyroben z ocelového plechu o tloušťce 1 mm a šířce 70 mm. Nejprve byly pomocí opakované aplikace ethanolu a setření papírovými ubrousky odstraněny nejhrubší nečistoty a mastnota. Po základním odstranění nečistot byl plech rozpůlen na dvě přibližně stejné části, jak lze vidět na Obr. 26.



Obr. 26 – Plechy, jež byly použity pro výrobu lepeného spoje

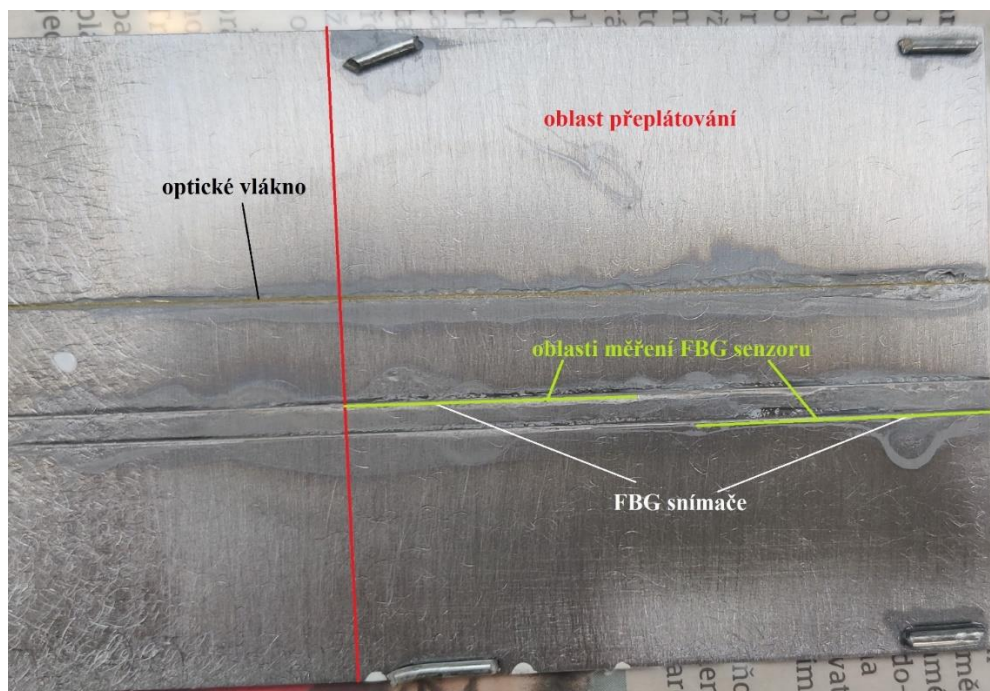
Poté bylo nutné vzorek vyčistit od všech nečistot, neboť lepicí proces vyžaduje dokonale čistý povrch, jinak by spoj neměl požadované vlastnosti. Jako první byl použit znovu ethanol a pro dokonalé očištění následně aceton. Jelikož i po několika aplikacích acetonu a jeho setřetí se na ubrousku vyskytovaly nečistoty a ani test smáčivosti nebyl úspěšný, bylo nutné přejít k přebroušení povrchů, které na sebe budou doléhat ve výsledném lepeném spoji. K přebroušení byl použit brusný papír s hrubostí 100 a směr broušení byl kolmo k síle, která bude na spoj působit, jak je vidět na Obr. 27.



Obr. 27 – Adherendy po broušení

Následně přišlo na řadu další odmašťování a čištění styčných ploch pomocí isopropylalkoholu. Nejprve přibližně od poloviny plechu směrem ke styčné ploše a postupně byla zkracována oblast čištění, dokud nebyl povrch na styčných plochách dokonale čistý. Po vyčištění byly optovláknové snímače upevněny na jeden z adherendů, aby se předešlo jejich možnému pohybu při lepicím procesu. Pro tento účel bylo použito lepidlo Kyowa CC-33A, které bylo následně vytvrzeno.

Do spoje byly umístěny dva FBG snímače a jeden distribuovaný optovláknový snímač, jak je znázorněno na Obr. 28. Měřicí Braggovy mřížky byly umístěny na kraje spoje, jedna vlevo, druhá vpravo. Jelikož je Braggova mřížka umístěna v oblasti optického vlákna o šířce 30 mm, bylo očekáváno, že měření proběhne 15 mm od obou okrajů spoje.



Obr. 28 – Rozmístění FBG snímačů a distribuovaného optovláknového snímače v lepeném spoji

Po nalepení všech potřebných vláken přišlo na řadu lepení distančních drátků s průměrem 1,58 mm, které zajistily stejnou tloušťku lepidla po celém lepeném spoji, jak lze vidět na Obr. 28. Drátky byly umístěny do rohů spoje a přilepeny stejným lepidlem jako optovláknové snímače. Dalším krokem bylo samotné lepení. Lepidlo bylo nanášeno na obě strany spoje v přibližně stejné vrstvě a následně byly oba adherendy co nejpřesněji přiloženy k sobě a přitisknuty, než lepidlo dosáhlo manipulační pevnosti. Přebytné lepidlo bylo následně otřeno a přidáno po okrajích spoje, kde by mohly vzniknout mezery.



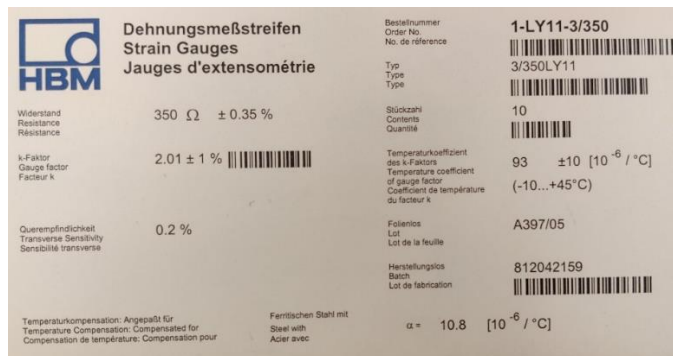
Obr. 29 – Zatížený spoj po slepení

Spoj byl zatížen, jak lze vidět na Obr. 29, a ponechán čtyři dny bez přesouvání, aby nedošlo k narušení vytvrzujícího procesu. Následně byl vytvrzen za tepla při 50 °C po dobu 16 hodin podle datasheetu použitého lepidla. Detail lepeného spoje po vytvrzení je uveden na Obr. 30.



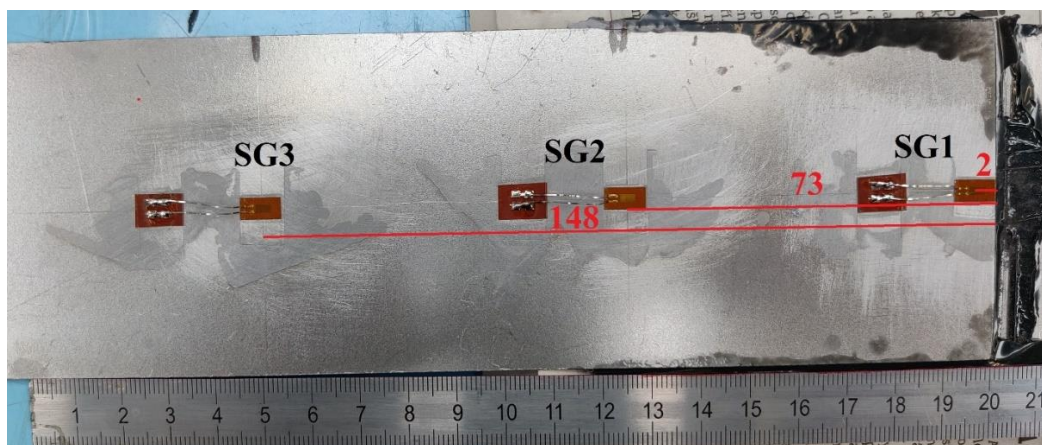
Obr. 30 – Detail lepeného spoje po vytvrzení

Jako další krok byly na zadní stranu jednoho z adherendů na předem připravená místa aplikovány odporové tenzometry. Byla zvolena tři umístění tenzometrů, na začátku lepeného spoje, na konci lepeného spoje a mimo lepený spoj. Konkrétně byly použity tenzometry s odporem $350\Omega \pm 0,35\%$, k-faktorem $2,01 \pm 1\%$ a příčnou citlivostí 0,2 %. Označení a další vlastnosti tenzometrů jsou uvedeny na Obr. 31.



Obr. 31 – Specifikace použitých tenzometrů

Jako první krok aplikace tenzometrů bylo nutné adherend očistit od všech nečistot pomocí opakované aplikace isopropylalkoholu a následným setřením ubrouskem. Po hrubém očištění následovalo broušení plošek adherendu, na které měly být nalepeny tenzometry, brusným papírem s hrubostí 100. Po broušení bylo nutné vybroušená místa dokonale očistit, neboť sebemenší nečistoty by způsobily špatné nalepení tenzometrů. Tenzometry byly poté přilepeny k lepicí pásce a umístěny na vhodné místo na adherendu. Lepicí páska byla na jedné straně odlepena a pod tenzometr umístěna kapka lepidla Kyowa CC-33A. Tenzometr byl na adherend přitlačen stálým tlakem po dobu přibližně minuty přes teflonovou fólii. Dále bylo nutné na adherend do vhodné vzdálenosti od tenzometrů nalepit pájecí body pro styk tenzometrů a kabeláže. Pájecí body byly nalepeny stejným způsobem jako předtím tenzometry. Tenzometry a pájecí body byly k sobě připájeny pájkou a multimetrem bylo změřeno, zda mají tenzometry požadovaný odpor. Na všech třech tenzometrech byla naměřena požadovaná hodnota 350 Ω, proto se mohlo přistoupit k pájení tenzometru a pájecích bodů.



Obr. 32 – Rozmístění tenzometrů na jednom z adherendů

Tenzometry byly umístěny do osy adherendu na jeho zadní stranu. Konkrétní vzdálenosti, do kterých byly tenzometry nalepeny jsou znázorněny na Obr. 32.

5.2 Použité lepidlo

Pro lepení lepeného spoje bylo použito lepidlo Spabond 345 fast black hardener od firmy Gurit, jehož datasheet je přiložen jako příloha. Pro analýzu lepeného spoje pomocí metody konečných prvků a analytických modelů je nutné zjistit materiálové charakteristiky adheziva. Pro tyto účely byly analyzovány práce, které tyto charakteristiky uvádí. Dané charakteristiky jsou uvedeny v Tab. 6.

Tab. 6 – Materiálové charakteristiky lepidla Spabond Gurit 345

| | E [MPa] | G [MPa] | ν [-] | Tau [MPa] |
|---|---------|---------|-----------|-----------|
| M. Liu, M. Dawood [43] | 2260 | – | – | 25,1 |
| D. Schnerch, M. Dawood, S. Rizkalla, E. Sumner [41] | 3007 | – | 0,38 | 37 |
| B. Zheng, M. Dawood [44] | 2260 | – | – | 34 |
| M. U. Sahin [45] | 2260 | – | – | 34 |

Z těchto hodnot byly pro další použití v analytickém a MKP modelu vybrány hodnoty Youngova modulu $E = 2260 \text{ MPa}$ a Poissonova čísla $\nu = 0,38$.

5.3 Tahová zkouška vzorku

Smyková pevnost lepidla je pro vytvrzení při 50 °C podle datasheetu od společnosti Gurit $\tau_{max} = 37 \text{ MPa}$, z čehož byla zjištěna maximální zatěžující síla F_{max} , která může být použita při tahové zkoušce podle vzorce:

$$F_{max} = \tau_{max} \cdot A, \quad (64)$$

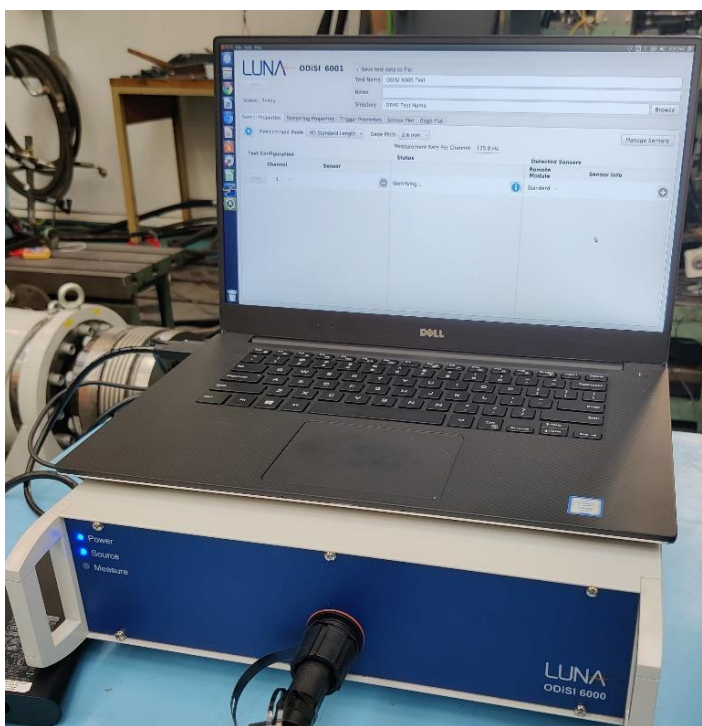
kde A je plocha průřezu spoje, vypočítaná podle vzorce:

$$A = b \cdot l. \quad (65)$$

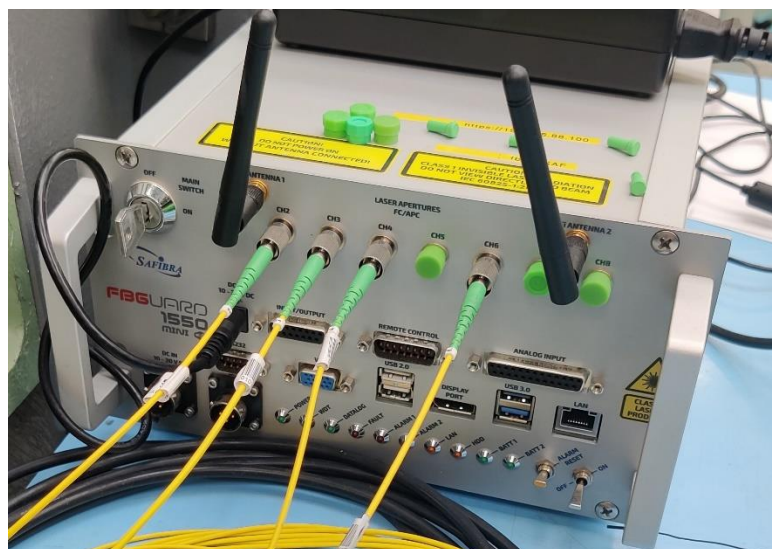
Jelikož je šířka spoje $b = 70 \text{ mm}$ a délka $l = 76 \text{ mm}$, je maximální zatěžující síla $F_{max} = 196,84 \text{ kN}$. Lepený spoj byl umístěn do zatěžovacího stroje TIRAtest 2300 a bylo provedeno základní seřízení stroje a vzorku. Čelisti zatěžovacího stroje byly nastaveny na 1 mm a vzorek byl umístěn přesně doprostřed čelistí (Obr. 33). Všechny kabely byly připojeny do svých ústředěn, distribuovaný optovláknový snímač do přístroje LUNA ODISI 6000 (Obr. 34) a optovláknové snímače s FBG mřížkou do snímače FBGUARD 1550 (Obr. 35). Data z tenzometrů byla zaznamenávána softwarem catmanAP. Počáteční hodnoty, které byly měřeny před začátkem zatěžování, byly na všech přístrojích vynulovány.



Obr. 33 – Zkušební vzorek s lepeným spojem umístěný v testovacím stroji



Obr. 34 – Ústředna měřicího systému LUNA ODiSI



Obr. 35 – Měřicí systém FBGUARD 1550

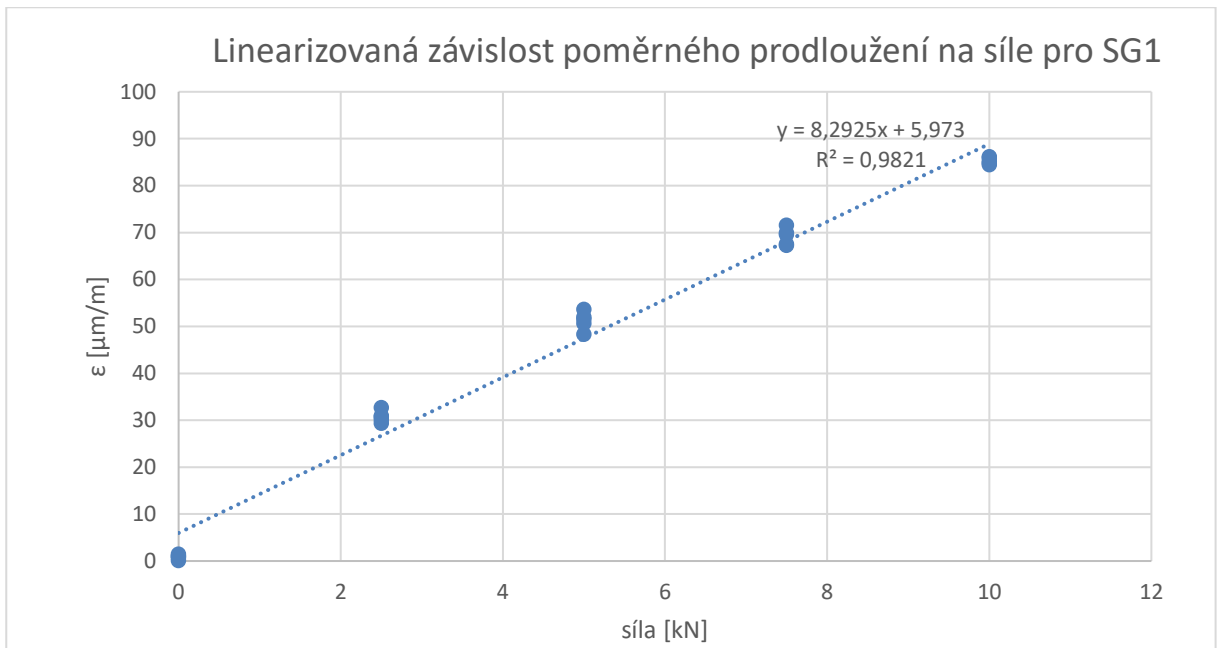
Zatěžovací stroj byl ovládán v polohovém řízení a měření probíhalo celkem v šesti cyklech. V prvním cyklu byl vzorek zatěžován postupně na 3 kN, 5 kN a 10 kN s následným odlehčením na 0 kN. Po prvním zatěžování ukazovaly tenzometry zbytkové poměrné deformace, které byly při pozdějším zpracování výsledků odečteny od následujících měření, aby byly vynulovány. Tento jev je u tenzometrů běžný a po prvním zatěžování už se tenzometry chovají lineárně. Při následujících pěti cyklech byl vzorek zatěžován v cyklu 0 – 2,5 – 5 – 7,5 – 10 – 0 kN, což znamená, že bylo zatěžování každých 2,5 kN pozastaveno, aby došlo k ustálení měřených hodnot. Po těchto šesti cyklech bylo testování ukončeno a výsledná data uložena.

