

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta aplikovaných věd

Katedra mechaniky



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Numerický model šroubového spoje kompozitu

Vypracovala: Šárka Veselá

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Jan Krystek, Ph.D.

PLZEŇ, 2015

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci zpracovanou na závěr studia na Fakultě aplikovaných věd Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem zadanou bakalářskou práci zpracovala sama pouze za použití literatury a pramenů, jejichž úplný seznam je její součástí.

V Plzni dne 5.8.2015

.....

Poděkování

Ráda bych poděkovala Ing. Janu Krystkovi, Ph.D., vedoucímu práce, za cenné rady, věnovaný čas, věcné připomínky, trpělivost a příjemné prostředí při konzultacích. Dále bych chtěla poděkovat Ing. Liborovi Loboenskému, Ph.D. za čas strávený během provádění experimentů. A v neposlední řadě děkuji své rodině a přátelům za podporu, bez níž by mé studium na vysoké škole nešlo.

Děkuji.

Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá spoji kompozitních materiálů pomocnými elementy, zejména spojením šroubovým. Teoretická část se zaměřuje na kompozit a problematiku spojů. V praktické části je popsána příprava vzorků a provedené experimenty. Šroubem, maticí a podložkou byly spojeny dva konce laminátových kompozitních desek. Byly testovány desky nejrůznějších geometrií a dvou různých skladeb vrstev laminátu. Vzorky byly spojeny buď šroubem s označením M6, nebo M8. Numerický model spoje byl vytvořen v konečnoprvkovém systému *Abaqus*. K posouzení únosnosti spoje bylo použito Kritérium maximálního napětí. Bylo provedeno porovnání mezi experimenty a numerickými simulacemi pro hodnoty sil prokluzu šroubu a pro mezní síly (únosnosti).

Klíčová slova: experiment, kompozit, Kritérium maximálního napětí, MKP, předeprnutí, šroubový spoj, únosnost spoje.

Abstract

The bachelor thesis is focused on joining composite materials by auxiliary elements especially using screw connection. Theoretical part deals with composites and the issue of joints. In the practical part is described the preparation of samples and experimenting with. Two ends of laminar composite plates are connected by using screw, nut and washer. Boards with various types of geometry were tested, also with two different kind of layers direction. Samples were connected by screw M6 or M8 diameter. Numerical model was created by finite element system *Abaqus*. For strength analyzes of screw joint was used criterion of maximum stress. Experiments and numerical simulation were compared.

Key words: experiment, composite, criterion of maximum stress, FEM, preload, screw joint, load capacity of joint.

Obsah

| | |
|---|-----------|
| Úvod | 1 |
| 1 Kompozitní materiál | 3 |
| 1.1 Kritérium maximálního napětí | 4 |
| 2 Spoj pomocnými elementy | 6 |
| 2.1 Kolíkový spoj | 6 |
| 2.2 Nýtový spoj | 7 |
| 2.3 Šroubový spoj | 7 |
| 2.3.1 Předepnutí šroubového spoje | 8 |
| 3 Experimentální část | 11 |
| 4 Numerický model | 24 |
| Závěr | 33 |
| Použitá literatura | 35 |

Seznam označení

| | | |
|--------------------------------------|-------|--|
| <i>Abaqus</i> | | konečnoprvkový software |
| <i>Atlas Copco - Powerfocus 4000</i> | | řídící jednotka momentového klíče |
| <i>Atlas Copco - tensor ETV</i> | | momentový klíč |
| <i>C</i> | | místo střetu odlehčované a zatěžované větve |
| d_2 | [m] | střední průměr šroubu |
| $D_o = D$ | [m] | průměr díry pro šroub |
| <i>Dantec Dynamics Q-400</i> | | přístroj měřící deformace pomocí digitální korelace obrazu |
| <i>DIC</i> | | Digitální korelace obrazu - způsob měření deformace |
| E | [mm] | kratší vzdálenost volného konce desky k ose díry |
| E_1 | [GPa] | modul pružnosti v tahu ve směru 1 |
| E_2 | [GPa] | modul pružnosti v tahu ve směru 2 |
| E_3 | [GPa] | modul pružnosti v tahu ve směru 3 |
| E_{ocel} | [GPa] | modul pružnosti v tahu pro ocel |
| E_{Al} | [GPa] | modul pružnosti v tahu pro hliník |
| f_1 | [-] | součinitel smykového tření pro kompozit a kompozit |
| f_2 | [-] | součinitel smykového tření pro kompozit a ocel |
| f_3 | [-] | součinitel smykového tření pro ocel a ocel |
| f_h | [-] | součinitel smykového tření mezi maticí a podložkou |
| F | [N] | síla provozní |
| F_1 | [N] | maximální síla ve šroubu |
| F_2 | [N] | minimální síla připadající na spojovaný materiál |
| F_{f_mkp} | [N] | síla prokluzu při simulaci |
| F_{f_exp} | [N] | síla prokluzu při experimentu |
| F_{pp_mkp} | [N] | únosnost šroubového spoje při simulaci |
| F_{pp_exp} | [N] | únosnost šroubového spoje při experimentu |