6 Výsledky experimentů a teoretických modelů

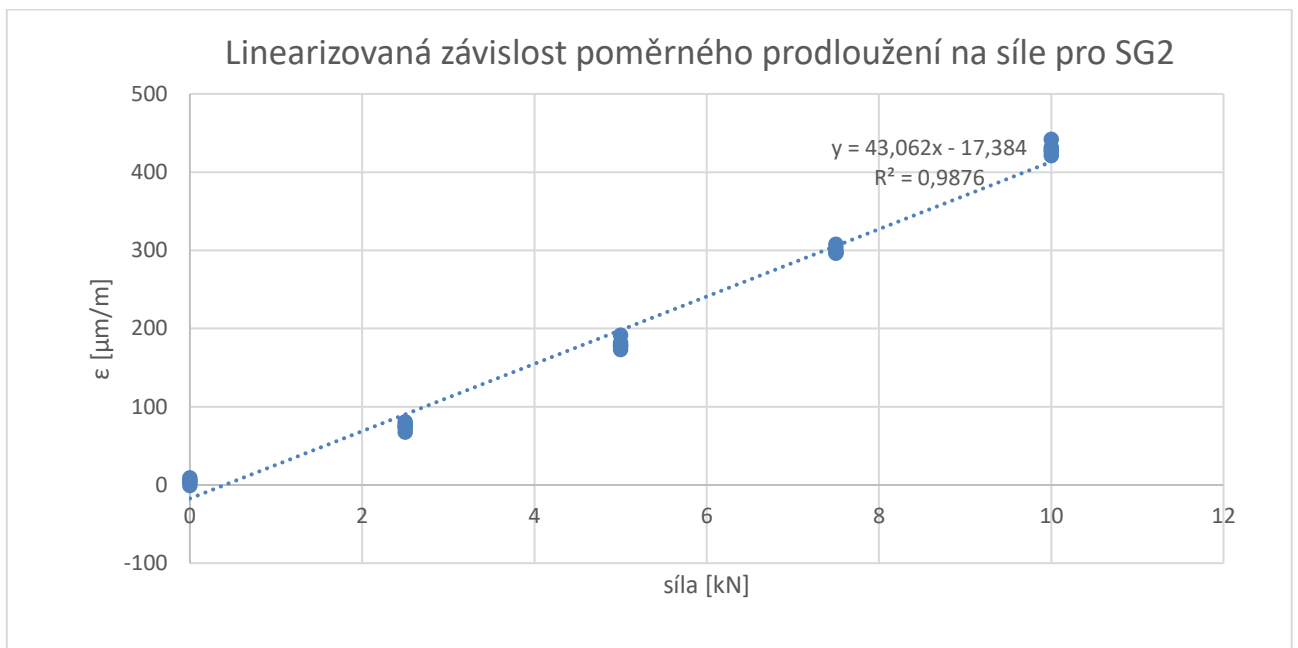
V této části diplomové práce budou uvedeny hodnoty, které byly naměřeny při experimentu, a jejich porovnání s teoretickými hodnotami, jež byly získány prostřednictvím analytického modelu a MKP modelu. Nejprve bylo nutné zpracovat naměřené hodnoty, konkrétně správně seřadit data získaná měřicími přístroji a přiřadit naměřené hodnoty síly k naměřeným hodnotám poměrného prodloužení z FBG snímačů a distribuovaného optovláknového snímače, neboť ve výstupech z měření byla síla zaznamenána pouze v datech z tenzometrů. Následně byly vykresleny grafy závislosti poměrného prodloužení na čase a poměrného prodloužení na zatěžující síle, které jsou přiloženy na konci práce v přílohách. Byl také vytvořen graf závislosti poměrného prodloužení na síle pro všechny snímače, jenž byl sestaven nalezením hodnot poměrného prodloužení během druhého až šestého zatěžovacího cyklu pro všechny snímače při silách, na kterých bylo provedeno ustálení hodnot (0 – 2,5 – 5 – 7,5 – 10 kN). Výsledné body byly proloženy lineární spojnicí trendu a tím bylo dosaženo zahrnutí všech zatěžujících cyklů do výsledné závislosti. Tato závislost následně sloužila k porovnání výsledků experimentu s teoretickými výsledky z MKP analýzy a analytického modelu.

6.1 Výsledky měření pomocí odporových tenzometrů

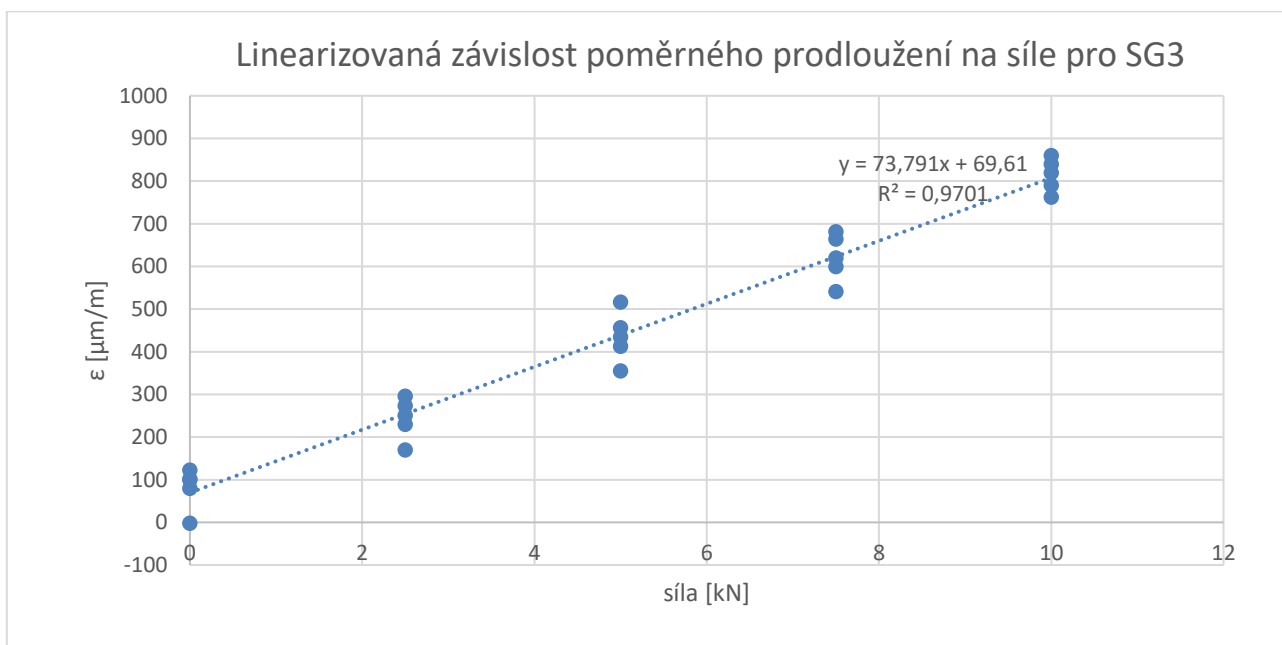
Odporové tenzometry byly umístěny na zadní stranu adherendu, na kterém nebyly umístěny optovláknové snímače – měřily tedy technikou backface. Pro všechny tři tenzometry byl proveden postup uvedený výše, konkrétně vykreslení grafů, jež jsou uvedeny na konci práce v přílohách. Na těchto grafech je možné sledovat, že tenzometry, které byly umístěny dále od neutrální osy vzorku, neměří lineárně, z čehož vyplývá, že měří prodloužení i ohyb. Dalším krokem bylo odečtení hodnot pro dané síly pro všechny zatěžovací cykly. Z těchto hodnot byly získány grafy závislosti poměrného prodloužení na síle pro každý tenzometr, jež jsou znázorněny na Obr. 36, Obr. 37 a Obr. 38.



Obr. 36 – Linearizovaná závislost poměrného prodloužení na síle pro SG1



Obr. 37 – Linearizovaná závislost poměrného prodloužení na síle pro SG2



Obr. 38 – Linearizovaná závislost poměrného prodloužení na síle pro SG3

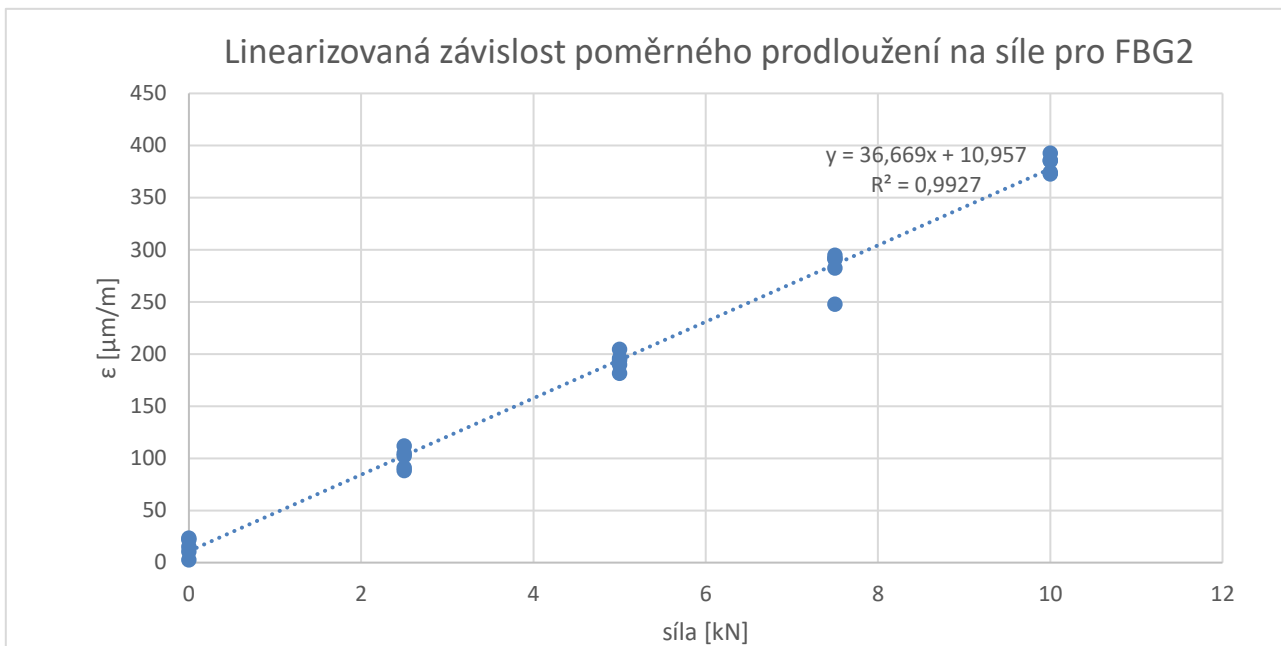
Z dat z tenzometru SG1 je patrné, že na začátku lepeného spoje je adherend namáhán výrazně méně než na konci spoje. Nejvyšší poměrné prodloužení poté dle očekávání naměřil tenzometr SG3, který je umístěn mimo lepený spoj.

Jelikož se tenzometr SG3 nachází mimo lepený spoj, lze z jeho dat teoreticky získat přesný Youngův modul použitých adherendů. Youngův modul adherendů z dat na tenzometru SG3 vyšel $E = 150011 \text{ MPa}$, což neodpovídá teoretickému Youngovu modulu pro ocel. Tato skutečnost může být zapříčiněna špatným nalepením tenzometru, což je ale díky linearitě jeho měření nepravděpodobné. Pravděpodobnější důvod je větší vliv ohybu vzorku při zkoušce, než bylo původně očekáváno. Při příštím podobném měření by bylo vhodné použít v jednom místě dva tenzometry zapojené do půlmůstku.

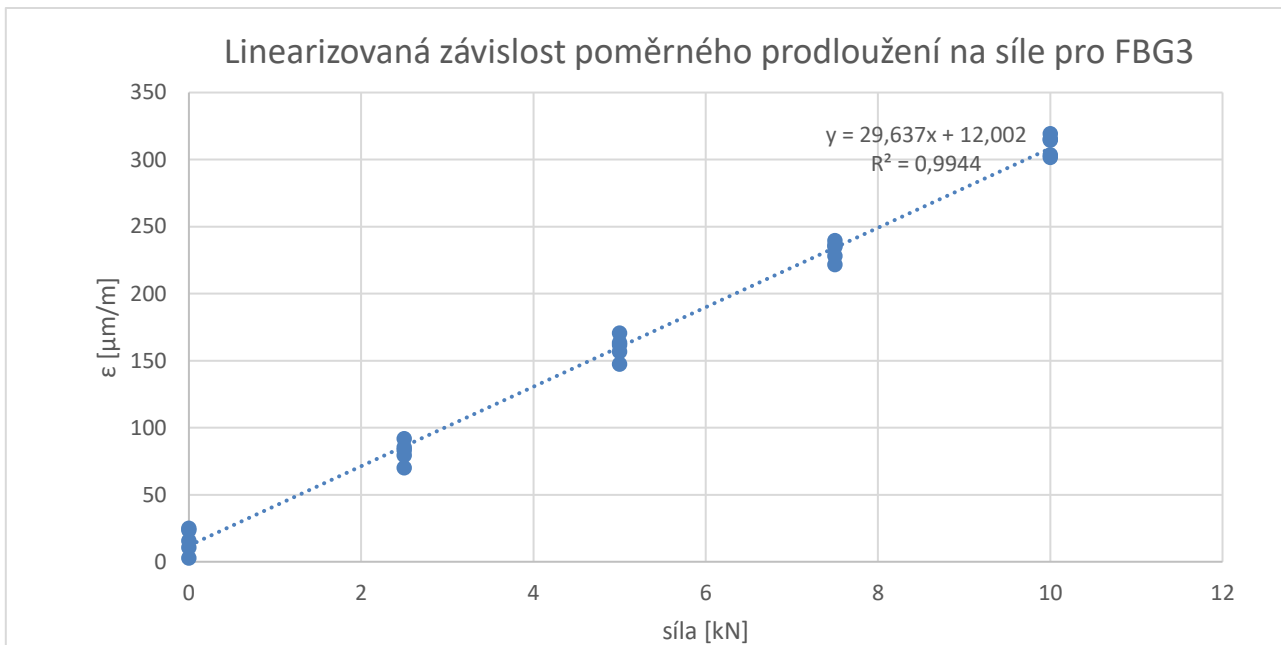
6.2 Výsledky měření pomocí FBG snímačů

Naměřené hodnoty ze dvou FBG snímačů, které byly umístěny v lepeném spoji, se nejprve musely přiřadit k odpovídajícím hodnotám naměřeným na tenzometrech, neboť bylo nutné znát zatěžující sílu pro každý měřený okamžik, aby se dala vykreslit závislost poměrného prodloužení na síle a následně se tato závislost dala linearizovat. Z tohoto důvodu byl v datech z FBG snímačů nalezen bod, kde začaly hodnoty poměrné deformace růst – ten byl označen jako začátek zatěžování. Poté mohly být hodnoty zatěžující síly přiřazeny k hodnotám poměrného prodloužení, jež byly naměřeny pomocí FBG snímačů. Následně byl proveden stejný postup jako u zpracování

dat z tenzometrů – tedy vykreslení grafů, které jsou uvedeny v přílohách, a linearizace hodnot pro konkrétní síly z druhého až šestého zatěžovacího cyklu. Grafy po linearizaci jsou vidět na Obr. 39 a Obr. 40.



Obr. 39 – Linearizovaná závislost poměrného prodloužení na síle pro FBG2

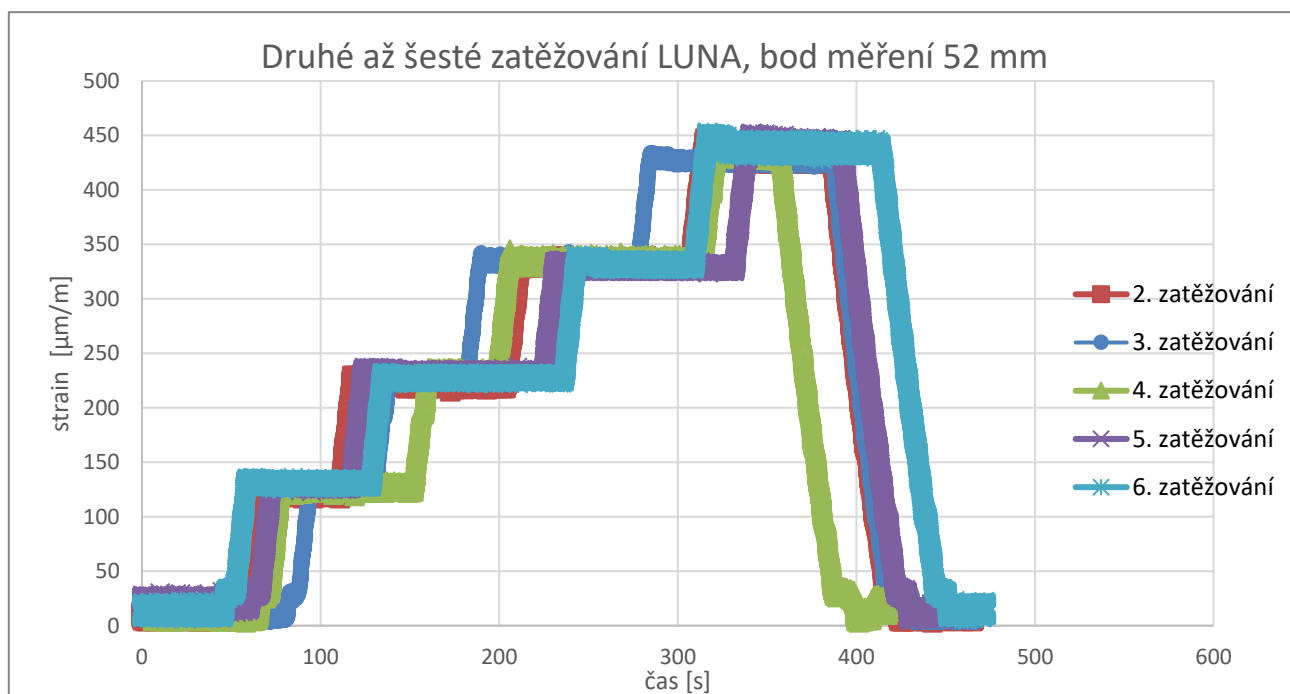


Obr. 40 – Linearizovaná závislost poměrného prodloužení na síle pro FBG3

Z grafů lze vidět, že na obou snímačích byly naměřeny řádově podobné hodnoty s tím, že hodnoty naměřené snímačem FBG2, který je umístěn 15 mm od horní hrany spoje, jsou o 22 % vyšší než hodnoty naměřené snímačem FBG3, jenž byl umístěn 61 mm od horní hrany spoje.