| | | |
|-----------------------------|----------|--|
| F_P | [N] | předepínací síla |
| FI | [-] | index porušení |
| G_{12} | [GPa] | smykový modul pružnosti v rovině 12 |
| G_{13} | [GPa] | smykový modul pružnosti v rovině 13 |
| G_{23} | [GPa] | smykový modul pružnosti v rovině 23 |
| H | [mm] | tloušťka desky |
| <i>HexPly 931C-HTS(12k)</i> | | typové označení prepregu |
| k_1 | [-] | bezpečnost šroubu |
| k_2 | [-] | bezpečnost spojovaného materiálu |
| L | [mm] | vzdálenost čelistí od osy spoje |
| l_o | [mm] | měřená oblast extenzometru |
| $M6$ | | označení závitu pro šroub o průměru 6 mm |
| $M8$ | | označení závitu pro šroub o průměru 8 mm |
| M_U | [Nm] | moment utažení šroubu |
| <i>Matlab</i> | | skriptovací programovací jazyk |
| <i>MKP</i> | | metoda konečných prvků |
| p | [-] | stoupání závitu |
| <i>Python</i> | | programovací a skriptovací jazyk |
| s | [m] | průměr hlavy šroubu |
| S_{12} | [MPa] | smyková pevnost pro rovinu 12 |
| S_{13} | [MPa] | smyková pevnost pro rovinu 13 |
| S_{23} | [MPa] | smyková pevnost pro rovinu 23 |
| <i>Tenax HTS 5631</i> | | typové označení uhlíkových vláken |
| v | [mm/min] | rychlost zatěžování vzorku |
| W | [mm] | šířka desky |
| X_C | [MPa] | pevnost v tlaku ve směru vláken |
| X_T | [MPa] | pevnost v tahu ve směru vláken |
| Y_C | [MPa] | pevnost v tlaku příčně na vlákna |
| Y_T | [MPa] | pevnost v tahu příčně na vlákna |
| Z_C | [MPa] | pevnost v tlaku kolmo na vrstvu vláken |
| Z_T | [MPa] | pevnost v tahu kolmo na vrstvu vláken |
| <i>Zwick/Roell Z050</i> | | zkušební trhací stroj |
| α | [°] | úhel stoupání závitu |

| | | |
|--------------|-------|--|
| α_1 | [°] | tangenta tuhosti 1 |
| α_2 | [°] | tangenta tuhosti 2 |
| ν_{12} | [-] | Poissonovo číslo pro rovinu 12 |
| ν_{13} | [-] | Poissonovo číslo pro rovinu 13 |
| ν_{23} | [-] | Poissonovo číslo pro rovinu 23 |
| ν_{ocel} | [-] | Poissonovo číslo pro ocel |
| ν_{Al} | [-] | Poissonovo číslo pro hliník |
| ϕ | [-] | třecí úhel v závitu |
| σ_1 | [MPa] | normálové napětí ve směru 1 |
| σ_2 | [MPa] | normálové napětí ve směru 2 |
| τ_{12} | [MPa] | smykové napětí v rovině 12 |
| ΔF_1 | [N] | část síly F připadající na šroub |
| ΔF_2 | [N] | část síly F připadající na spojovaný materiál |
| Δl_c | [m] | celková deformace šroubového spoje |
| Δl_F | [m] | deformace šroubu a spojovaných materiálů od síly F |
| Δl_1 | [m] | prodloužení šroubu |
| Δl_2 | [m] | stlačení spojovaných materiálů |
| ψ | [-] | součinitel proti odlehnutí |
| φ_1 | [°] | úhel vláken na vnějších vrstvách desky 1 |
| φ_2 | [°] | úhel vláken na vnějších vrstvách desky 2 |
| φ_U | [°] | úhel dotažení |

Seznam obrázků

| | | |
|-----|--|----|
| 1.1 | Jednosměrový kompozit. | 4 |
| 1.2 | Rovinná úloha. | 5 |
| 1.3 | Mezní křivka pevnosti. | 5 |
| 2.1 | Kolíkový spoj. | 6 |
| 2.2 | Nýtový spoj. | 7 |
| 2.3 | Šroubový spoj. | 8 |
| 2.4 | Montážní - pracovní diagram. | 9 |
| 3.1 | Snímek z laboratoře během testování vzorků. | 11 |
| 3.2 | Schéma experimentu. | 12 |
| 3.3 | Značení geometrických parametrů. | 13 |
| 3.4 | Graf závislosti síly na posunutí pro vzorky s dírou pro šroub M6. | 15 |
| 3.5 | Graf a podgrafy závislosti síly na posunutí pro vzorky s dírou pro šroub M8. | 20 |
| 3.6 | Graf závislosti síly na posunutí hliníkových vzorků. | 21 |
| 3.7 | Vzorek číslo 15 - porušení desky přetrhnutím | 22 |
| 3.8 | Vzorek číslo 14 - porušení otláčením | 23 |
| 4.1 | Síť konečnoprvkového modelu. | 25 |
| 4.2 | Graf závislosti síly na čase pro vzorek č.4 - numerická simulace. | 30 |
| 4.3 | Deformace ve směru x, z/1, 3 - vzorek číslo 7. | 30 |

Seznam tabulek

| | | |
|-----|--|----|
| 3.1 | Skladby vrstev laminátu. | 13 |
| 3.2 | Rozměry vzorků s dírou pro šroub M6. | 14 |
| 3.3 | Rozměry vzorků s dírou pro šroub M8. | 16 |
| 3.4 | Rozměry hliníkových vzorků s dírou pro šroub M6. | 17 |
| 3.5 | Hodnoty z montáže předepnutí pro šroub s dírou M6. | 17 |
| 3.6 | Hodnoty z montáže předepnutí pro šroub s dírou M8. | 18 |
| 3.7 | Hodnoty z montáže předepnutí hliníkových vzorků pro šroub s dírou M6. | 19 |
| 4.1 | Materiálové parametry kompozitu. | 25 |
| 4.2 | Materiálové parametry oceli. | 26 |
| 4.3 | Materiálové parametry hliníku. | 26 |
| 4.4 | Pevnosti kompozitu. | 27 |
| 4.5 | Porovnání síly prokluzu z experimentu a simulace pro desky s dírou pro šroub M6. | 28 |
| 4.6 | Porovnání síly prokluzu z experimentu a simulace pro desky s dírou pro šroub M8. | 29 |
| 4.7 | Porovnání síly prokluzu z experimentu a simulace pro hliníkové desky. | 29 |
| 4.8 | Porovnání síly potřebné k porušení laminátu z experimentu a simulace pro desky s dírou pro šroub M6. | 31 |
| 4.9 | Porovnání síly potřebné k porušení laminátu z experimentu a simulace pro desky s dírou pro šroub M8. | 32 |