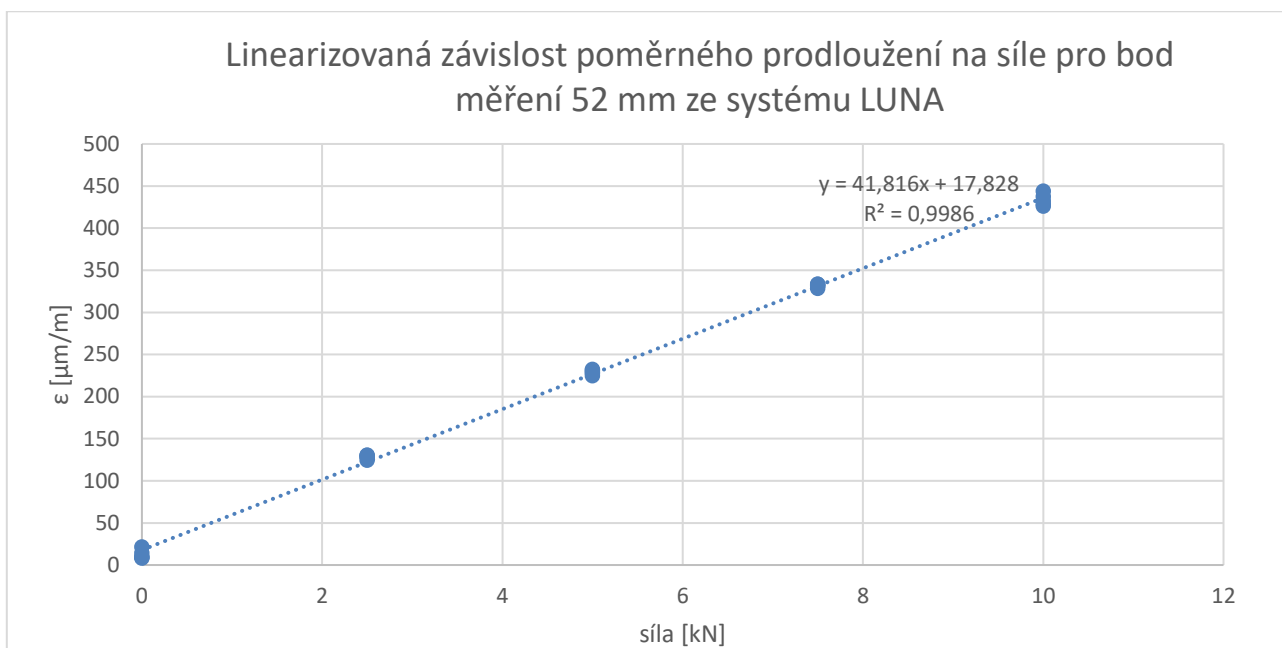
6.3 Výsledky měření pomocí distribuovaného optovláknového snímače

Distribuovaný optovláknový snímač a systém LUNA měřil poměrné prodloužení po celé délce spoje. Data z jednotlivých měřících bodů ale nebyla ve většině případů kompletní a bylo v nich zaznamenáno měření jen v části časových okamžiků. Tato chyba je u měření touto metodou poměrně častá a je způsobena nespojitou napjatostí po délce vlákna. Pokud se při zatěžování začne vlákno deformovat jinak než tahově, dochází k rušení a chybnému měření. Přesto se na optické trase, která byla přímo v lepeném spoji, našly čtyři body, kde byla data kompletní během celého zatěžování. Pro bližší analýzu byl vybrán měřící bod ve vzdálenosti 52 mm od horní hrany spoje. Pro tento senzor byly vytvořeny grafy závislosti poměrného prodloužení na čase, které jsou uvedeny v přílohách. Jako další krok byl vytvořen graf závislosti poměrného prodloužení na čase pro druhé až šesté zatěžování, jenž je uveden na Obr. 41.



Obr. 41 – Graf závislosti poměrného prodloužení na čase pro druhé až šesté zatěžování pro systém LUNA

Z tohoto grafu byly zjištěny okamžiky, kdy byl lepený spoj zatěžován konstantní silou, a bylo v nich odečteno deset hodnot poměrného prodloužení pro každé zatěžování. Z těchto hodnot byl vypočítán aritmetický průměr, který byl zanesen do grafu závislosti poměrného prodloužení na síle. Body, jež byly tímto způsobem získány, se proložila lineární spojnice trendu, čímž byla získána linearizovaná závislost pro druhé až šesté měření pro bod měření 52 mm, viz Obr. 42.



Obr. 42 – Linearizovaná závislost poměrného prodloužení na síle pro bod měření 52 mm ze systému LUNA

6.4 Model pomocí metody konečných prvků

Numerická simulace tahových zkoušek byla provedena pomocí softwaru Abaqus/CAE 6.14-5. Hlavním cílem této simulace bylo určit teoretické hodnoty poměrného prodloužení v místech, kde byly při experimentu umístěny snímače deformace, pro porovnání s experimentálními výsledky.

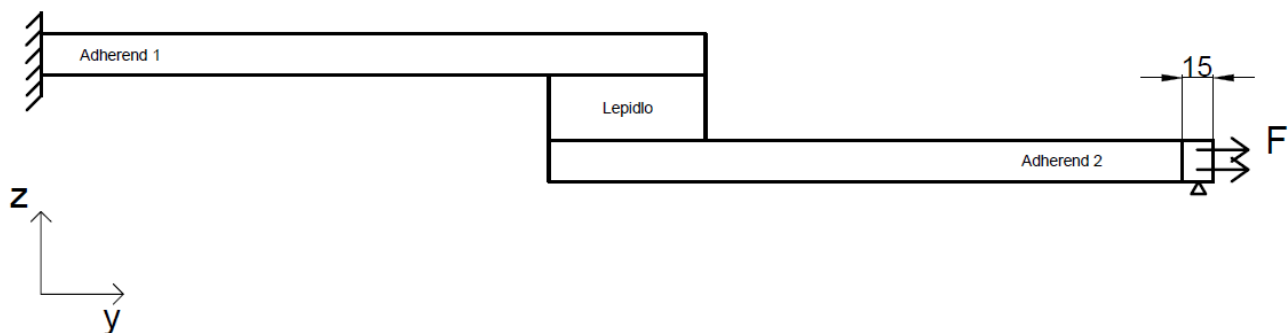
6.4.1 Vstupní data

Youngův modul obou adherendů, vypočtený z poměrné deformace naměřené na tenzometru SG3 ($E = 150011 \text{ MPa}$), je pro ocel příliš nízký, proto byla provedena analýza s tímto modulem a následně také analýza s běžným Youngovým modulem oceli, tedy $E = 210000 \text{ MPa}$. Výsledky pro oba moduly byly poté srovnány, aby mohlo být určeno, zda měření na tenzometru SG3 proběhlo správně. Poissonovo číslo pro adherendy bylo zvoleno jako klasické Poissonovo číslo pro ocel, tedy $\nu = 0,3$. Pro adhesivní vrstvu byly použity hodnoty pro lepidlo Spabond Gurit 345, které byly zjištěny rešerší, konkrétně Youngův modul $E = 2260 \text{ MPa}$ a Poissonovo číslo $\nu = 0,38$.

6.4.2 Okrajové podmínky

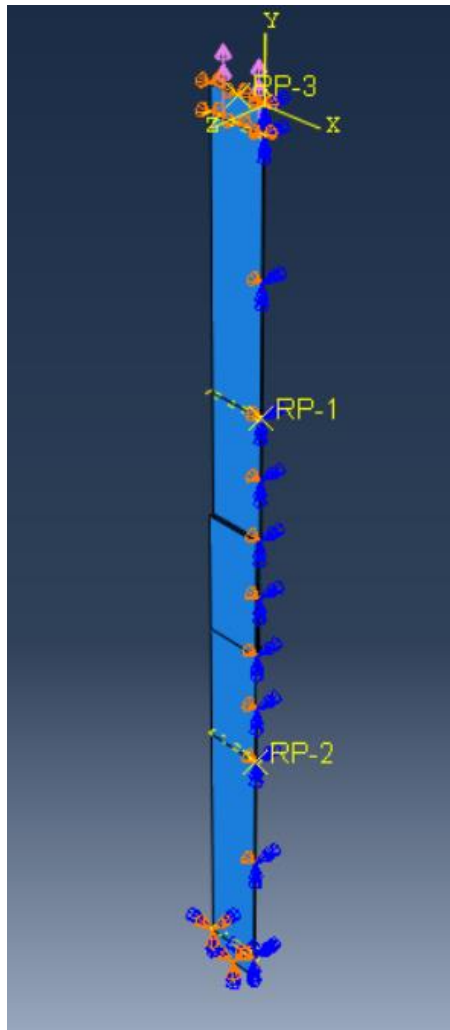
Jelikož má tato simulace za cíl následné porovnání s experimentálními hodnotami, musíme zvolit okrajové podmínky co nejvíce podobné provedenému experimentu. Proto bylo 15 mm z dolního konce vzorku upevněno pomocí okrajové podmínky encastre, čímž se zabránilo jeho pohybu

a rotaci ve všech směrech a bylo tak simulováno upevnění v dolních čelistech zkušebního stroje. Druhému konci vzorku bylo na posledních 15 mm zabráněno v posunu do os x a z, stejně jako při experimentu v horních čelistech stroje. Schematicky je uložení vzorku ukázáno na Obr. 43.



Obr. 43 – Schéma testování vzorku použité v programu Abaqus

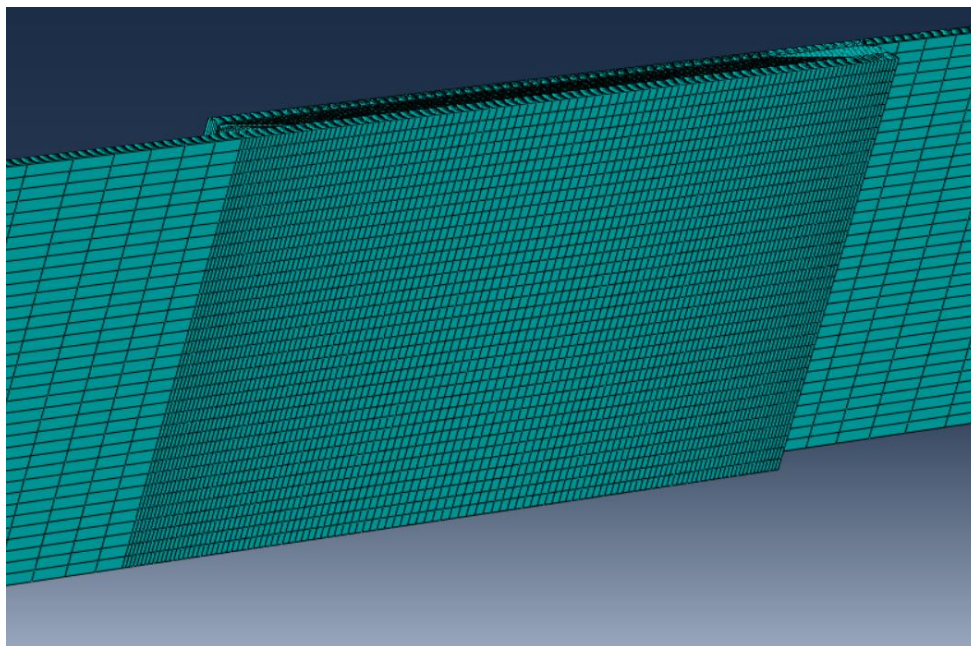
Zatěžující síla byla aplikována v modulu load pomocí volby surface traction, aby se co nejlépe podobala skutečnému zatěžování, kterému byl při zkoušce vzorek vystaven. Pro zjednodušení výpočtu a zkrácení výpočtového času byl spoj modelován poloviční a následně byla použita symetrie podél osy x. Zatěžující síla a okrajové podmínky z programu Abaqus jsou znázorněny na Obr. 44.



Obr. 44 – Zatěžující síla a okrajové podmínky vzorku z programu Abaqus

6.4.3 Síťování

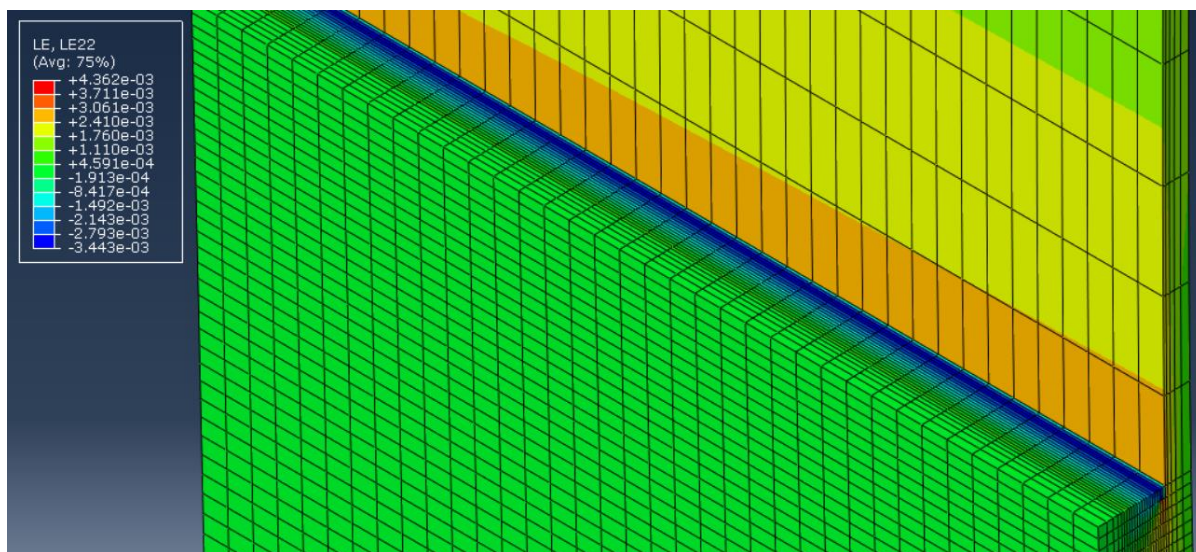
Síťování lepeného spoje bylo vytvořeno s ohledem na co největší zkrácení výpočtového času, proto byla použita hustá síť v oblasti překlátování a u zbytku vzorku pak větší elementy. Všechny hrany ve směru osy z byly shodně síťovány přibližnou velikostí elementu 1 mm. Hrany ve směru osy y v oblasti překlátování minimální velikostí 0,4 mm a maximální 1 mm. Mimo oblast překlátování poté minimálně 3 mm a maximálně 10 mm, jelikož mimo překlátování není hustá síť nutná. Velikosti hran elementů ve směru osy x byly v oblasti překlátování minimálně 0,1 mm a maximálně 0,3 mm s tím, že tloušťka adhezivní vrstvy byla síťována na velikost elementu 0,1 mm. Celkový počet elementů byl 119016. Síťování v oblasti překlátování je zobrazeno na Obr. 45.



Obr. 45 – Detail sítě v oblasti přepletování

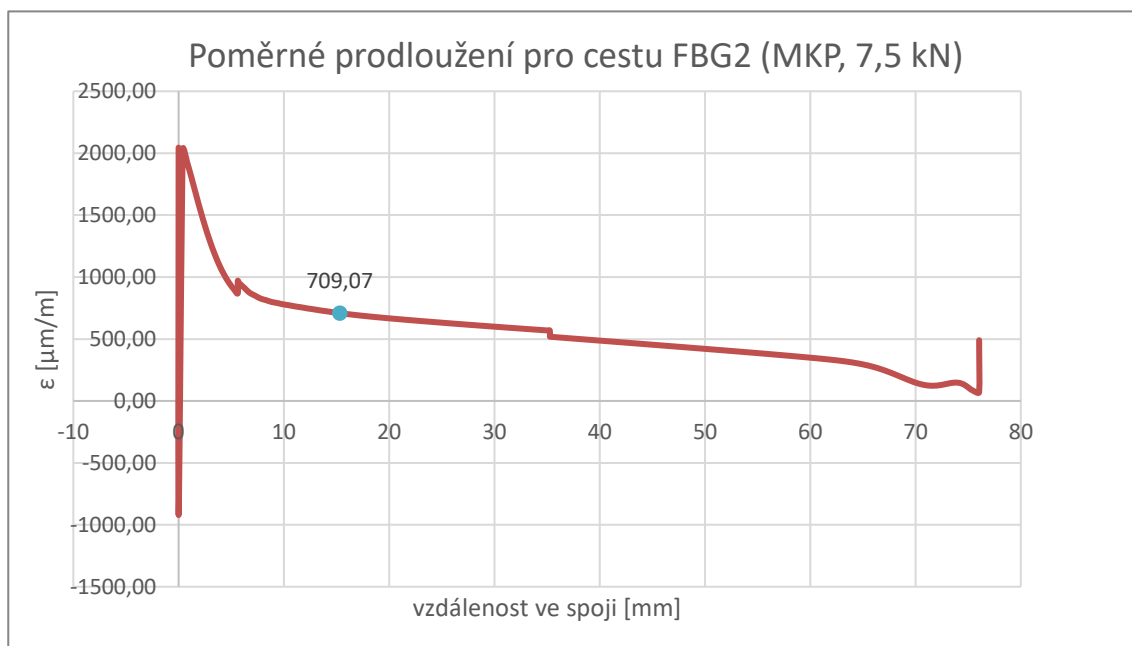
6.5 Porovnání výsledků experimentu s MKP modelem

Uvedený MKP model byl podroben tahovým zatížením $7,5\text{ kN}$ a 10 kN ve směru osy y přesně podle provedeného experimentu. Na deformovaném nosníku byly vyznačeny cesty pro sledování poměrného prodloužení ve směru osy y . Tři cesty pro FBG snímače a distribuovaný optovláknový snímač byly umístěny na rozhraní adharendu a lepidla, jedna cesta pro odporové tenzometry byla umístěna na zadní stranu adharendu. Detail začátku spoje zobrazující barevně poměrné prodloužení ve směru osy y je na Obr. 46.