Úvod

V současné době, nároky na materiály stoupají a do popředí se dostává jeden z nekonvenčních materiálů, kompozitní materiál. Je žádána levná a jednoduchá výroba společně s možností volby vlastností materiálu aj. Proto se v různých odvětvích průmyslu stále častěji využívá právě kompozitní materiál. Cena kompozitu vzhledem k rozvoji nejrůznějších technologií výroby a hojnějšímu využívání neustále klesá, a tak se stává pro konstrukční inženýry více atraktivnější. Především kvůli jeho vlastnostem, které si může konstruktér v rámci mezí navrhnout dle potřeby. Z počátku se kompozity využívaly hlavně v leteckém a kosmickém průmyslu. Ale dnes už je můžeme nalézt v automobilovém průmyslu (např. jako trupy metra), ve zdravotnictví, kde jsou využívány v protetice, v nejrůznějších sportovních potřebách a náčiní, dále ve výrobních strojích či energetice. Kompozity nabízí v porovnání s jinými materiály výhody jako nízkou hmotnost, vysokou pevnost a tuhost, odolnost vůči korozi, tepelnou či chemickou odolnost, ohnivzdornost nebo směrově orientované vlastnosti. [1], [4]

Implementace kompozitového komponentu do soustavy je nejproblematictější úsekem při jeho užití. Často se využívá spojení pomocnými elementy, jedním z nich je šroubový spoj, kterému se věnuje tato práce.

Cílem práce bylo vytvořit konečnoprvkový numerický model šroubového spoje a vyhodnotit jeho únosnost. Numerickou simulací provést pevnostní analýzu spoje pomocí Kritéria maximálního napětí. Výsledky ze simulace ověřit experimentální zkouškou.

První kapitola se věnuje kompozitním materiálům. Popisuje jejich základní vlastnosti a parametry, charakterizuje vícevrstvý kompozit. V podkapitole je uvedeno Kritérium maximálního napětí a vysvětlen jeho princip.

V následující kapitole jsou uvedeny spoje pomocnými elementy spojující dvě a více struktury. Tyto elementy tvoří kolík, nýt a šroub. Hromadně se označují jako *bolted joints*. Ke každému z nich jsou uvedeny základní vlastnosti, z jakých komponent se spoj skládá, zda je či není rozebíratelný a jaké veličiny přenáší. Šroubový spoj je rozšířen o podkapitolu, která se věnuje teorii předepnutí šroubu. Jsou zde uvedeny základní vztahy pro určení předepínací síly.

Dílčím cílem bylo provést experimentální zkoušku, která je popsána ve třetí kapitole. Ta se věnuje výrobě a přípravě testovaných vzorků. Jsou zde uvedeny jejich geometrické a materiálové vlastnosti. Obsahuje popis procesu testování a vyhodnocení výsledků, které jsou uvedeny v závěru této kapitoly.

Poslední kapitola věnuje pozornost numerické simulaci experimentů a analýze porušení laminátu. Výsledky experimentů z předchozí kapitoly sloužily k porovnání získaných dat ze simulace a validaci numerického modelu. K analýze únosnosti bylo použito Kritérium maximálního napětí.

Kapitola 1

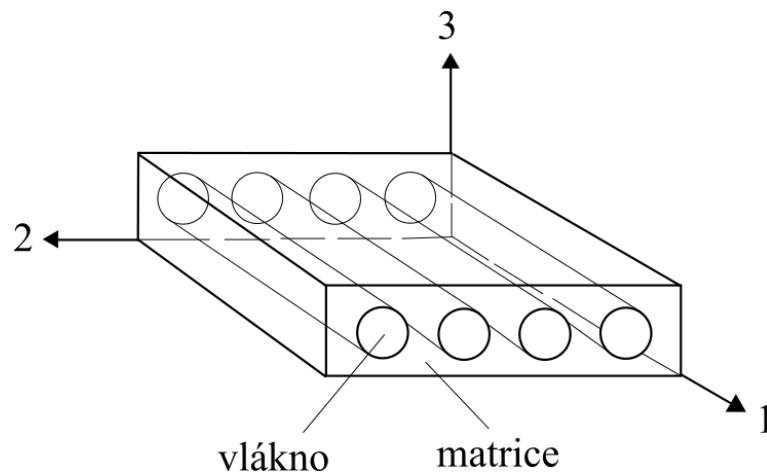
Kompozitní materiál

Tvůrci kompozitních materiálů se inspirovali kompozitním uspořádáním struktur v přírodě. Taková uspořádání se běžně vyskytují u organických materiálů a struktur, které jsou vystaveny výraznému mechanickému zatěžování, např. dřevo, tkáň apod.

První náznaky kompozitů se objevují 800 let př. n. l., kdy se ke konstrukcím staveb používaly pevné cihly z hlíny a slámy. Vědomě se jich začalo více využívat až v minulém století při druhé světové válce, kde jejich cílem bylo zvýšit výkonové parametry letadel a raket.

Kompozit je materiál složený ze dvou či více složek, každá z nich má rozdílné vlastnosti. Nejčastěji se využívají vláknové kompozity. Jsou vyztužené podélnými vlákny především z uhlíku, skla nebo aramidů. Ty tvoří tvrdší a tužší složku. Vlákna bývají spojena podélnou složkou, maticí (například z epoxidové pryskyřice). A právě vhodná kombinace vláken s maticí dodává materiálu unikátní vlastnosti, kterých jiné materiály nedosahují. Touto cestou lze získat naprosto jedinečný materiál.

Jednovrstvé kompozity jsou tvořeny z jedné tenké vrstvy s vlákny orientovanými v jednom směru. Taková vrstva se nazývá lamina. Vícevrstvý kompozit je označován za laminát. Ten se skládá z několika takovýchto tenkých různě orientovaných jednosměrových vrstev (lamin). Vhodnou skladbou orientovaných lamin lze dosáhnout žádoucích vlastností. Směr orientace vláken laminy je dán směrem vláken. Ten se označuje indexem 1 (Obrázek 1.1). Směr ve vrstvě kolmý na vlákna se označuje indexem 2, směr kolmý na předešlé dva se značí indexem 3. Na takový materiál lze pohlížet jako na příčně izotropní materiál, popsán pěti nezávislými materiálovými parametry. [4]



Obrázek 1.1: Jednosměrový kompozit.

1.1 Kritérium maximálního napětí

Pevnostní podmínky nelze chápat jako univerzální kritéria, která lze aplikovat na různé materiály a různé typy napjatosti v namáhané oblasti tělesa. Důležité je vhodně zvolit kritérium porušení na základě zkušeností, znalostí či doporučení, které efektivně dojde k řešení úlohy příslušnou pevnostní podmínkou.

Pro posouzení pevnosti bylo v této práci použito Kritérium maximálního napětí. Jedná se o jedno z nejzákladnějších kritérií. Kritérium maximálního napětí je neinteraktivní makromechanické kritérium. Jistým nedostatkem je tedy chybějící vyjádření vztahu mezi normálovými a normálovými a smykovými složkami napětí. To hraje podstatnou roli při víceosém namáhání a je potřeba na to brát ohled, nicméně je to pro svoji jednoduchost jedno z nejpoužívanějších kritérií.

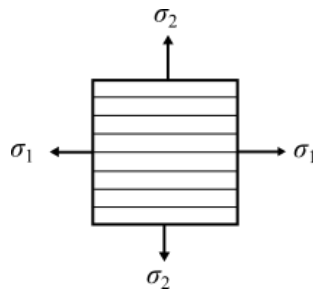
Kritérium vychází z podmínek pevnosti pro homogenní izotropní materiál, kde došlo k rozšíření a upravení. Předpokládá se, že materiál je homogenní, to znamená, že se nerozlišuje matrice a vlákno, a lineární napětí se uvažuje až do okamžiku porušení.

Podle teorie kritéria maximálního napětí dochází k porušení v okamžiku, když některá ze složek napětí dosáhne příslušné meze pevnosti materiálu. Pevnostní podmínku je možné psát ve tvaru šesti nerovnic:

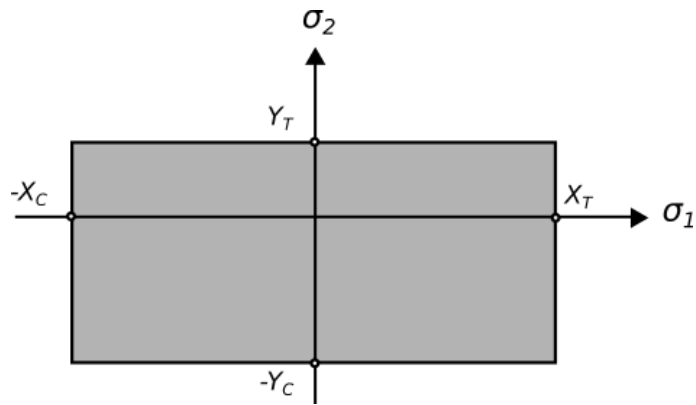
$$\begin{aligned}
-X_C < \sigma_1 < X_T, \\
-Y_C < \sigma_2 < Y_T, \\
-S_{12} < \tau_{12} < S_{12}.
\end{aligned}
\tag{1.1}$$

V případě nesplnění jedné z nerovností dochází k porušení materiálu. [4]

Mezní křivka pevnosti pro rovinnou úlohu za předpokladu $\tau_{12} = 0$ (Obrázek 1.2) má tvar obdélníku (Obrázek 1.3).



Obrázek 1.2: Rovinná úloha [4].



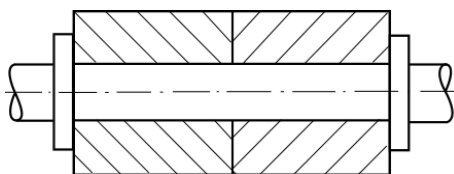
Obrázek 1.3: Mezní křivka pevnosti [4].

Kapitola 2

Spoj pomocnými elementy

Pomocnými elementy se chápá spojení kolíkem, nýtem a šroubem, v anglické terminologii se tato spojení hromadně označují jako *bolted joints*. Takovéto spoje dvou a více struktur přenášejí napětí za pomoci upevňovacích prvků, obecně jsou popisovány jako mechanické klouby. To je rozdíl od adhezivně lepených spojů, kde se přenášené zatížení vstřebává do vrstvy lepidla. Mechanicky kotvené spoje jsou požadovány například v případech, které s sebou nesou případnou nutnost demontáží komponent. [6]

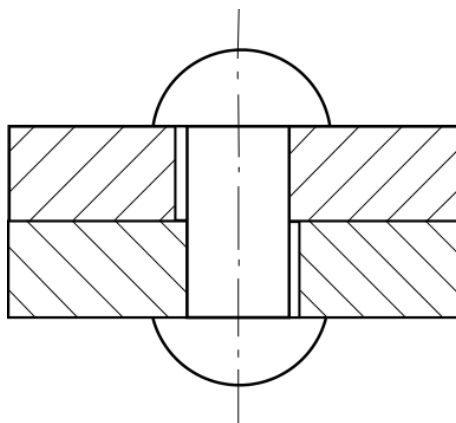
2.1 Kolíkový spoj



Obrázek 2.1: Kolíkový spoj.