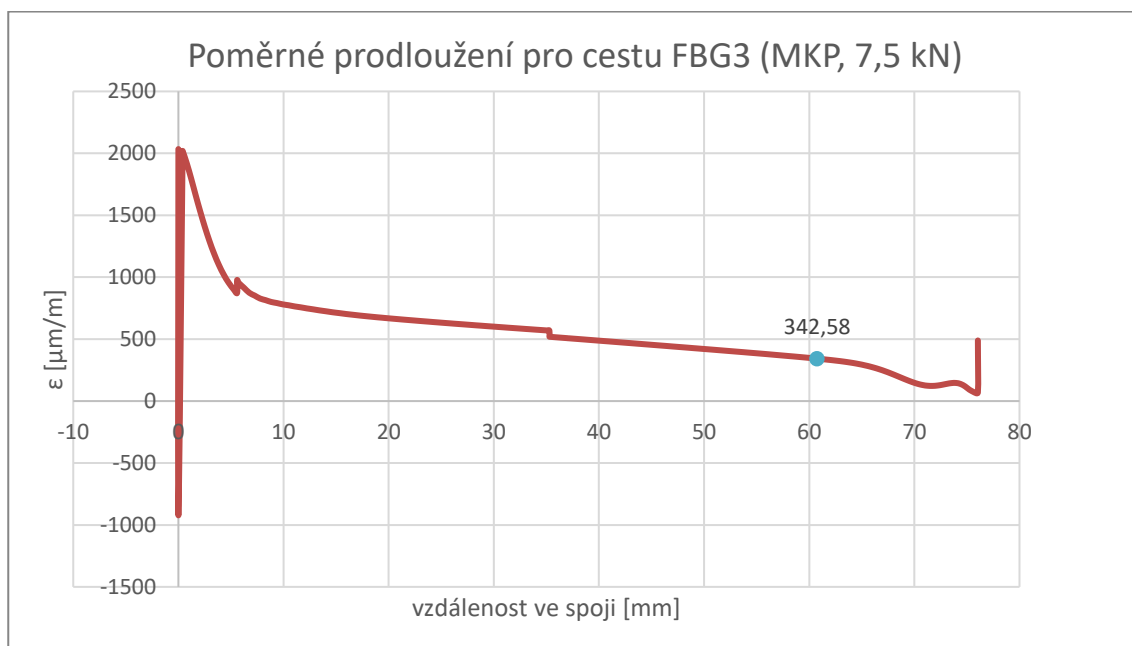


Obr. 46 – Detail začátku lepeného spoje zobrazující poměrné prodloužení při zatěžující síle $7,5\text{ kN}$

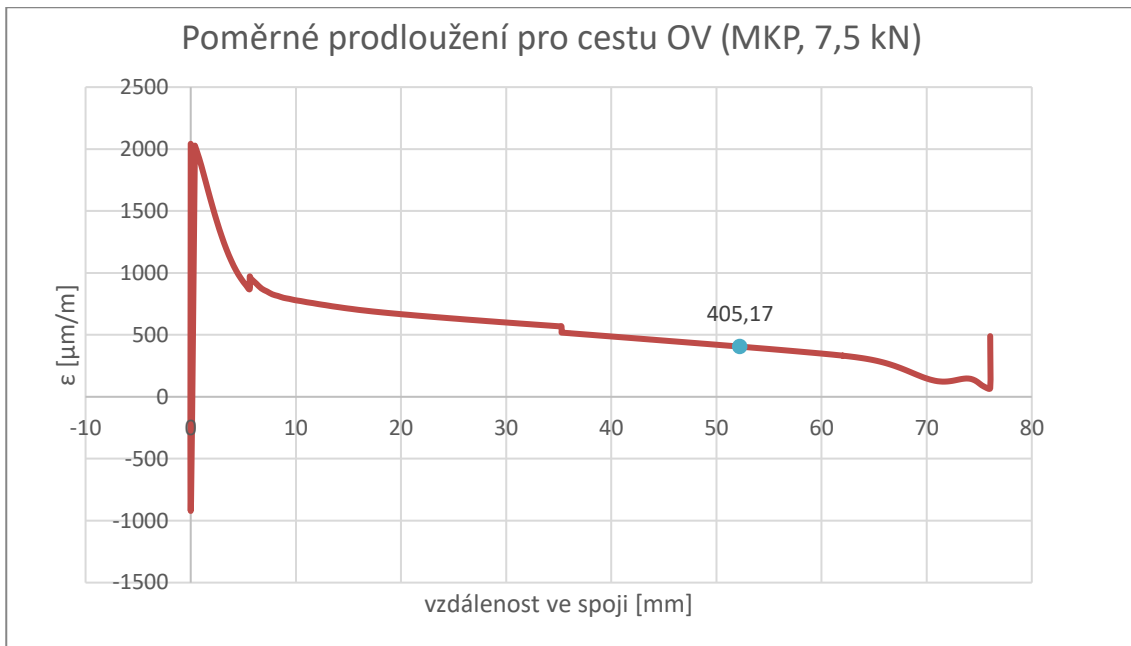
Ve směru cest byla následně zkoumána závislost poměrného prodloužení ve směru osy y na poloze v lepeném spoji (nebo v případě tenzometrů na zadní straně adherendu). Odpovídající grafy podél jednotlivých cest ve spoji při zatížení 7,5 kN a s Youngovým modulem adherendů $E = 210000 \text{ MPa}$ jsou uvedeny na Obr. 47, Obr. 48, Obr. 49 a Obr. 50. Na každém grafu je vyznačeno místo, kde byl umístěn snímač deformace během experimentu.



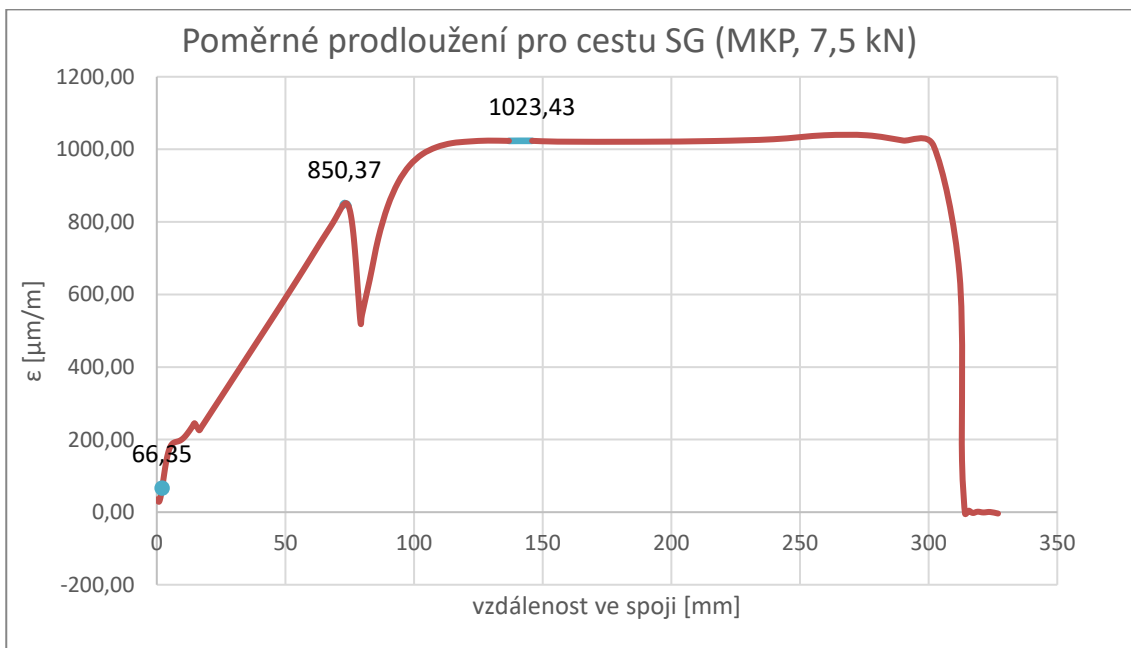
Obr. 47 – Graf poměrného prodloužení pro cestu FBG2



Obr. 48 – Graf poměrného prodloužení pro cestu FBG3



Obr. 49 – Graf poměrného prodloužení pro cestu distribuovaného optovláknového snímače vlákna



Obr. 50 – Graf poměrného prodloužení pro cestu SG

Poté byly z dat podél jednotlivých cest získány hodnoty, odpovídající poloze snímačů deformací, které byly porovnány s odpovídajícími experimentálními hodnotami. Byla provedena čtyři porovnání, pro dvě zatěžující síly 7,5 kN a 10 kN a dva různé Youngovy moduly adherendů 150011 MPa a 210000 MPa, aby mohlo dojít k porovnání výsledků MKP analýzy pro experimentálně zjištěný a teoretický Youngův modul adherendů. Porovnání experimentálních a MKP hodnot jsou zobrazena v Tab. 7, Tab. 8, Tab. 9 a Tab. 10.

Tab. 7 – Porovnání výsledků experimentů a MKP modelu pro $F = 7,5 \text{ kN}$, $E=150011 \text{ MPa}$

| $F = 7,5 \text{ kN}$, $E=150011 \text{ MPa}$ | $\varepsilon_{\text{MKP}} [\mu\text{m/m}]$ | $\varepsilon_{\text{exp}} [\mu\text{m/m}]$ | $\varepsilon_{\text{exp}}/\varepsilon_{\text{MKP}}$ |
|---|--|--|---|
| SG1 | 90,41 | 68,17 | 75 % |
| SG2 | 1203,56 | 305,58 | 25 % |
| SG3 | 1434,07 | 623,04 | 43 % |
| FBG2 | 957,70 | 285,97 | 30 % |
| FBG3 | 480,19 | 234,28 | 49 % |
| OV | 564,56 | 331,45 | 59 % |

Tab. 8 – Porovnání výsledků experimentů a MKP modelu pro $F = 10 \text{ kN}$, $E=150011 \text{ MPa}$

| $F = 10 \text{ kN}$, $E=150011 \text{ MPa}$ | $\varepsilon_{\text{MKP}} [\mu\text{m/m}]$ | $\varepsilon_{\text{exp}} [\mu\text{m/m}]$ | $\varepsilon_{\text{exp}}/\varepsilon_{\text{MKP}}$ |
|--|--|--|---|
| SG1 | 110,52 | 88,90 | 80 % |
| SG2 | 1615,56 | 413,24 | 26 % |
| SG3 | 1913,19 | 807,52 | 42 % |
| FBG2 | 1286,05 | 377,65 | 29 % |
| FBG3 | 634,74 | 308,37 | 49 % |
| OV | 750,37 | 435,99 | 58 % |

Tab. 9 – Porovnání výsledků experimentů a MKP modelu pro $F = 7,5 \text{ kN}$, $E=210000 \text{ MPa}$

| $F = 7,5 \text{ kN}$, $E=210000 \text{ MPa}$ | $\varepsilon_{\text{MKP}} [\mu\text{m/m}]$ | $\varepsilon_{\text{exp}} [\mu\text{m/m}]$ | $\varepsilon_{\text{exp}}/\varepsilon_{\text{MKP}}$ |
|---|--|--|---|
| SG1 | 66,35 | 68,17 | 103 % |
| SG2 | 850,37 | 305,58 | 36 % |
| SG3 | 1023,43 | 623,04 | 61 % |
| FBG2 | 709,07 | 285,97 | 40 % |
| FBG3 | 342,58 | 234,28 | 68 % |
| OV | 405,17 | 331,45 | 82 % |

Tab. 10 – Porovnání výsledků experimentů a MKP modelu pro $F = 10 \text{ kN}$, $E=210000 \text{ MPa}$

| $F = 10 \text{ kN}$, $E=210000 \text{ MPa}$ | $\varepsilon_{\text{MKP}} [\mu\text{m/m}]$ | $\varepsilon_{\text{exp}} [\mu\text{m/m}]$ | $\varepsilon_{\text{exp}}/\varepsilon_{\text{MKP}}$ |
|--|--|--|---|
| SG1 | 80,04 | 88,90 | 111 % |
| SG2 | 1145,50 | 413,24 | 36 % |
| SG3 | 1365,61 | 807,52 | 59 % |
| FBG2 | 974,99 | 377,65 | 39 % |
| FBG3 | 451,90 | 308,37 | 68 % |
| OV | 537,40 | 435,99 | 81 % |

Z porovnání je zřejmé, že lepší shody s experimentálními hodnotami dosahuje MKP model pro teoretickou hodnotu Youngova modulu $E = 210000 \text{ MPa}$. Dá se tedy předpokládat, že došlo k chybnému měření na tenzometru SG3, ze kterého byla vypočítána hodnota $E = 150011 \text{ MPa}$. Proto je pro hodnocení shody MKP modelu a experimentu vhodnější porovnávat

s MKP modelem, ve kterém byla použita teoretická hodnota Youngova modulu. V tabulkách Tab. 9 a Tab. 10, které ukazují porovnání pro teoretický Youngův modul, lze sledovat dobrou shodu experimentálních a MKP hodnot s tím, že ve většině případů jsou experimentálně naměřené hodnoty nižší než ty, jež byly vypočteny MKP modelem. U optovláknových snímačů dosahují při zatěžující síle 10 kN experimentální hodnoty 39–81 % hodnot MKP modelu pro teoretický Youngův modul oceli. Příčinou této skutečnosti mohou být například nepřesně zvolené hodnoty Youngova modulu a Poissonova čísla adhesiva z rešerše, které byly použity pro MKP analýzu. Další nepřesnosti mohou pramenit z nesprávného zamíchání dvousložkového lepidla nebo nedokonalého slepení adherendů. Nízká shoda u snímačů FBG2 a SG2 může být způsobena jejich umístěním na začátcích lepeného spoje, kde je velký deformační gradient. Téměř k přesné shodě naopak došlo na tenzometru SG1, na optovláknovém snímači FBG3 a distribuovaném optovláknovém snímači.

6.6 Porovnání výsledků experimentu s analytickým modelem

Pro vytvoření analytického modelu spoje zkoumaného v této práci byl použit Golland-Reisserův model, konkrétně postup uvedený v kapitole 3.2. Naměřené rozměry a známé parametry adherendů a lepidla byly dosazeny do rovnic (61) a (62) a byly zjištěny hodnoty poměrného prodloužení pro oba adherendy podél délky spoje. Tyto teoretické hodnoty byly následně porovnány s experimentálně zjištěnými hodnotami a uvedeny v tabulkách. Stejně jako u MKP modelu byly zkoumány hodnoty pro zatížení 7,5 kN a 10 kN a pro každé zatížení pro teoretický a experimentálně zjištěný Youngův modul adherendů. Porovnání jsou uvedena v Tab. 11, Tab. 12, Tab. 13 a Tab. 14. Pro přehlednost jsou tabulky uvedeny na jedné straně práce.

Tab. 11 – Porovnání výsledků experimentů a analytického modelu pro $F = 7,5 \text{ kN}$, $E=151011 \text{ MPa}$

| $F = 7,5 \text{ kN}$, $E=150011 \text{ MPa}$ | $\varepsilon_{AM} [\mu\text{m/m}]$ | $\varepsilon_{\text{exp}} [\mu\text{m/m}]$ | $\varepsilon_{\text{exp}}/\varepsilon_{AM}$ |
|---|------------------------------------|--|---|
| SG1 | 56,55 | 68,17 | 121 % |
| SG2 | 862,80 | 305,58 | 35 % |
| SG3 | - | 623,04 | - |
| FBG2 | 410,51 | 285,97 | 70 % |
| FBG3 | 303,69 | 234,28 | 77 % |
| OV | 344,17 | 331,45 | 96 % |

Tab. 12 – Porovnání výsledků experimentů a analytického modelu pro $F = 10 \text{ kN}$, $E=151011 \text{ MPa}$

| $F = 10 \text{ kN}$, $E=150011 \text{ MPa}$ | $\varepsilon_{AM} [\mu\text{m/m}]$ | $\varepsilon_{\text{exp}} [\mu\text{m/m}]$ | $\varepsilon_{\text{exp}}/\varepsilon_{AM}$ |
|--|------------------------------------|--|---|
| SG1 | 81,34 | 88,90 | 109 % |
| SG2 | 1137,64 | 413,24 | 36 % |
| SG3 | - | 807,52 | - |
| FBG2 | 546,00 | 377,65 | 69 % |
| FBG3 | 406,26 | 308,37 | 76 % |
| OV | 459,22 | 435,99 | 95 % |

Tab. 13 – Porovnání výsledků experimentů a analytického modelu pro $F = 7,5 \text{ kN}$, $E=210000 \text{ MPa}$

| $F = 7,5 \text{ kN}$, $E=210000 \text{ MPa}$ | $\varepsilon_{AM} [\mu\text{m/m}]$ | $\varepsilon_{\text{exp}} [\mu\text{m/m}]$ | $\varepsilon_{\text{exp}}/\varepsilon_{AM}$ |
|---|------------------------------------|--|---|
| SG1 | 30,89 | 68,17 | 221 % |
| SG2 | 666,86 | 305,58 | 46 % |
| SG3 | - | 623,04 | - |
| FBG2 | 313,25 | 285,97 | 91 % |
| FBG3 | 197,12 | 234,28 | 119 % |
| OV | 237,71 | 331,45 | 139 % |

Tab. 14 – Porovnání výsledků experimentů a analytického modelu pro $F = 10 \text{ kN}$, $E=210000 \text{ MPa}$

| $F = 10 \text{ kN}$, $E=210000 \text{ MPa}$ | $\varepsilon_{AM} [\mu\text{m/m}]$ | $\varepsilon_{\text{exp}} [\mu\text{m/m}]$ | $\varepsilon_{\text{exp}}/\varepsilon_{AM}$ |
|--|------------------------------------|--|---|
| SG1 | 45,76 | 88,90 | 194 % |
| SG2 | 875,16 | 413,24 | 47 % |
| SG3 | - | 807,52 | - |
| FBG2 | 415,81 | 377,65 | 91 % |
| FBG3 | 264,67 | 308,37 | 117 % |
| OV | 317,50 | 435,99 | 137 % |

Při porovnání experimentálních hodnot s hodnotami vypočtenými pomocí analytického modelu bylo zjištěno, že hodnoty naměřené na optovláknových snímačích jsou nižší než analytické, pokud byl v analytickém modelu použit vypočtený Youngův modul $E = 150011 \text{ MPa}$, a naopak vyšší, pokud byl použit teoretický Youngův modul pro ocel $E = 210000 \text{ MPa}$. Vyšší hodnoty

experimentálního poměrného prodloužení mohou být způsobeny například umístěním optovláknových snímačů, neboť jejich osa je umístěna nad povrchem adherendu, zatímco analytický model počítá poměrné prodloužení adherendu. Dalším důvodem může být vliv smykového napětí v lepidle, které na optovláknové snímače z jedné strany působí. Z těchto důvodů, a také z předchozího porovnání s MKP modelem, se potvrdila nesprávnost měření na tenzometru SG3 a tím také nesprávnost z jeho hodnot vypočteného Youngova modulu adherendů $E = 150011 \text{ MPa}$. Pokud se tedy porovnají experimentální a analytické hodnoty pro teoretický Youngův modul adherendů, lze pro optovláknové snímače sledovat dobrou shodu, viz Tab. 13 a Tab. 14. Pro zatěžující sílu 10 kN dosahují experimentální hodnoty 91–137 % hodnot z analytického modelu, ve kterém byl použit teoretický Youngův modul oceli. Naopak při měření na tenzometrech SG1 a SG2 dosahují experimentální hodnoty 194 %, respektive 47 % analytických hodnot. U tenzometru SG1 může být tento jev způsoben umístěním na konci lepeného spoje, kde jsou hodnoty poměrného prodloužení nízké a může snadněji dojít k chybě při měření polohy tenzometru. Špatná shoda měření na tenzometru SG2 může být způsobena jeho umístěním na začátku lepeného spoje, kde je velký deformační gradient. U tenzometru SG3 není možné porovnání s analytickým modelem, neboť ten řeší pouze deformace adherendu v oblasti přeplátování.

7 Závěr

V diplomové práci byly splněny všechny cíle, které byly na začátku stanoveny. Byla provedena rešerše všech důležitých pojmů, které se v průběhu práce vyskytly, a rešerše analytických modelů pro lepené spoje. Pro srovnání s experimentálními výsledky byl zvolen Goland-Reissnerův model, neboť obsahoval charakteristiky adherendů, které byly při tahové zkoušce měřeny. Byl otestován vliv do spoje vložených optických vláken na mechanické vlastnosti lepeného spoje. Jak při tahových, tak při únavových zkouškách se neprokázal negativní vliv vložených vláken na kvalitu spoje, čímž se potvrdila možnost použití optovláknových snímačů deformací vložených přímo do spoje. Byl vyroben vzorek s lepeným spojem, do kterého byly umístěny optovláknové snímače. Na zadní stranu jednoho z adherendů byly umístěny tři odporové tenzometry pro měření technikou backface. Na vzorku byla úspěšně provedena tahová zkouška, při které byly naměřeny relevantní hodnoty poměrného prodloužení.

S využitím známých parametrů vzorku byl v programu Abaqus vytvořen MKP model vzorku s lepeným spojem. Z něj byly odečteny hodnoty poměrného prodloužení pro optovláknové snímače a tenzometry, které byly porovnány s experimentálními hodnotami (Tab. 15). Hodnoty, získané z optovláknových snímačů deformací při experimentu, dosahují 39–81 % hodnot získaných analýzou metodou konečných prvků. Příčinou této skutečnosti mohou být například nepřesně zvolené hodnoty Youngova modulu a Poissonova čísla adhesiva z rešerše, jež byly použity pro MKP analýzu. Další nepřesnosti mohou pramenit z nesprávného zamíchání dvousložkového lepidla nebo nedokonalého slepení adherendů. Z optovláknových snímačů došlo k nejhorší shodě na snímači FBG2, což může být způsobeno jeho umístěním na začátku spoje, kde je velký deformační gradient. U optovláknového snímače FBG3 a distribuovaného optovláknového snímače došlo k dobré shodě s MKP modelem.

Znamé parametry vzorku byly použity pro vytvoření analytického modelu lepeného spoje, který byl porovnán s experimentálními hodnotami (Tab. 15). Hodnoty, získané z optovláknových snímačů deformací při experimentu, se pohybovaly v rozmezí 91–137 % hodnot z analytického modelu. Vyšší hodnoty experimentálního poměrného prodloužení mohou být způsobeny například umístěním optovláknových snímačů, neboť jejich osa je umístěna nad povrchem adherendu, zatímco analytický model počítá poměrné prodloužení adherendu. Dalším důvodem může být vliv smykového napětí v lepidle, které na optovláknové snímače z jedné strany působí.

Díky dobré shodě experimentálních a teoretických hodnot se potvrdila vhodnost použití optovláknových snímačů pro měření deformací uvnitř lepených spojů.

Tab. 15 – Porovnání experimentálních, analytických a MKP hodnot pro zatěžující sílu 10 kN a Youngův modul adherendů 210000 MPa

| F = 10 kN, E=210000 MPa | ε_{MKP} [$\mu\text{m}/\text{m}$] | ε_{AM} [$\mu\text{m}/\text{m}$] | ε_{exp} [$\mu\text{m}/\text{m}$] | $\varepsilon_{exp}/\varepsilon_{MKP}$ | $\varepsilon_{exp}/\varepsilon_{AM}$ |
|----------------------------|--|---|--|---------------------------------------|--------------------------------------|
| SG1 | 80,04 | 45,76 | 88,90 | 111% | 194% |
| SG2 | 1145,50 | 875,16 | 413,24 | 36% | 47% |
| SG3 | 1365,61 | - | 807,52 | 59% | - |
| FBG2 | 974,99 | 415,81 | 377,65 | 39% | 91% |
| FBG3 | 451,90 | 264,67 | 308,37 | 68% | 117% |
| OV | 537,40 | 317,50 | 435,99 | 81% | 137% |

8 Literatura

- [1] LOUREIRO, Ana Luisa Correia Dias, 2011. Determination of the strain distribution in the adhesive joints using fiber bragg grating (FBG) [online]. [vid. 2021-01-10]. Dostupné z: <https://repositorio-aberto.up.pt/handle/10216/61557>
- [2] GREGOR, Miroslav. Technologie a technika lepení – základní informace. *Lepidla.cz* [online] [vid. 2021-01-27]. Dostupné z: <https://www.lepidla.cz/cs/a/technologie-a-technika-lepeni--zakladni-informace.html>
- [3] ADAMS, R. D., Robert D. ADAMS, J. COMYN, William Charles WAKE a W. C. WAKE, 1997. *Structural Adhesive Joints in Engineering*. B.m.: Springer Science & Business Media. ISBN 978-0-412-70920-3
- [4] SUK, Štěpán, 2015. *Hodnocení lepených spojů používaných ve smíšené konstrukci* [online]. B.m. [vid. 2021-01-28]. Thesis. Technická Univerzita v Liberci. Dostupné z: <https://dspace.tul.cz/handle/15240/17459>
- [5] DUŠEK, Martin; MAZANEC, Michal. Fyzikální principy optických a optovláknových snímačů. *Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav automatizace a měřicí techniky*, 2012. Dostupné z: http://www.crr.vutbr.cz/offline/SYSTEM/FILES/BROZURA_06_1206.PDF
- [6] KOSTELANSKÝ, Michal, 2019. Návrh vláknově optického senzoru na bázi Braggovské mřížky (FBG) pro měření tepové frekvence lidského těla. [online]. [vid. 2021-09-02]. Dostupné z: <http://dspace.vsb.cz/handle/10084/136346>
- [7] KAŠÍK, Ivan; PETERKA, Pavel. Optická vlákna – páteř moderních komunikací. *Československý časopis pro fyziku*, 2011, 4–7. Dostupné z: https://www.ufe.cz/sites/default/files/peterka/fjfi/11_kasik_peterka_ccf_opticka_vlakna.pdf
- [8] PEETERS, Bart, Fabio MARQUES DOS SANTOS, Andreia PEREIRA a Francisco ARAUJO, 2014. On the use of Optical Fiber Bragg Grating (FBG) Sensor Technology for Strain Modal Analysis. In: *AIP Conference Proceedings* [online]. s. 39–49. ISBN 978-0-7354-1234-7. Dostupné z: doi:10.1063/1.4879567

- [9] FBG Principle. *FBGS* [online] [vid. 2021-01-28]. Dostupné z: <https://fbgs.com/technology/fbg-principle/>
- [10] BEDIR YOUSIF, AHMED SH. SAMRAH a Rawan WAHEED, 2020. High Quality Factor and Dispersion Compensation Based on Fiber Bragg Grating in Dense Wavelength Division Multiplexing. *Optical Memory and Neural Networks* [online]. **29**(3), 228–243. ISSN 1934-7898. Dostupné z: doi:10.3103/S1060992X20030078
- [11] *Tilted fiber Bragg gratings* [online] [vid. 2021-09-02]. Dostupné z: https://greitlex.com/tilted_fiber_bragg_gratings
- [12] SILVA, A. F. da, A. F. GONCALVES, P. M. MENDES a J. H. CORREIA, 2011. FBG Sensing Glove for Monitoring Hand Posture. *IEEE Sensors Journal* [online]. **11**(10), 2442–2448. ISSN 1558-1748. Dostupné z: doi:10.1109/JSEN.2011.2138132
- [13] Fiber Bragg Grating Technology | Frequently Asked Questions. *HBM* [online] [vid. 2021-02-02]. Dostupné z: <https://www.hbm.com/en/1629/fiber-bragg-grating-technology-explained/>
- [14] CANAL, Luis P., Roohollah SARFARAZ, Georgios VIOLAKIS, John BOTSIS, Véronique MICHAUD a Hans G. LIMBERGER, 2014. Monitoring strain gradients in adhesive composite joints by embedded fiber Bragg grating sensors. *Composite Structures* [online]. **112**, 241–247. ISSN 0263-8223. Dostupné z: doi:10.1016/j.compstruct.2014.02.014
- [15] MURAYAMA, Hideaki, Kazuro KAGEYAMA, Kiyoshi UZAWA, Kohei OHARA a Hiroataka IGAWA, 2012. Strain monitoring of a single-lap joint with embedded fiber-optic distributed sensors. *Structural Health Monitoring* [online]. **11**(3), 325–344. ISSN 1475-9217. Dostupné z: doi:10.1177/1475921711419994
- [16] NING, X., H. MURAYAMA, K. KAGEYAMA, K. UZAWA a D. WADA, 2012. Measurement of longitudinal strain and estimation of peel stress in adhesive-bonded single-lap joint of CFRP adherend using embedded FBG sensor. In: *Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems 2012: Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems 2012* [online]. B.m.: International Society for Optics and Photonics, s. 83451I [vid. 2021-01-21]. Dostupné z: doi:10.1117/12.917431

- [17] BERNASCONI, Andrea, Michele CARBONI a Lorenzo COMOLLI, 2011. Monitoring of fatigue crack growth in composite adhesively bonded joints using Fiber Bragg Gratings. *Procedia Engineering* [online]. **10**, 11th International Conference on the Mechanical Behavior of Materials (ICM11), 207–212. ISSN 1877-7058. Dostupné z: doi:10.1016/j.proeng.2011.04.037
- [18] BERNASCONI, Andrea a Lorenzo COMOLLI, 2012. An investigation of the crack propagation in a carbon fiber bonded joint using backface strain measurements with FBG sensors. In: *OFS2012 22nd International Conference on Optical Fiber Sensors: OFS2012 22nd International Conference on Optical Fiber Sensors* [online]. B.m.: International Society for Optics and Photonics, s. 84214Y [vid. 2021-01-19]. Dostupné z: doi:10.1117/12.975143
- [19] NING, Xiaoguang, Hideaki MURAYAMA, Kazuro KAGEYAMA, Daichi WADA, Makoto KANAI, Isamu OHSAWA a Hirotaka IGAWA, 2014. Dynamic strain distribution measurement and crack detection of an adhesive-bonded single-lap joint under cyclic loading using embedded FBG. *Smart Materials and Structures* [online]. **23**(10), 105011. ISSN 0964-1726. Dostupné z: doi:10.1088/0964-1726/23/10/105011
- [20] Praktické využití a princip činnosti optovláknových FBG senzorů. *TZB info* [online] [vid. 2021-02-04]. Dostupné z: <https://elektro.tzb-info.cz/elektromaterialy/21770-prakticke-vyuziti-a-princip-cinnosti-optovlaknovych-fbg-senzoru>
- [21] Kreuzer, Manfred, 2006. Strain Measurement with Fiber Bragg Grating Sensors. [online] [vid. 2021-02-04]. Dostupné z: http://wwwpersonal.umich.edu/~bkerkez/courses/cee575/Handouts/7FBGS_Strain_Measurement_mo.pdf
- [22] STEIN, N., J. FELGER a W. BECKER, 2017. Analytical models for functionally graded adhesive single lap joints: A comparative study. *International Journal of Adhesion and Adhesives* [online]. **76**, Special Issue on Functionally Graded Materials, 70–82. ISSN 0143-7496. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijadhadh.2017.02.001
- [23] F M DA SILVA, Lucas a R D ADAMS, 2007. Techniques to reduce the peel stresses in adhesive joints with composites. *International Journal of Adhesion and Adhesives* [online]. **27**(3), 227–235. ISSN 0143-7496. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijadhadh.2006.04.001

- [24] MARQUES, E. A. S. a Lucas F. M. da SILVA, 2008. Joint Strength Optimization of Adhesively Bonded Patches. *The Journal of Adhesion* [online]. **84**(11), 915–934. ISSN 0021-8464. Dostupné z: doi:10.1080/00218460802505275
- [25] ZHAO, X., R. D. ADAMS a L. F. M. da SILVA, 2011. Single Lap Joints with Rounded Adherend Corners: Stress and Strain Analysis. *Journal of Adhesion Science and Technology* [online]. **25**(8), 819–836. ISSN 0169-4243. Dostupné z: doi:10.1163/016942410X520871
- [26] MARQUES, E. a. S., D. N. M. MAGALHÃES a L. F. M. da SILVA, 2011. Experimental study of silicone-epoxy dual adhesive joints for high temperature aerospace applications. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik* [online]. **42**(5), 471–477. ISSN 1521-4052. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.1002/mawe.201100809
- [27] KUMAR, S., 2009. Analysis of tubular adhesive joints with a functionally modulus graded bondline subjected to axial loads. *International Journal of Adhesion and Adhesives* [online]. **29**(8), 785–795. ISSN 0143-7496. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijadhadh.2009.06.006
- [28] CARBAS, R. J. C., L. F. M. da SILVA, M. L. MADUREIRA a G. W. CRITCHLOW, 2014. Modelling of Functionally Graded Adhesive Joints. *The Journal of Adhesion* [online]. **90**(8), 698–716. ISSN 0021-8464. Dostupné z: doi:10.1080/00218464.2013.834255
- [29] OJALVO, I. U. a H. L. EIDINOFF, 1978. Bond Thickness Effects upon Stresses in Single-Lap Adhesive Joints. *AIAA Journal* [online]. **16**(3), 204–211. ISSN 0001-1452. Dostupné z: doi:10.2514/3.60878
- [30] CHEN, Du a Shun CHENG, 1983. An Analysis of Adhesive-Bonded Single-Lap Joints. *Journal of Applied Mechanics* [online]. **50**(1), 109–115. ISSN 0021-8936. Dostupné z: doi:10.1115/1.3166976
- [31] Optical Interrogator | Fiber Optic Sensing | FBG Sensor. *HBM* [online] [vid. 2021-05-20]. Dostupné z: <https://www.hbm.com/en/2322/optical-interrogators/>
- [32] What is Distributed Sensing? Fibre Optic Monitoring System (DTS & DAS)| Silixa Ltd. *Silixa Ltd* [online]. [vid. 2021-05-20]. Dostupné z: <https://silixa.com/resources/what-is-distributed-sensing/>

- [33] ODiSI 6000 Series. *Luna* [online] [vid. 2021-05-21]. Dostupné z: <https://lunainc.com/product/odisi-6000-series>
- [34] DA SILVA, Lucas F. M., Paulo J. C. DAS NEVES, R. D. ADAMS a J. K. SPELT, 2009. Analytical models of adhesively bonded joints—Part I: Literature survey. *International Journal of Adhesion and Adhesives* [online]. **29**(3), 319–330. ISSN 0143-7496. Dostupné z: [doi:10.1016/j.ijadhadh.2008.06.005](https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2008.06.005)
- [35] ŠMÍD, Jan, 2020. Porovnání vybraných analytických modelů pro plochý lepený spoj [online]. [vid. 2021-09-02]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/90097>
- [36] DA SILVA, Lucas F. M., Paulo J. C. DAS NEVES, R. D. ADAMS, A. WANG a J. K. SPELT, 2009. Analytical models of adhesively bonded joints—Part II: Comparative study. *International Journal of Adhesion and Adhesives* [online]. **29**(3), 331–341. ISSN 0143-7496. Dostupné z: [doi:10.1016/j.ijadhadh.2008.06.007](https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2008.06.007)
- [37] HE, Xiacong a Yuqi WANG, 2014. An Analytical Model for Predicting the Stress Distributions within Single-Lap Adhesively Bonded Beams. *Advances in Materials Science and Engineering* [online]. **2014**, e346379. ISSN 1687-8434. Dostupné z: [doi:10.1155/2014/346379](https://doi.org/10.1155/2014/346379)
- [38] *Adhesive Systems* [online] [vid. 2021-07-27]. Dostupné z: <https://www.gurit.com/en/our-business/composite-materials/adhesive-systems>
- [39] PAVLÍK, Tomáš a Masaryk UNIVERSITY, 2012. *Biostatistika* [online]. B.m.: Masaryk University [vid. 2021-08-16]. Dostupné z: <https://portal.med.muni.cz/clanek-590-biostatistika.html>
- [40] A.S, STEM/MARK, 2018. *ANOVA | Marketingový výzkum a analýza dat – STEM/MARK* [online]. [vid. 2021-08-16]. Dostupné z: <https://www.stemmark.cz/encyklopedie-anova/>
- [41] SCHNERCH, D., M. DAWOOD, S. RIZKALLA, E. SUMNER a K. STANFORD, 2006. Bond Behavior of CFRP Strengthened Steel Structures. *Advances in Structural Engineering* [online]. **9**(6), 805–817. ISSN 1369-4332. Dostupné z: [doi:10.1260/136943306779369464](https://doi.org/10.1260/136943306779369464)
- [42] TSAI, M. Y. a J. MORTON, 1994. [15] An evaluation of analytical and numerical solutions to the single-lap joint. *International Journal of Solids and Structures* [online]. **31**(18), 2537–2563. ISSN 0020-7683. Dostupné z: [doi:10.1016/0020-7683\(94\)90036-1](https://doi.org/10.1016/0020-7683(94)90036-1)

- [43] LIU, Meng a Mina DAWOOD, 2018. Experimental study and probabilistic bond strengths of adhesively-bonded steel butt joints under mixed-mode loadings. *Engineering Structures* [online]. **172**, 163–171. ISSN 0141-0296. Dostupné z: doi:10.1016/j.engstruct.2018.05.111
- [44] ZHENG, B. a M. DAWOOD, 2017. Fatigue Strengthening of Metallic Structures with a Thermally Activated Shape Memory Alloy Fiber-Reinforced Polymer Patch. *Journal of Composites for Construction* [online]. **21**(4), 04016113. ISSN 1943-5614. Dostupné z: doi:10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000776
- [45] SAHIN, Mehmet Ugur, 2014. *BOND BEHAVIOR BETWEEN STEEL AND HIGH MODULUS CFRP PLATES AT MODERATELY ELEVATED TEMPERATURES* [online]. B. m. [vid. 2021-09-02]. Thesis. b. n. Dostupné z: <https://uh-ir.tdl.org/handle/10657/1647>
- [46] WEILAND, J., M. Z. SADEGHI, J. V. THOMALLA, A. SCHIEBAHN, K. U. SCHROEDER a U. REISGEN, 2020. Analysis of back-face strain measurement for adhesively bonded single lap joints using strain gauge, Digital Image Correlation and finite element method. *International Journal of Adhesion and Adhesives* [online]. **97**, Special issue on Joint design, 102491. ISSN 0143-7496. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijadhadh.2019.102491