Jedná se o spojení tvarovým stykem. Kolík je usazen do jedné nebo více součástí s předpětím (Obrázek 2.1). Tento typ spoje je velmi jednoduchý, levný, a proto je velmi hojně používán. Umožňuje pevné a nepohyblivé spojení, které může spojovat i rotační součásti. Kolíky se můžou používat i jako pojistné spojení. Spoj je rozebíratelný, ale demontáž snižuje jeho spolehlivost. Z velké části se jedná o normalizované spojovací komponenty. Kolík je zejména namáhán stříhem a otláčením boku po své délce. [5]

2.2 Nýtový spoj

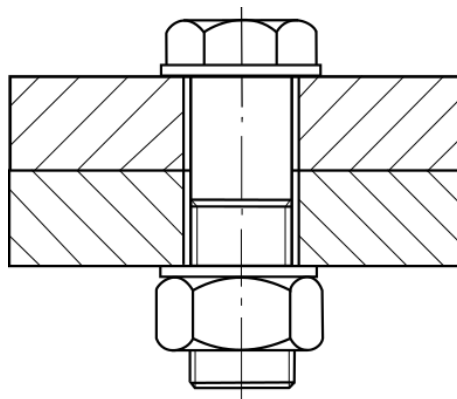


Obrázek 2.2: Nýtový spoj.

Nýtování představuje nerozebíratelné spojení dvou nebo více členů (Obrázek 2.2). Zaručuje spolehlivost a snadnou kontrolovatelnost [5]. Nýt před spojením materiálů se skládá z hlavy a dřívku. Po zasunutí dřívku do otvorů spojovaných materiálů musí hlava překrývat okraj otvoru v dostatečné ploše. Na druhé straně se na volném konci dřívku vykovává závěrečná hlava [3]. Spojovaný materiál je nýtovými dírami zeslaben a nezaručuje přesnou vzájemnou polohu spojovaných součástí. [5]

2.3 Šroubový spoj

Nejčastěji používané rozebíratelné spoje jsou spoje šroubové. Jsou tvořeny spojením šroubu, matice a podložkou (nemusí být součástí spoje) skrz díru ve spojovaném materiálu (Obrázek 2.3). Většinou se používají normované součásti tohoto třídílného spoje. Normované šrouby a matice se ve velké míře vyrábějí z konstrukčních, ušlechtilých a nízkolegovaných ocelí. Šroubové spoje se dělí podle způsobu zatížení. V této práci se bude pracovat s předepnutým šroubovým spojem. To je každý spoj, kde je matice utahena určitým utahovacím (kroutícím) momentem. Díky tomu vzniklo ve šroubu předpětí (osová



Obrázek 2.3: Šroubový spoj.

tahová síla). Šroub tak může být namáhan staticky i dynamicky. [5]

2.3.1 Předepnutí šroubového spoje

Při utahování šroubového spoje (při předepínání) dochází ke stlačování spojovaného materiálu mezi šroubem a maticí a samotný šroub se tak prodlužuje. Ve spoji tedy vzniká předepínací síla F_P (Obrázek 2.4). Po zavedení provozního statického zatížení F dále dochází k prodlužování šroubu - k zatěžování - o hodnotu Δl_F . Nicméně spojovaný materiál je naopak odlehčován o stejnou hodnotu Δl_F .

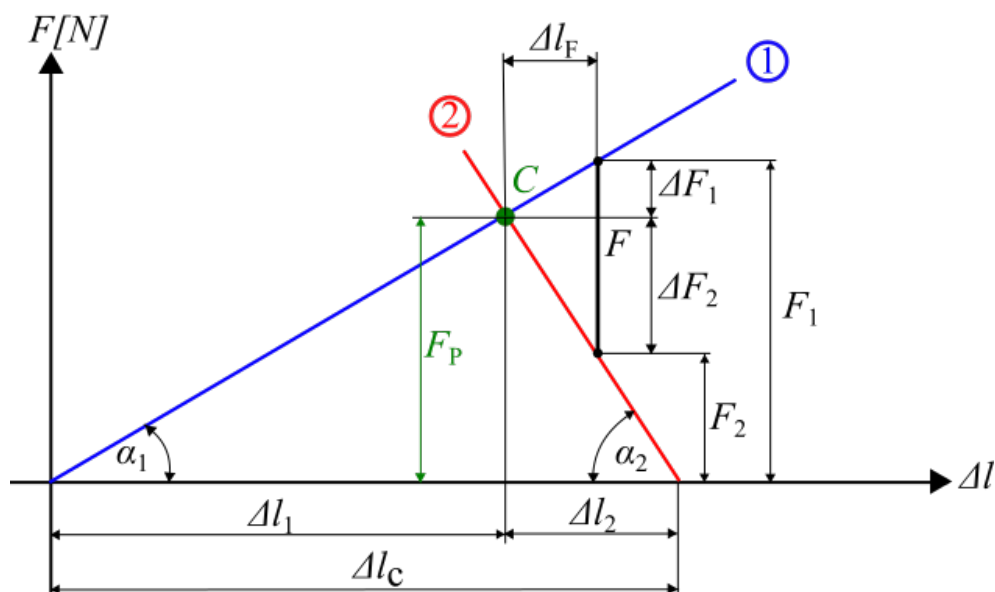
Montáž předepnutého spoje lze provádět například momentovým klíčem nebo měřením v úhlu kroucení, obě tyto možnosti jsou ale nepřesné kvůli vymezení vŮlí ve spoji. Vhodnější metodou by mělo být ohřátí šroubu. Při předepínání se šroubový spoj chová jako pružiny řazené sériově, při zatížení spoje po předepnutí se chová jako pružiny řazené paralelně.

Závislosti pro odčítání hodnot sil a posuvů znázorňuje Montážní - pracovní diagram (Obrázek 2.4). Za předpokladu lineární závislosti síly a posuvu (platí Hookův zákon) odpovídá popisu šroubu dráha pod úhlem α_1 a popisu spojovaného materiálu dráha pod úhlem α_2 . Z tuhostí komponentů je možné určit oba úhly. [2]

Pro výpočet předpínací síly jsou zde uvedeny dva postupy. První souvisí s Montážní - pracovní diagramem (Obrázek 2.4), kde se nejprve vypočítají jednotlivé podíly sil ze síly F připadající na šroub ΔF_1 a spojované materiály ΔF_2 závislé na tuhostech šroubu i částí.

Následně pak maximální sílu ve šroubu F_1 a minimální sílu ve spojovaných materiálech F_2 vztahem (2.1). Po dosazení vypočítaných sil do vztahu (2.2) se získá výsledná předpínací síla.

- ① zatěžovaná větev
- ② odlehčovaná větev



Obrázek 2.4: Montážní - pracovní diagram.

$$\begin{aligned}\Delta F_1 &= F \frac{k_1}{k_1 + k_2}, \\ \Delta F_2 &= F \frac{k_2}{k_1 + k_2}, \\ F_1 &= (1 + \psi)F, \\ F_2 &= \psi F,\end{aligned}\tag{2.1}$$

$$\begin{aligned}F_p &= F_1 - \Delta F_1 \\ F_p &= F_2 + \Delta F_2.\end{aligned}\tag{2.2}$$

V této práci byl použit druhý postup pro určení předepnutí. Nutností k užití vztahu

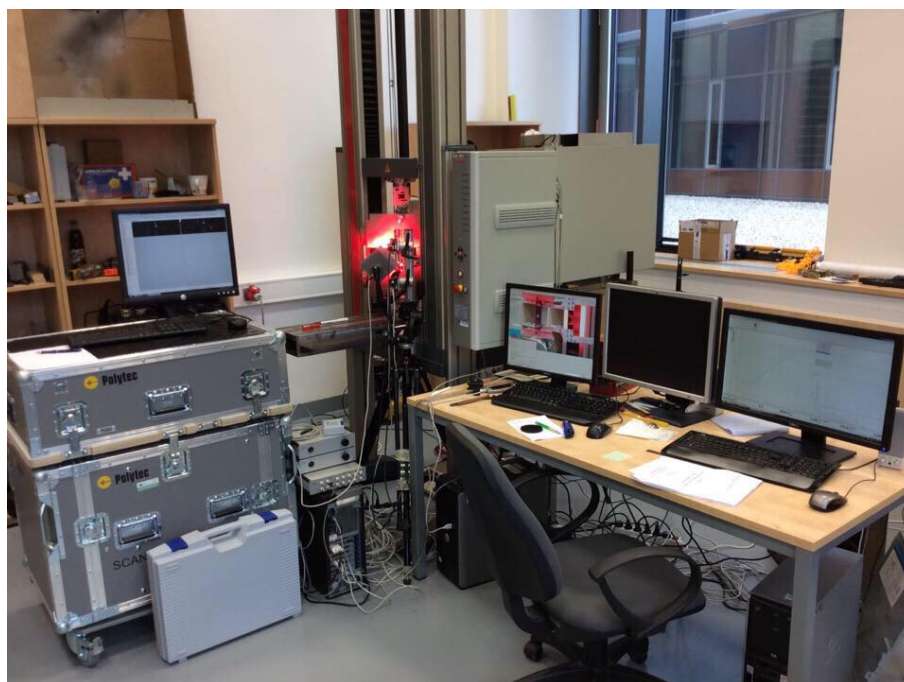
$$F_p = \frac{2 M_u}{\tan(\alpha + \phi) d_2 + \frac{D_o + s}{2} f_h}\tag{2.3}$$

je znalost utahovacího (kroucího) momentu M_U a tření mezi šroubem a podložkou f_h , zbývající hodnoty (průměr díry D_o , střední průměr šroubu d_2 , stoupání závitu p , $\alpha = \arctan(\frac{p}{d\pi})$, $\phi = \arctan(f_h)$, s) jsou normované hodnoty odečtené ze strojnických tabulek na základě znalosti označení šroubu, v případě této práce M6 a M8.