Seznam použitých veličin a jednotek

| | | |
|-----------------|------------------------|--|
| NA | [-] | Numerická apertura |
| $a(\lambda)$ | [$db \cdot km^{-1}$] | Měrný útlum |
| n | [-] | Index lomu |
| $P_{výstupní}$ | [W] | Výkon vycházející z vlákna |
| $P_{vstupní}$ | [W] | Výkon vstupující do vlákna |
| n_{eff} | [-] | Efektivní index lomu mřížky |
| Λ | [nm] | Perioda změny indexu lomu |
| λ | [nm] | Vlnová délka |
| λ_b | [nm] | Braggova vlnová délka |
| α_δ | [K^{-1}] | Změna indexu lomu |
| α_{sp} | [K^{-1}] | Koeficient roztažnosti |
| k | [-] | Citlivost FBG |
| T | [K] | Termodynamická teplota |
| p | [-] | Fotoelastický koeficient |
| F | [N] | Síla působící na adherendy |
| k | [-] | Faktor ohybového momentu (Goland–Reissner) |
| k' | [-] | Faktor posouvající síly (Goland–Reissner) |
| ϕ | [rad] | Úhel natočení střední čáry adherendu |
| N_U | [N] | Vnitřní síla působící na horní adherend ve vodorovném směru |
| N_L | [N] | Vnitřní síla působící na spodní adherend ve vodorovném směru |
| τ | [$N \cdot mm^{-2}$] | Smykové napětí v adherendech a adhezivu |
| b | [mm] | Šířka přeplátování |
| l | [mm] | Délka přeplátování |
| x | [mm] | Délková souřadnice ve směru osy x s počátkem uprostřed spoje |
| G_a | [$N \cdot mm^{-2}$] | Modul pružnosti ve smyku adheziva |
| γ | [rad] | Zkos |
| u_U | [mm] | Podélný posuv na rozhraní horního adherendu a adheziva |
| u_L | [mm] | Podélný posuv na rozhraní spodního adherendu a adheziva |
| t_a | [mm] | Tloušťka adheziva |
| M_0 | [$N \cdot m$] | Ohybový moment působící na oblast přeplátování |

| | | |
|-----------------|---------------------|--|
| M_U | $[N \cdot m]$ | Ohybový moment působící na horní adherend |
| M_L | $[N \cdot m]$ | Ohybový moment působící na spodní adherend |
| T_0 | $[N]$ | Posouvající síla působící na okraji oblasti přeplátování |
| T_U | $[N]$ | Posouvající síla působící na horní adherend |
| T_L | $[N]$ | Posouvající síla působící na spodní adherend |
| \bar{F} | $[N \cdot mm^{-1}]$ | Síla působící na adherendy vztažená na jednotku šířky |
| c | $[mm]$ | Polovina délky přeplátování |
| t | $[mm]$ | Tloušťka adherendu |
| ν | - | Poissonovo číslo adherendů |
| E | $[N \cdot mm^{-2}]$ | Modul pružnosti v tahu adherendů |
| v_1 | $[mm]$ | Vertikální posuv střední čáry adherendu |
| v_2 | $[mm]$ | Vertikální posuv střední čáry oblasti přeplátování |
| v_U | $[mm]$ | Vertikální posuv horního adherendu |
| v_L | $[mm]$ | Vertikální posuv dolního adherendu |
| ε_U | $[-]$ | Poměrné prodloužení horního adherendu |
| ε_L | $[-]$ | Poměrné prodloužení dolního adherendu |
| M_1 | $[N \cdot m]$ | Ohybový moment působící na adherend |
| M_2 | $[N \cdot m]$ | Ohybový moment působící na oblast přeplátování |
| D_1 | $[N \cdot mm]$ | Ohybová tuhost adherendů |
| D_2 | $[N \cdot mm]$ | Ohybová tuhost přeplátování |
| E_a | $[N \cdot mm^{-2}]$ | Modul pružnosti v tahu adheziva |
| F | $[-]$ | Testová statistika (ANOVA) |
| α | $[-]$ | Hladina významnosti testu (ANOVA) |
| n | $[-]$ | Rozsah výběrů (ANOVA) |
| k | $[-]$ | Počet výběrů (ANOVA) |
| \bar{y} | $[-]$ | Výběrový průměr (ANOVA) |
| y | $[-]$ | Výběrový součet (ANOVA) |

Seznam obrázků

| | |
|---|----|
| Obr. 1 – Tvary lepených spojů [3]..... | 11 |
| Obr. 2 – Porovnání rozložení napětí u šroubového a lepeného spoje [1]..... | 11 |
| Obr. 3 – Princip fungování optického vlákna [7]..... | 13 |
| Obr. 4 – Základní typy optických vláken [5] | 13 |
| Obr. 5 – Struktura FBG s indexem lomu jádra a spektrální odezvou [8]..... | 16 |
| Obr. 6 – Změna Braggovy vlnové délky při namáhání [9]..... | 16 |
| Obr. 7 – Typy Braggových mřížek [10] | 18 |
| Obr. 8 – Měřicí okruh s měřicí jednotkou od společnosti LUNA [33] | 21 |
| Obr. 9 – Výsledný 3D model s naměřenými hodnotami napětí ze softwaru společnosti LUNA [33] | 21 |
| Obr. 10 – Porovnání výsledků experimentu s MKP modelem [1] | 22 |
| Obr. 11 – Porovnání výsledků experimentu s MKP modelem pro různé umístění FBG (v první vrstvě adherendu, na rozhraní adherend/lepidlo, v lepidle) [14]..... | 23 |
| Obr. 12 – Porovnání výsledků experimentu s MKP modelem [16] | 23 |
| Obr. 13 – Silové účinky v oblasti přeplátování [35]..... | 25 |
| Obr. 14 – Deformace střední čáry adherendu s vyznačenými oblastmi 1 a 2 [35]..... | 25 |
| Obr. 15 – Silové účinky na vyňatý element [35]..... | 28 |
| Obr. 16 – Rozměry použitých lepených spojů | 32 |
| Obr. 17 – Vybraný lepený spoj, jenž byl analyzován během zkoušek..... | 32 |
| Obr. 18 – Vzorek během tahové zkoušky..... | 33 |
| Obr. 19 – Vzorek během únavové zkoušky..... | 33 |
| Obr. 20 – Zavedení značení k analýze rozptylu [39]..... | 34 |
| Obr. 21 – Krabicový graf pro σ_{max} vzorků při tahové zkoušce | 35 |
| Obr. 22 – Krabicový graf pro σ_h vzorků při únavové zkoušce..... | 37 |
| Obr. 23 – Krabicový graf pro σ_d vzorků při únavové zkoušce | 37 |
| Obr. 24 – Krabicový graf pro počet cyklů N vzorků při únavové zkoušce..... | 37 |
| Obr. 25 – Geometrie lepeného spoje | 38 |

| | |
|---|----|
| Obr. 26 – Plechy, jež byly použity pro výrobu lepeného spoje..... | 39 |
| Obr. 27 – Adherendy po broušení | 39 |
| Obr. 28 – Rozmístění FBG snímačů a distribuovaného optovláknového snímače v lepeném spoji | 40 |
| Obr. 29 – Zatížený spoj po slepení..... | 41 |
| Obr. 30 – Detail lepeného spoje po vytvrzení | 41 |
| Obr. 31 – Specifikace použitých tenzometrů..... | 42 |
| Obr. 32 – Rozmístění tenzometrů na jednom z adherendů..... | 42 |
| Obr. 33 – Zkušební vzorek s lepeným spojem umístěný v testovacím stroji | 44 |
| Obr. 34 – Ústředna měřicího systému LUNA ODISI..... | 44 |
| Obr. 35 – Měřicí systém FBGUARD 1550 | 45 |
| Obr. 36 – Linearizovaná závislost poměrného prodloužení na síle pro SG1 | 47 |
| Obr. 37 – Linearizovaná závislost poměrného prodloužení na síle pro SG2 | 47 |
| Obr. 38 – Linearizovaná závislost poměrného prodloužení na síle pro SG3 | 48 |
| Obr. 39 – Linearizovaná závislost poměrného prodloužení na síle pro FBG2..... | 49 |
| Obr. 40 – Linearizovaná závislost poměrného prodloužení na síle pro FBG3..... | 49 |
| Obr. 41 – Graf závislosti poměrného prodloužení na čase pro druhé až šesté zatěžování pro systém LUNA | 50 |
| Obr. 42 – Linearizovaná závislost poměrného prodloužení na síle pro bod měření 52 mm ze systému LUNA..... | 51 |
| Obr. 43 – Schéma testování vzorku použité v programu Abaqus | 52 |
| Obr. 44 – Zatěžující síla a okrajové podmínky vzorku z programu Abaqus..... | 53 |
| Obr. 45 – Detail sítě v oblasti přeplátování | 54 |
| Obr. 46 – Detail začátku lepeného spoje zobrazující poměrné prodloužení při zatěžující síle 7,5 kN | 54 |
| Obr. 47 – Graf poměrného prodloužení pro cestu FBG2 | 55 |
| Obr. 48 – Graf poměrného prodloužení pro cestu FBG3 | 55 |
| Obr. 49 – Graf poměrného prodloužení pro cestu distribuovaného optovláknového snímače vlákna | 56 |

| | |
|--|----|
| Obr. 50 – Graf poměrného prodloužení pro cestu SG | 56 |
| Obr. 51 – Datasheet lepidla Spabond 345 [38]..... | 75 |
| Obr. 52 – Grafy závislosti poměrného prodloužení a síly na čase pro tenzometr SG1 | 76 |
| Obr. 53 – Grafy závislosti poměrného prodloužení na síle pro tenzometr SG1..... | 77 |
| Obr. 54 – Grafy závislosti poměrného prodloužení a síly na čase pro tenzometr SG2..... | 78 |
| Obr. 55 – Grafy závislosti poměrného prodloužení na síle pro tenzometr SG2..... | 79 |
| Obr. 56 – Grafy závislosti poměrného prodloužení a síly na čase pro tenzometr SG3..... | 80 |
| Obr. 57 – Grafy závislosti poměrného prodloužení na síle pro tenzometr SG3..... | 81 |
| Obr. 58 – Grafy závislosti poměrného prodloužení a síly na čase pro FBG2 | 82 |
| Obr. 59 – Grafy závislosti poměrného prodloužení na síle pro FBG2 | 83 |
| Obr. 60 – Grafy závislosti poměrného prodloužení a síly na čase pro FBG3 | 84 |
| Obr. 61 – Grafy závislosti poměrného prodloužení na síle pro FBG3 | 85 |
| Obr. 62 – Grafy závislosti poměrného prodloužení na čase pro distribuovaný optovláknový snímač..... | 86 |

Seznam tabulek

| | |
|---|----|
| Tab. 1 – Naměřené hodnoty σ_{max} jednotlivých vzorků v MPa..... | 34 |
| Tab. 2 – Naměřené hodnoty σ_h jednotlivých vzorků v MPa | 35 |
| Tab. 3 – Naměřené hodnoty σ_d jednotlivých vzorků v MPa | 36 |
| Tab. 4 – Počet cyklů N jednotlivých vzorků | 36 |
| Tab. 5 – Vyhodnocení analýz rozptylu při únavové zkoušce..... | 36 |
| Tab. 6 – Materiálové charakteristiky lepidla Spabond Gurit 345..... | 43 |
| Tab. 7 – Porovnání výsledků experimentů a MKP modelu pro $F = 7,5$ kN, $E=150011$ MPa..... | 57 |
| Tab. 8 – Porovnání výsledků experimentů a MKP modelu pro $F = 10$ kN, $E=150011$ MPa..... | 57 |
| Tab. 9 – Porovnání výsledků experimentů a MKP modelu pro $F = 7,5$ kN, $E=210000$ MPa..... | 57 |
| Tab. 10 – Porovnání výsledků experimentů a MKP modelu pro $F = 10$ kN, $E=210000$ MPa..... | 57 |
| Tab. 11 – Porovnání výsledků experimentů a analytického modelu pro $F = 7,5$ kN, $E=151011$ MPa..... | 59 |
| Tab. 12 – Porovnání výsledků experimentů a analytického modelu pro $F = 10$ kN, $E=151011$ MPa..... | 59 |
| Tab. 13 – Porovnání výsledků experimentů a analytického modelu pro $F = 7,5$ kN, $E=210000$ MPa..... | 59 |
| Tab. 14 – Porovnání výsledků experimentů a analytického modelu pro $F = 10$ kN, $E=210000$ MPa..... | 59 |
| Tab. 15 – Porovnání experimentálních, analytických a MKP hodnot pro zatěžující sílu 10 kN a Youngův modul adherendů 210000 MPa..... | 62 |

Přílohy

Datasheet použitého lepidla Spabond 345

MIXING AND HANDLING

| PROPERTY | UNITS | Spabond™ 345 RESIN | FAST HARDENER | MIXED SYSTEM | TEST METHOD |
|---------------------|-------------------|--------------------|---------------|--------------|-------------|
| Appearance - colour | Description | Yellow | Black | Dark Grey | - |
| Appearance - form | Description | Thixotropic Paste | | | - |
| Mix ratio by weight | Parts by weight | 100 | 48 | - | - |
| Mix ratio by volume | Parts by volume | 100 | 50 | - | - |
| Density at 21 °C | g/cm ³ | 1.17 | 1.08 | 1.14 | Archimedes |

COMPONENT & MIXED SYSTEM VISCOSITY

| PROPERTY | UNITS | 15°C | 20°C | 25°C | 30°C | TEST METHOD |
|---|---------|-------|-------|-------|-------|-----------------|
| Spabond™ 345 Resin Viscosity | P | 1250 | 1050 | 950 | 700 | - |
| Spabond™ 345 Fast (BL) Hardener Viscosity | P | 450 | 300 | 200 | 150 | - |
| Initial Mixed System Viscosity | P | 520 | 420 | 340 | 270 | - |
| Gel Time (150 g, mixed in water) | hrs.min | 00:39 | 00:28 | 00:20 | 00:15 | - |
| Clamp Time* (time to 2kN cleavage strength) | hrs.min | 07:50 | 05:30 | 03:55 | 02:45 | BS 5350 Part C1 |
| Sag resistance* | mm | 17 | 16 | 15 | 14 | - |

ADHESIVE PERFORMANCE

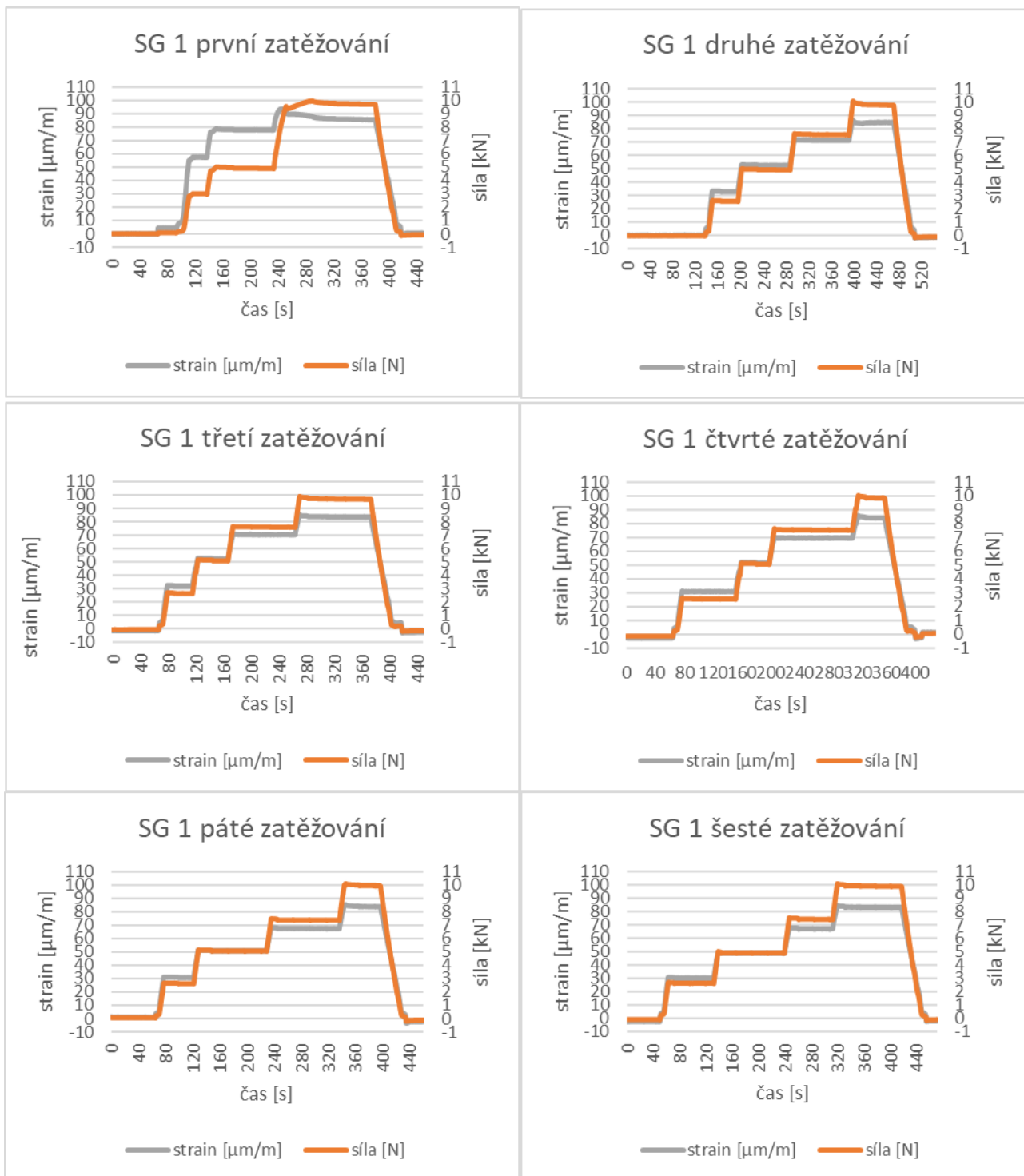
| MECHANICAL PROPERTIES | SYMBOL | UNITS | 28 DAYS AT 21°C | 16 HOURS AT 50°C** | 5 HOURS AT 70°C** | TEST STANDARD |
|-----------------------|-----------------------|-------|-----------------|--------------------|-------------------|-----------------|
| Cleavage on steel | F _{cleavage} | kN | 12 | 12 | 13 | BS 5350 Part C1 |
| Lap shear on steel | τ _{steel} | MPa | 37 | 37 | 42 | BS 5350 Part C5 |

CURED MECHANICAL AND THERMAL PROPERTIES

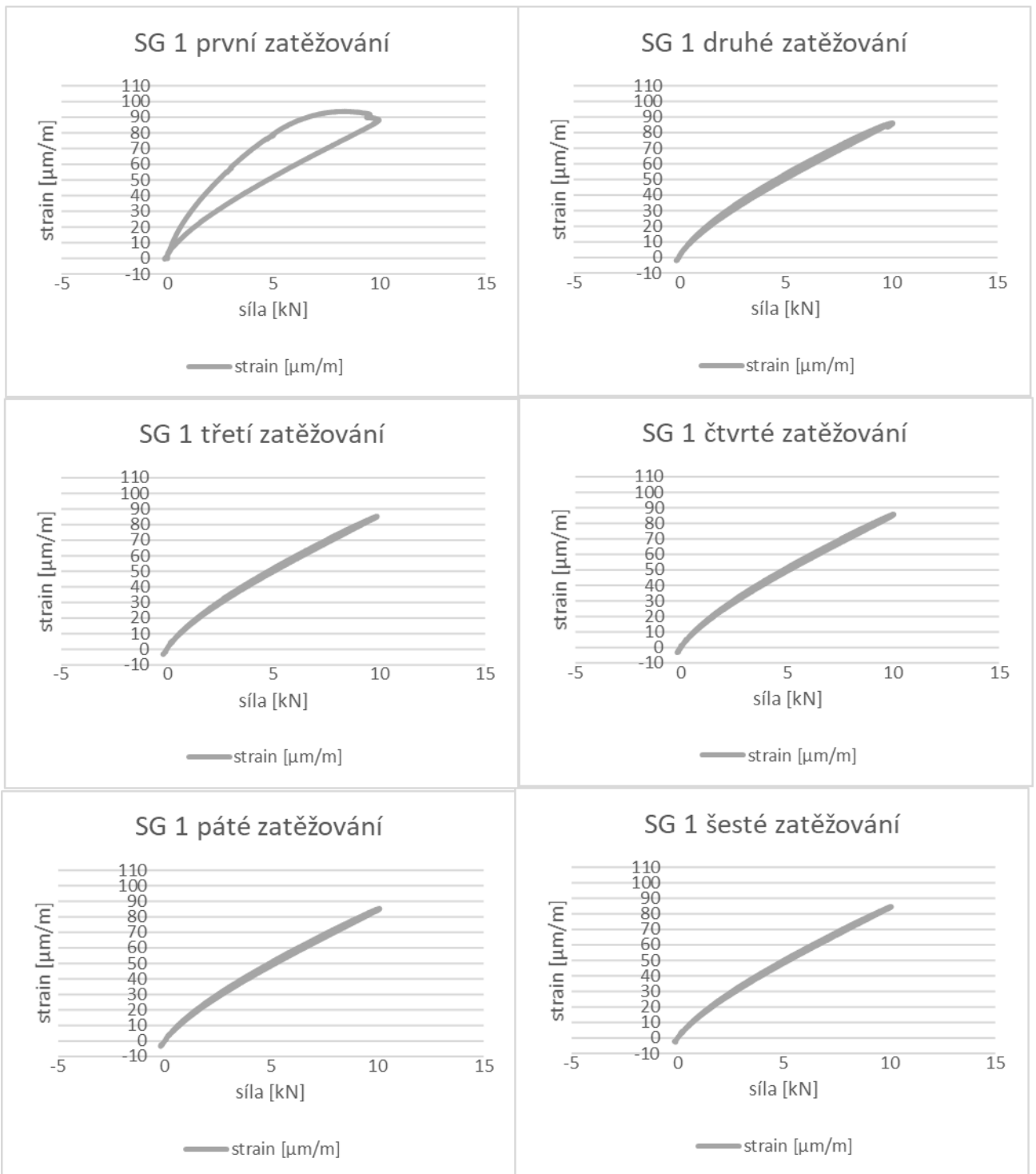
| MECHANICAL PROPERTIES | SYMBOL | UNITS | 28 DAYS AT 21°C | 16 HOURS AT 50°C** | 5 HOURS AT 70°C** | TEST STANDARD |
|------------------------------|------------------|-------------------|-----------------|--------------------|-------------------|----------------|
| Glass Transition Temperature | T _{g1} | °C | 57 | 68 | 76 | ISO 6721 (DMA) |
| Cured Density | P _{dry} | g/cm ³ | - | - | 1.17 | Archimedes |
| Volumetric Shrinkage | | % | - | - | 3.4 | Archimedes |

Obr. 51 – Datasheet lepidla Spabond 345 [38]

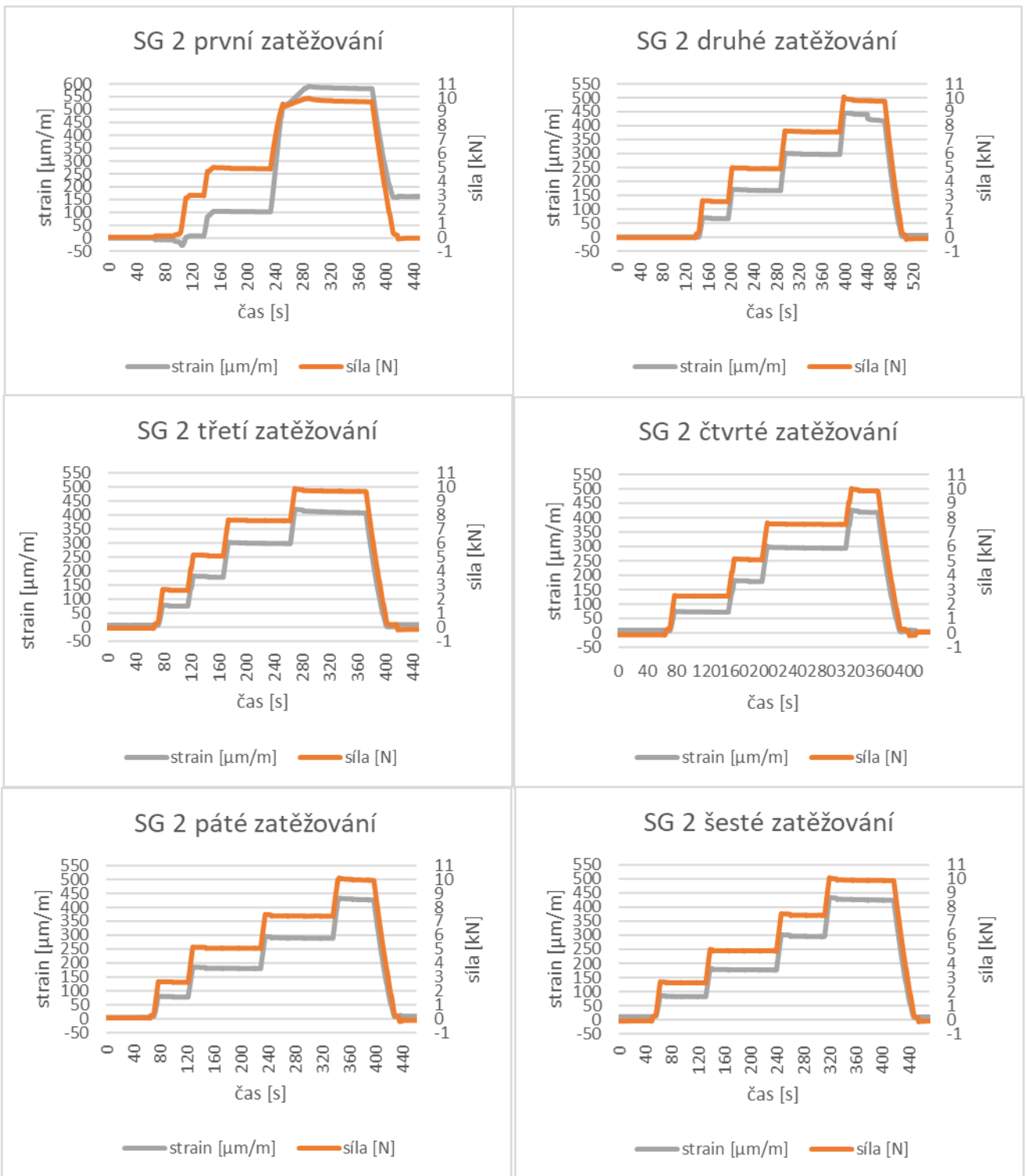
Grafické výstupy z měření



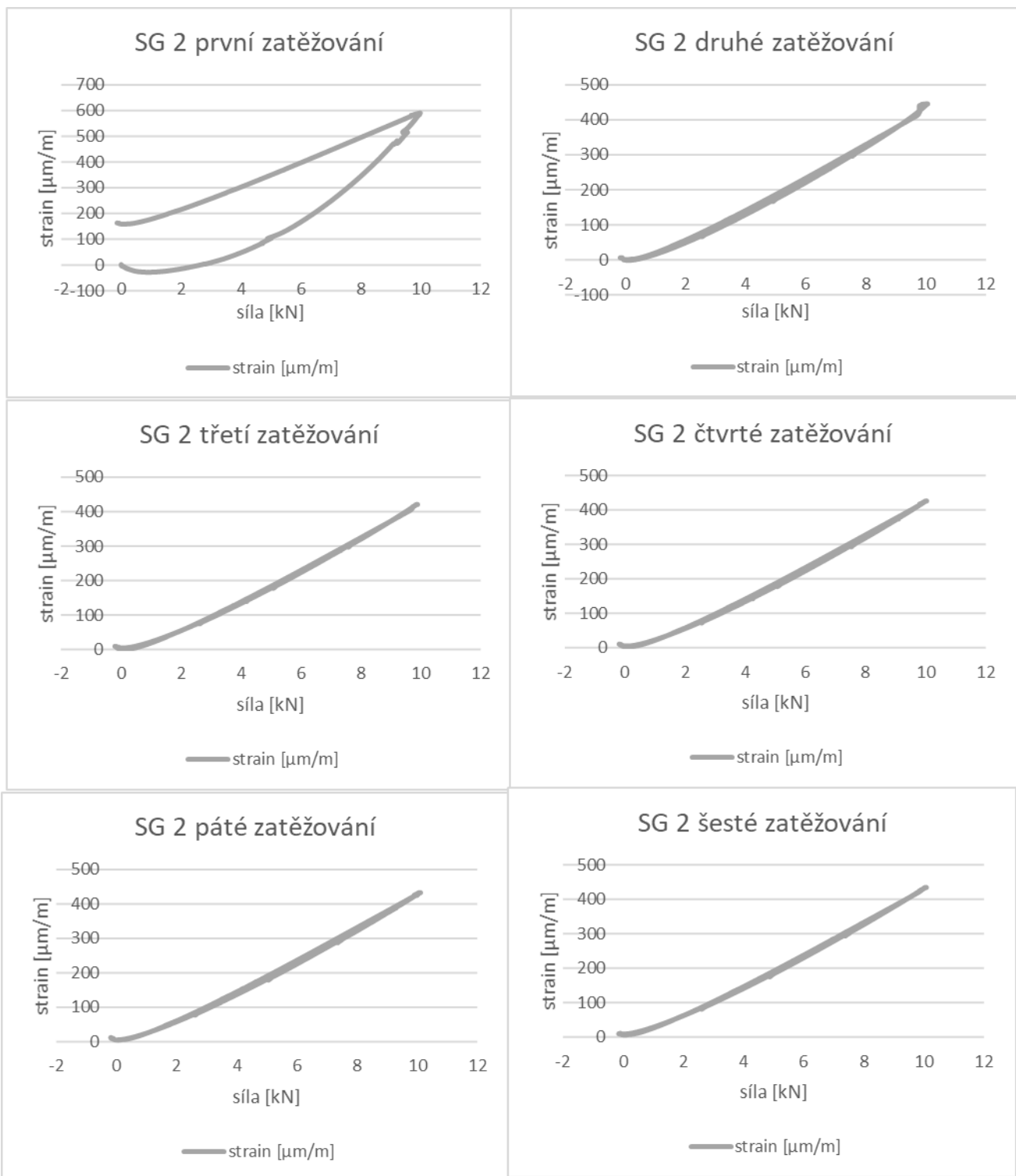
Obr. 52 – Grafy závislosti poměrného prodloužení a síly na čase pro tenzometr SG1



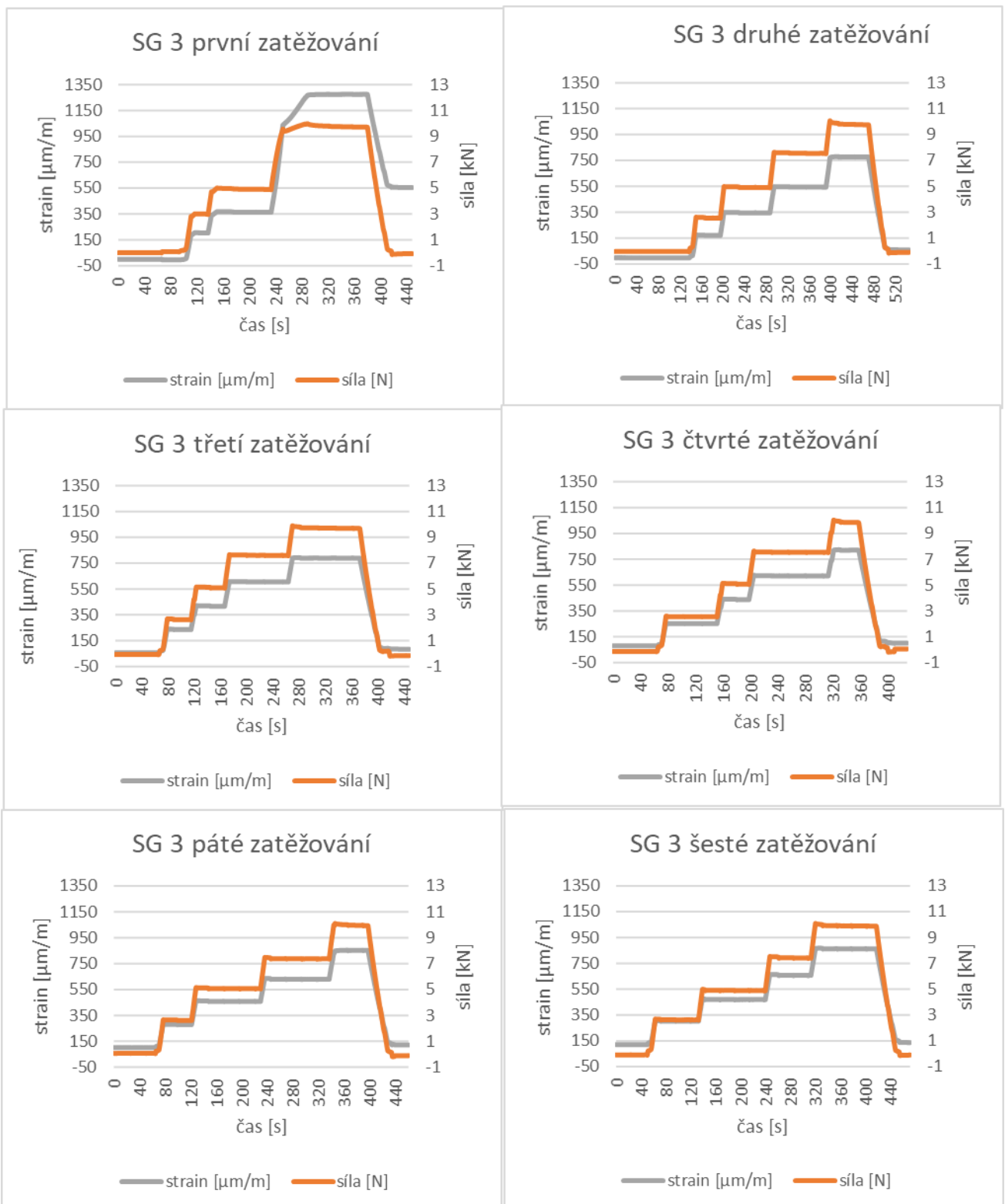
Obr. 53 – Grafy závislosti poměrného prodloužení na síle pro tenzometr SG1



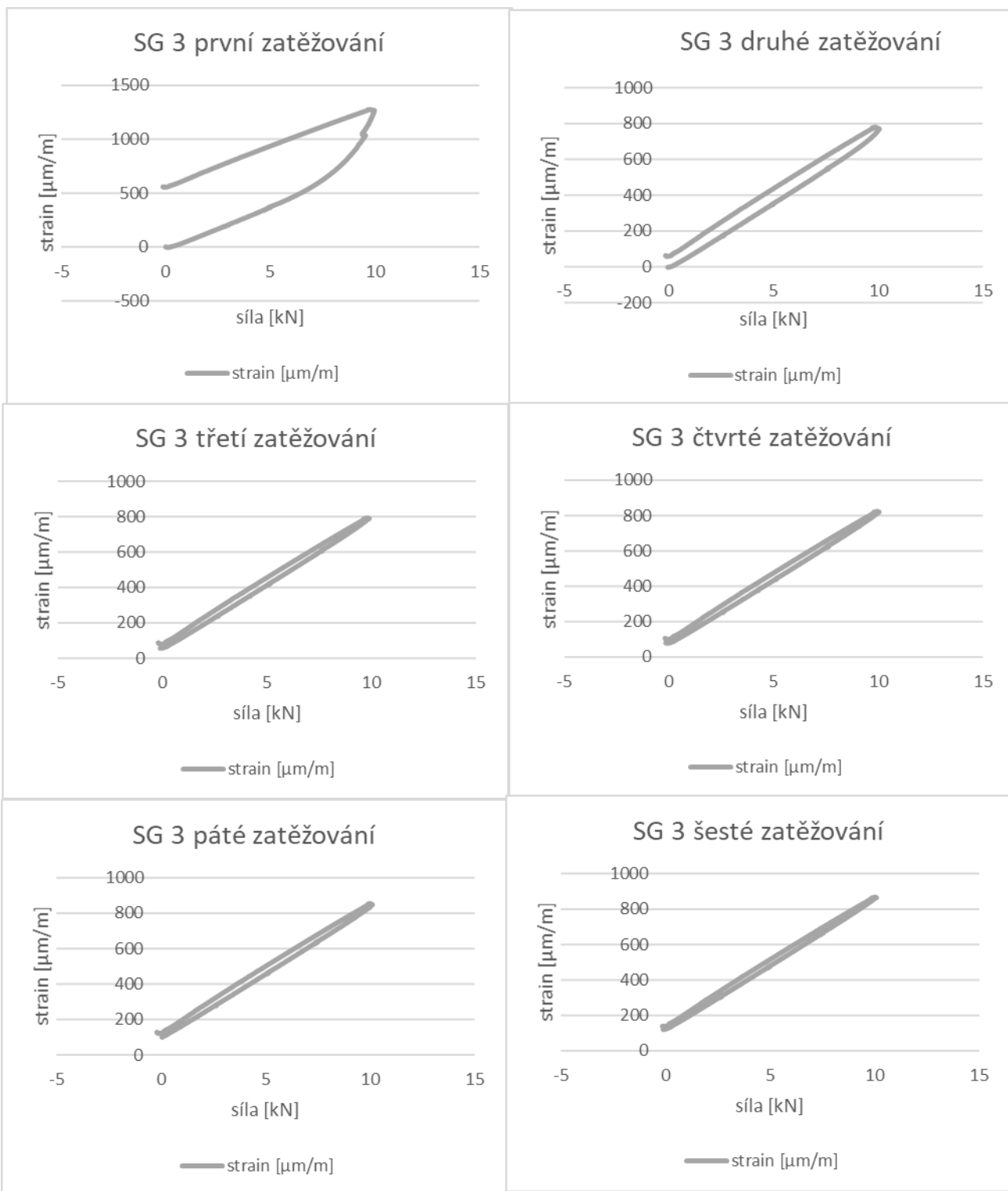
Obr. 54 – Grafy závislosti poměrného prodloužení a síly na čase pro tenzometr SG2