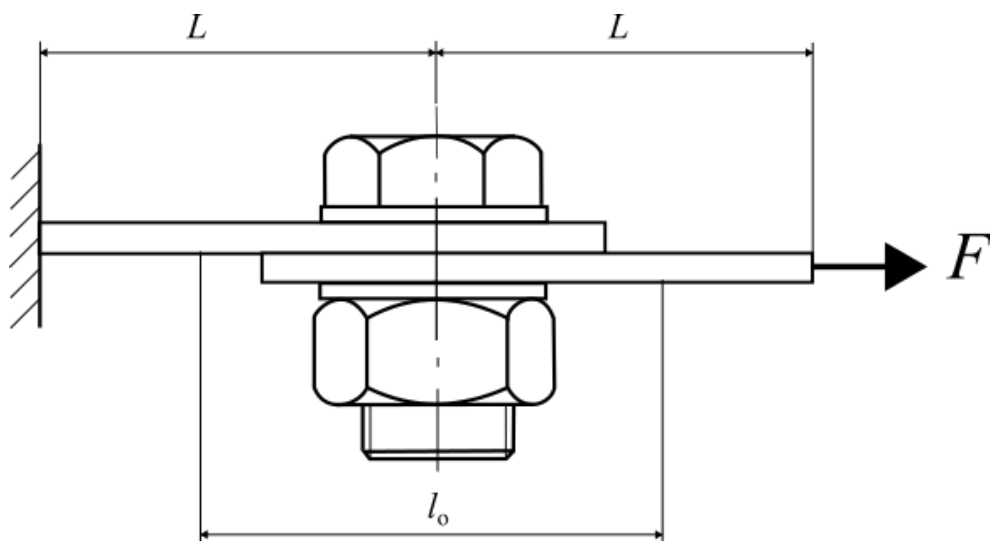
Kapitola 3

Experimentální část

Nejprve byla provedena experimentální analýza (Obrázek 3.1), která sloužila k verifikaci numerického modelu. Testovány byly kompozitové desky v kritickém místě šroubového spoje. Testovaným vzorkem byla dvojice desek spojena předepnutým šroubem, podložkou a maticí (Obrázek 3.2). Volné konce desek byly upnuty do čelistí trhačického stroje *Zwick/Roell Z050* ve vzdálenosti $L = 50$ mm od osy spoje. Rychlost zatěžování byla $v = 3$ mm/min.



Obrázek 3.1: Snímek z laboratoře během testování vzorků.



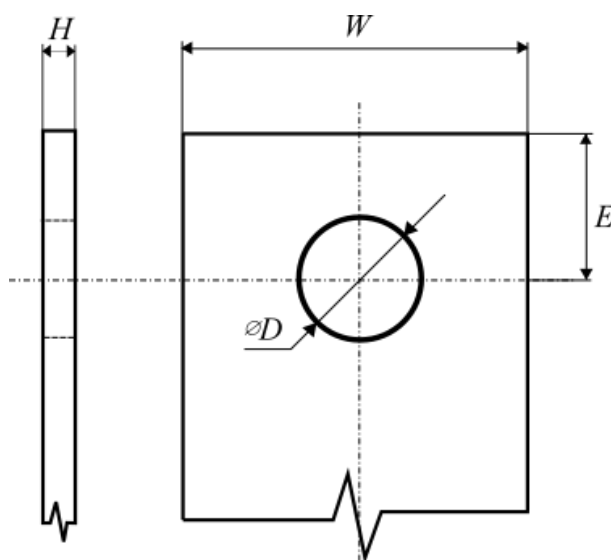
Obrázek 3.2: Schéma experimentu.

Testované desky (Obrázek 3.3) byly vyřezány vodním paprskem z jedné velké laminátové desky. Ta se skládala z 8 vrstev jednosměrového prepregu *HexPly 913C-HTS(12k)* z vysokopevnostních vláken *Tenax HTS 5361* a epoxidové pryskyřice. Testované desky byly vyřezány ve dvou na sebe kolmých směrech, tím bylo docíleno dvou různě orientovaných skladeb (Tabulka 3.1) vůči směru zatěžování tahem. Díry pro šroub byly vyfrézovány. Dvojice desek byly nakombinovány primárně po třech vzorcích stejné geometrie pro částečnou eliminaci případných anomálií. Byly přidány i jednotlivé dvojice, přestože nebyla k dispozici celá sada stejných geometrických parametrů. Kromě kompozitu byly testovány tři šroubové spoje hliníkových desek. V tabulkách 3.2, 3.3 a 3.4 je uvedeno označení testovaných vzorků (dvojice sešroubovaných desek), šířka desky W a kratší vzdálenost volných konců od osy díry E (v tabulce je uveden dvojnásobek $2E$, protože tento rozměr byl měřen na již smontovaných deskách), úhel φ_1 udává úhel vláken na vnějších vrstvách desky 1 a φ_2 udává úhel vláken na vnějších vrstvách desky 2.

Montáž předeprnutí byla provedena momentovým klíčem *Atlas Copco-tensor ETV ST61-50-10* připojeným na řídicí jednotku *Atlas Copco-Powerfocus 4000*. Při každém utažení displej přístroje zobrazoval přesný moment utažení M_U (Tabulka 3.5, 3.6, 3.7). Z toho pak byla pomocí vztahu 2.3 vypočtena předpínací síla F_P .

Tabulka 3.1: Skladby vrstev laminátu.

| Vrstva | 1. | 2. | 3. | 4. | 5. | 6. | 7. | 8. |
|-----------------|----|-----|-----|----|----|-----|-----|----|
| Skladba č.1 [°] | 0 | -45 | 45 | 90 | 90 | 45 | -45 | 0 |
| Skladba č.2 [°] | 90 | 45 | -45 | 0 | 0 | -45 | 45 | 90 |



Obrázek 3.3: Značení geometrických parametrů.

Pro odečítání vzájemných pohybů desek při jejich namáhání byla použita metoda digitální korelace obrazu. Proto byla na smontované desky nanesena aplikační vrstva laku s náhodným rastrem. Přístroj *Dantec Dynamics Q-400* snímal obrazy během testování. Dále byl k testovanému vzorku připojen extenzometr, měřící posunutí. Jeho měřená oblast byla $l_o = 80$ mm (Obrázek 3.2).

V následujících třech grafech 3.4, 3.5 a 3.6 jsou zachyceny výsledky z experimentů v závislosti zatěžující síly na vzájemném posunutí desek měřené extenzometrem. První výraznější pokles síly zaznamenává proklouznutí šroubu, tato hodnota $F_{f,exp}$ je pro každý vzorek uvedena v tabulkách 4.5, 4.6 a 4.7. Druhý výraznější pokles síly signalizuje porušení laminátu. Tato hodnota $F_{pp,exp}$ udává únosnost spoje. Zaznamenávání síly bylo zastaveno v okamžiku přetržení nebo v případě, kdy se síla ustálila a pouze se nepatrně vychylovala ve svém okolí, přičemž docházelo ke kumulaci poškození.