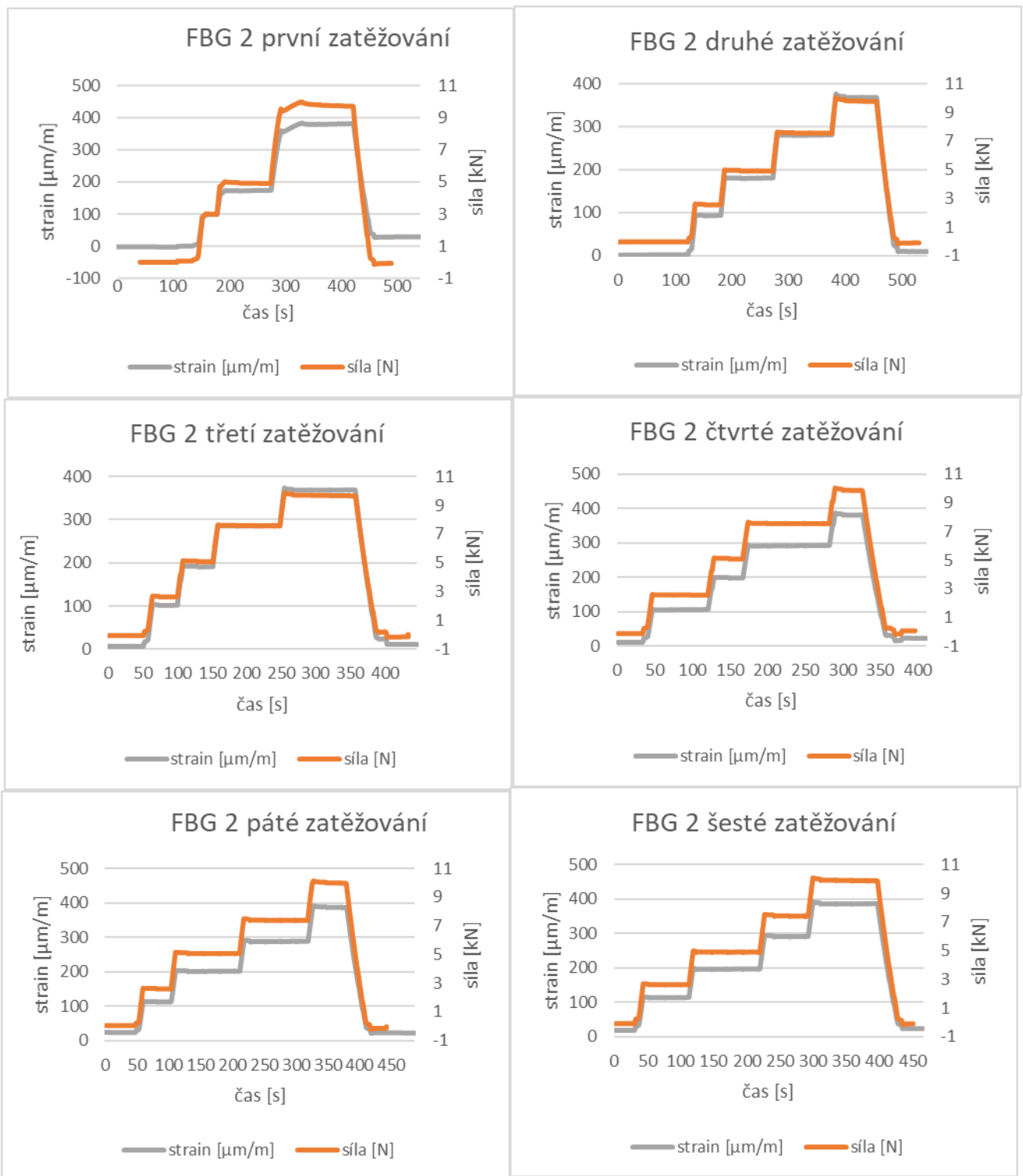
Obr. 55 – Grafy závislosti poměrného prodloužení na síle pro tenzometr SG2



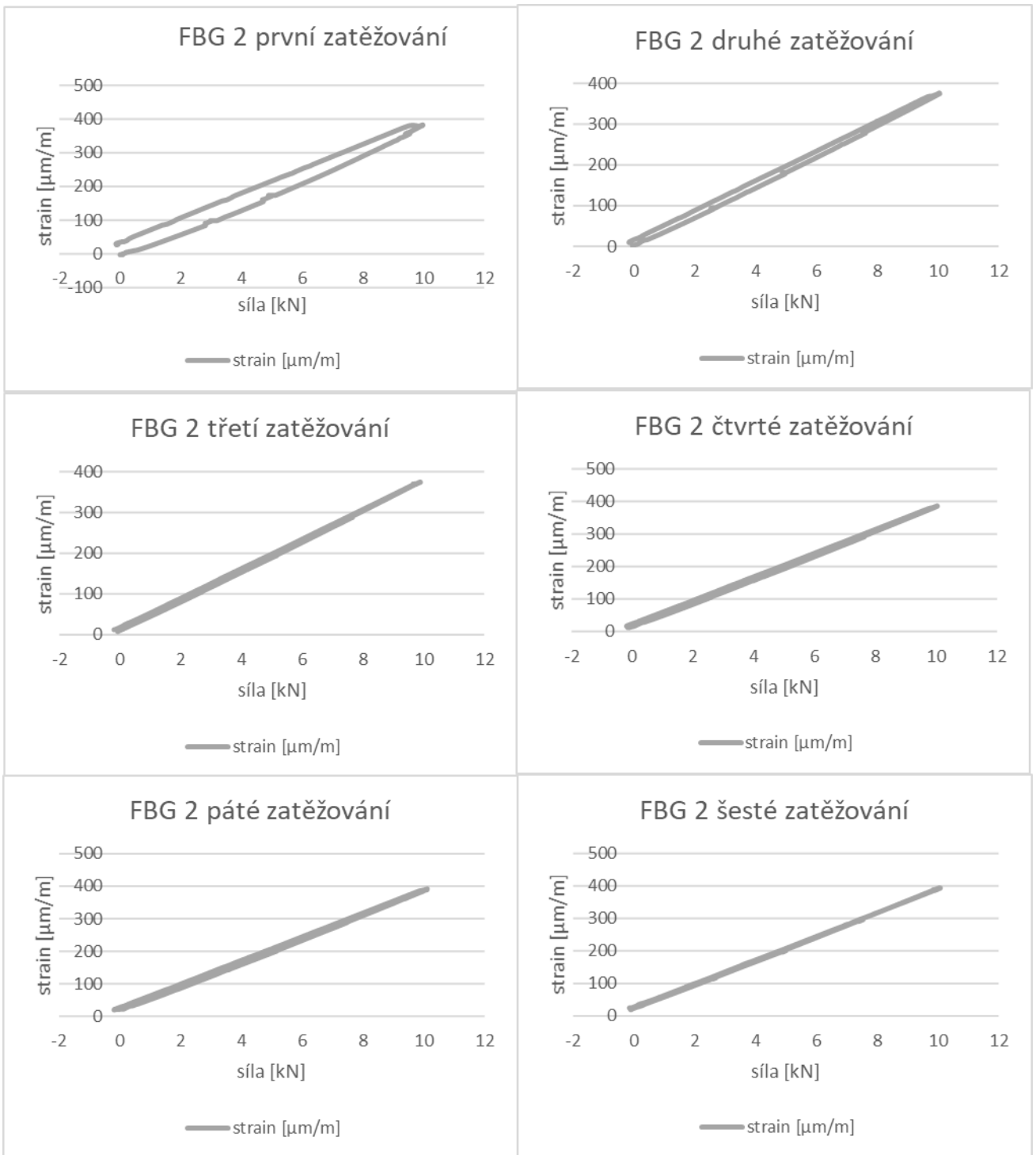
Obr. 56 – Grafy závislosti poměrného prodloužení a síly na čase pro tenzometr SG3



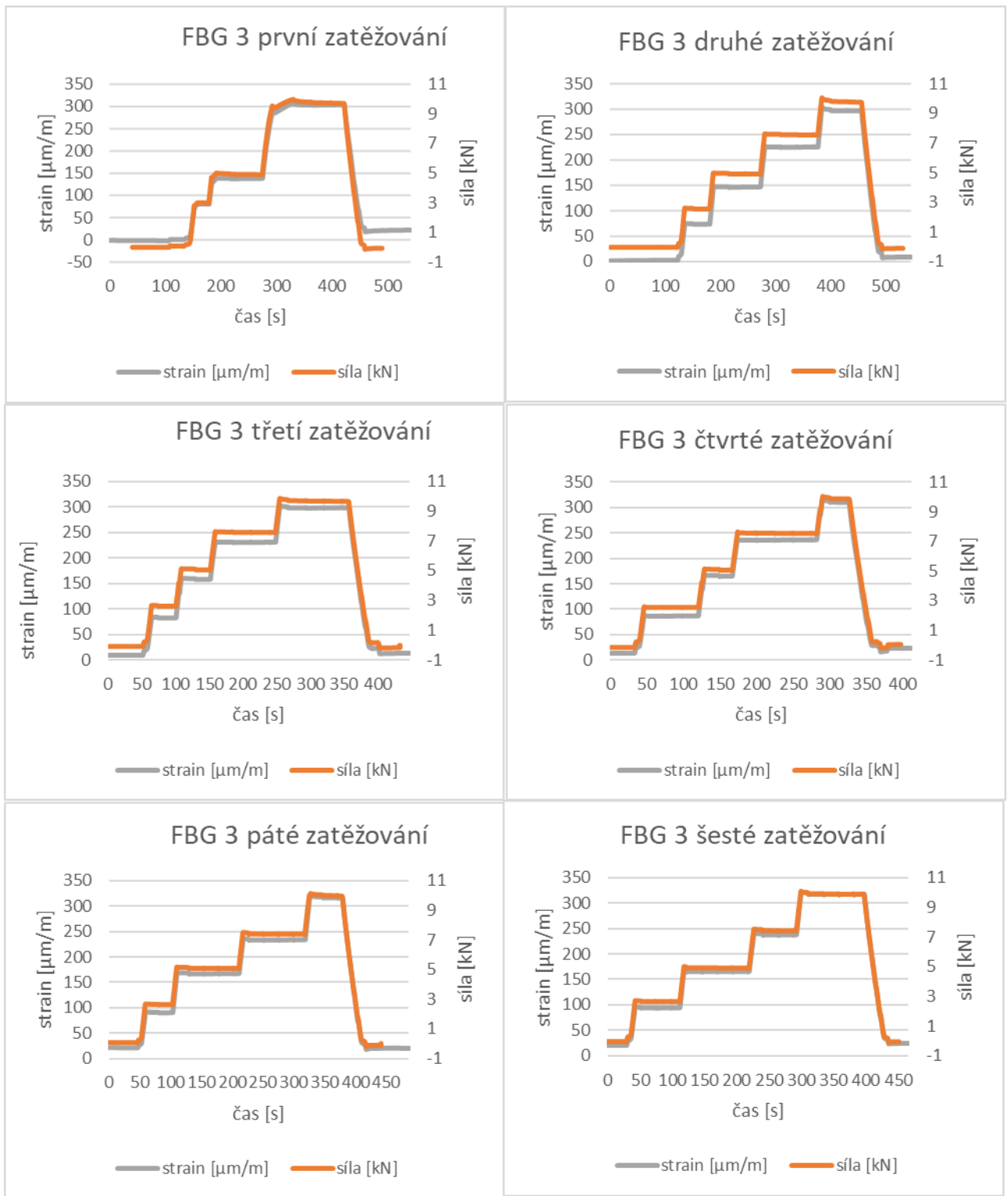
Obr. 57 – Grafy závislosti poměrného prodloužení na síle pro tenzometr SG3



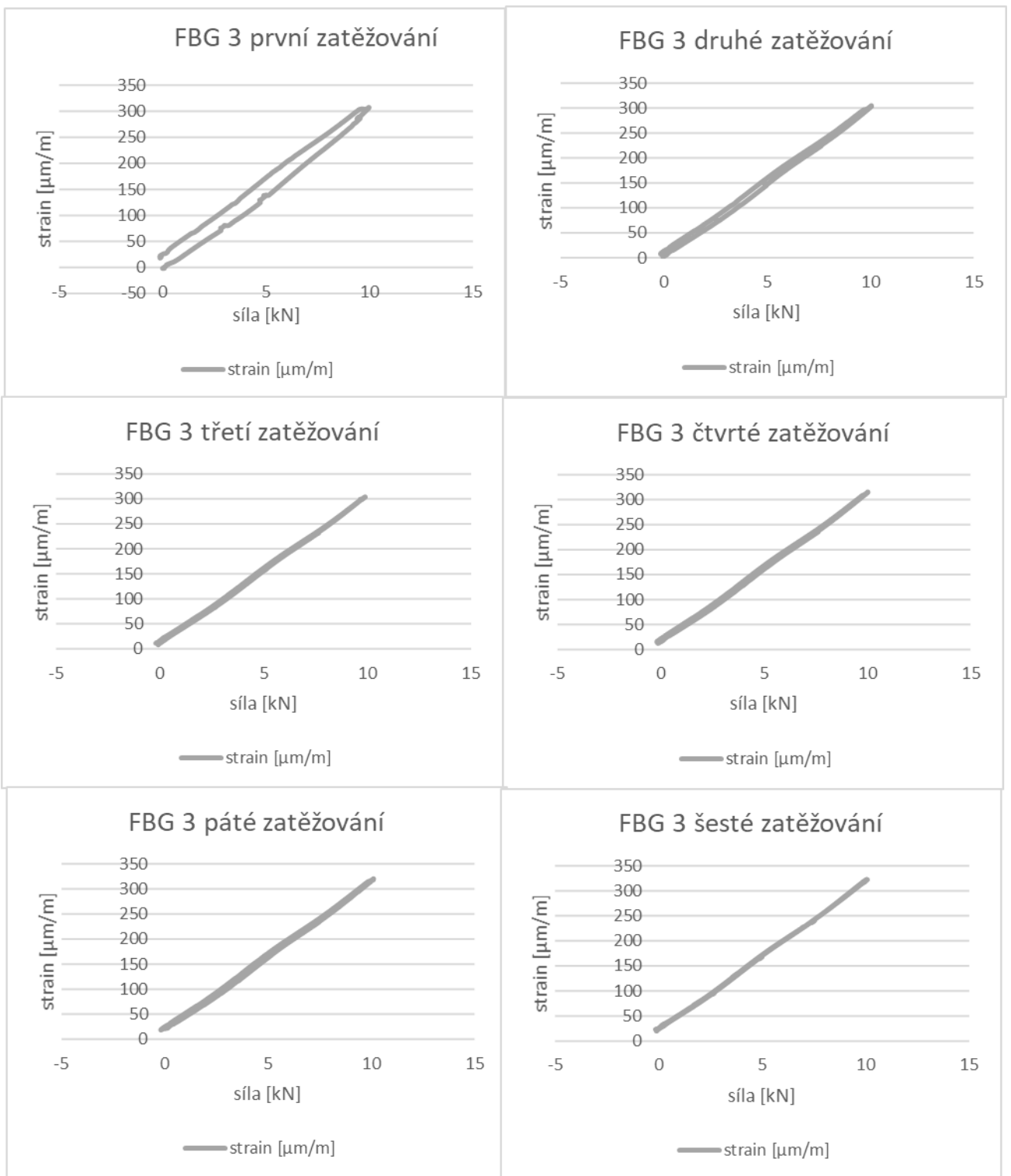
Obr. 58 – Grafy závislosti poměrného prodloužení a síly na čase pro FBG2



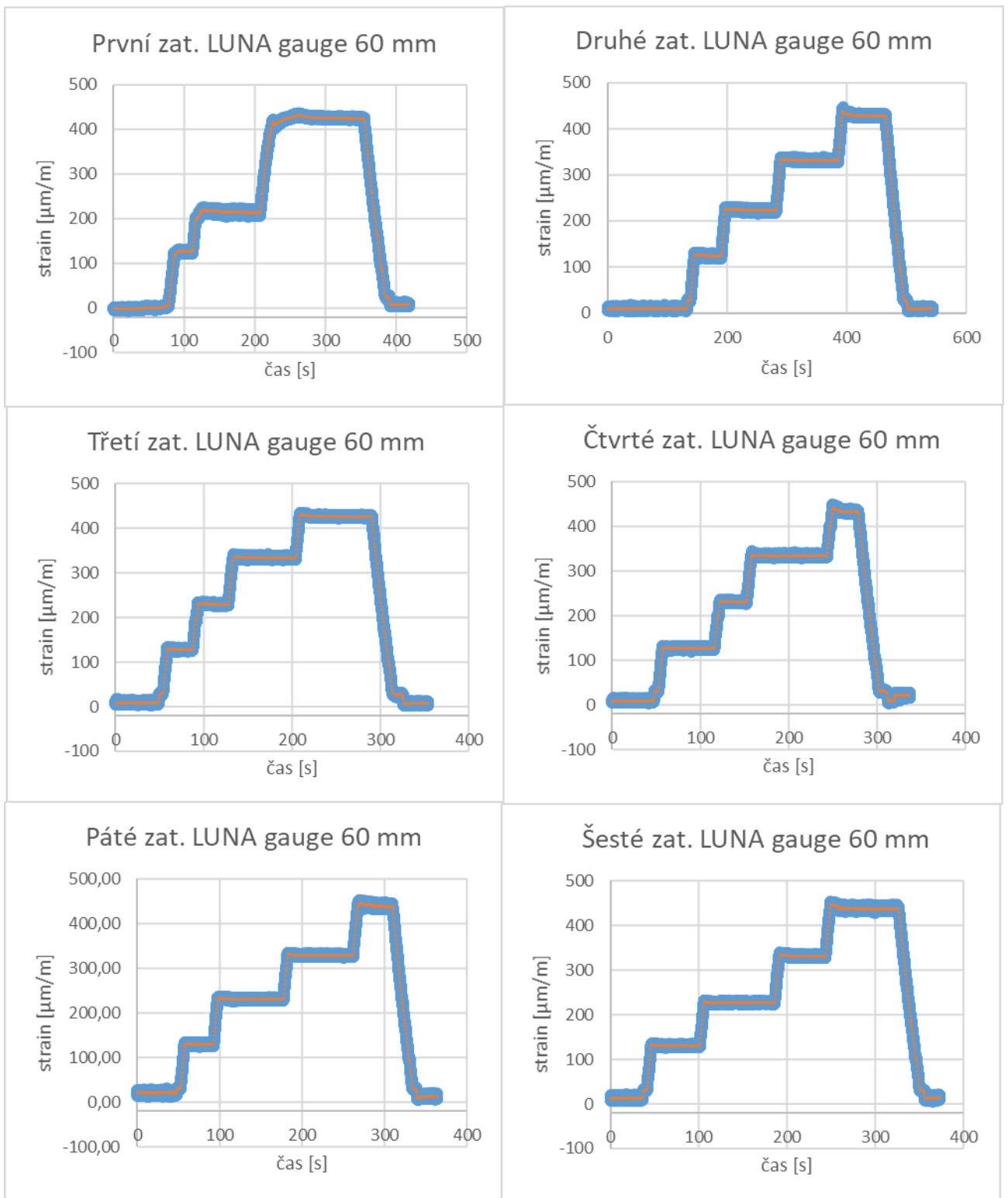
Obr. 59 – Grafy závislosti poměrného prodloužení na síle pro FBG2



Obr. 60 – Grafy závislosti poměrného prodloužení a síly na čase pro FBG3



Obr. 61 – Grafy závislosti poměrného prodloužení na síle pro FBG3



Obr. 62 – Grafy závislosti poměrného prodloužení na čase pro distribuovaný optovláknový snímač