U vzorků se šroubem M6 docházelo k prokluzu šroubu v hodnotách $1500 \div 2000$ N,

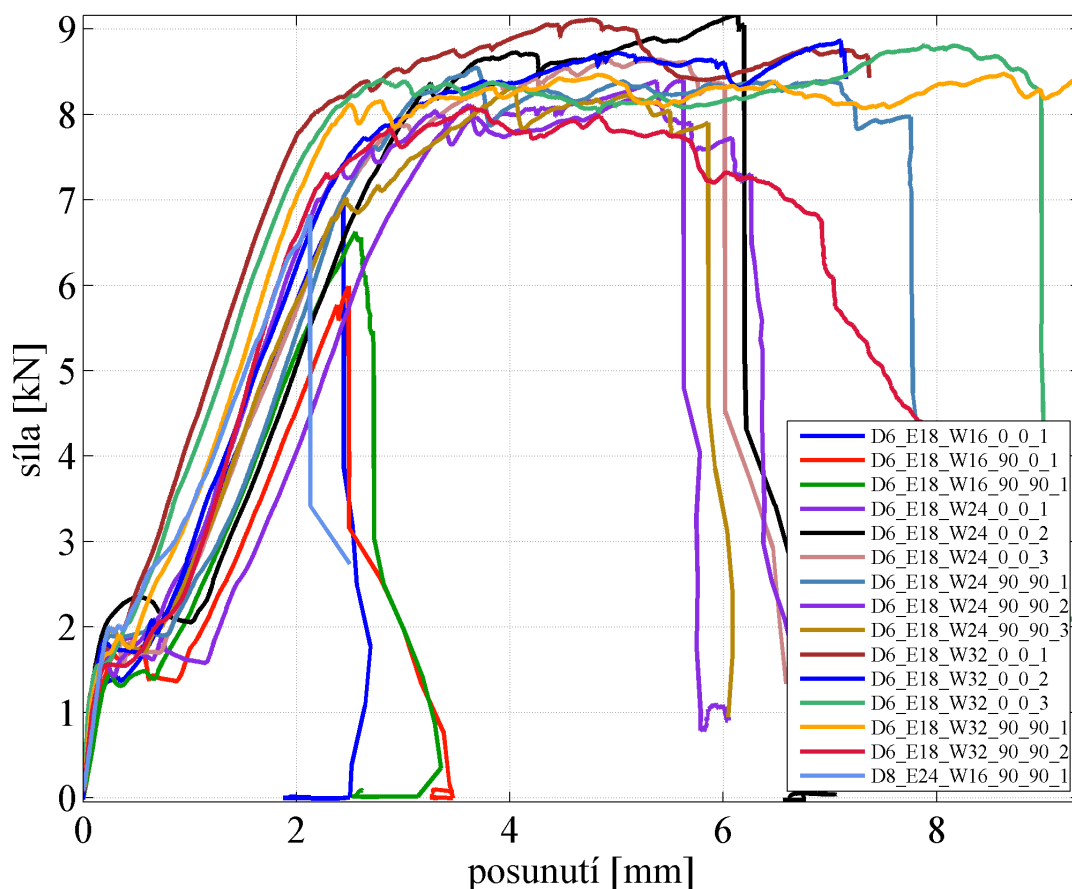
Tabulka 3.2: Rozměry vzorků s dírou pro šroub M6.

| # | Název vzorku | W [mm] | $2E$ [mm] | φ_1 [°] | φ_2 [°] |
|----|--------------------|----------|-----------|-----------------|-----------------|
| 1 | D6_E18_W16_0_0_1 | 15,86 | 35,63 | 0 | 0 |
| 2 | D6_E18_W16_90_0_1 | 15,83 | 36,14 | 90 | 0 |
| 3 | D6_E18_W16_90_90_1 | 15,89 | 35,60 | 90 | 90 |
| 4 | D6_E18_W24_0_0_1 | 23,86 | 36,68 | 0 | 0 |
| 5 | D6_E18_W24_0_0_2 | 23,82 | 36,58 | 0 | 0 |
| 6 | D6_E18_W24_0_0_3 | 23,86 | 36,38 | 0 | 0 |
| 7 | D6_E18_W24_90_90_1 | 23,82 | 36,85 | 90 | 90 |
| 8 | D6_E18_W24_90_90_2 | 23,90 | 36,26 | 90 | 90 |
| 9 | D6_E18_W24_90_90_3 | 23,83 | 35,95 | 90 | 90 |
| 10 | D6_E18_W32_0_0_1 | 32,83 | 35,84 | 0 | 0 |
| 11 | D6_E18_W32_0_0_2 | 31,99 | 36,12 | 0 | 0 |
| 12 | D6_E18_W32_0_0_3 | 31,83 | 35,89 | 0 | 0 |
| 13 | D6_E18_W32_90_90_1 | 31,92 | 36,03 | 90 | 90 |
| 14 | D6_E18_W32_90_90_2 | 31,90 | 35,88 | 90 | 90 |

u vzorků se šroubem M8 2000 ÷ 2500 N. Stejně tomu bylo i u maximální síly, která byla potřeba k překonání odporu, který šroub vyvolával. Rozsah maximálních sil se šroubem M6 se pohyboval v průměru kolem 8000 N, se šroubem M8 maximální síla v průměru dosahovala velikosti 9500 N.

Vzorky, které jsou v tabulce červeně zvýrazněné, při experimentu proklouzly v čelistech trhacího stroje. Tyto testy jsou neplatné a jejich hodnoty v práci nebudou dále uvažovány. Hliníkové vzorky posloužily pouze k verifikaci síly prokluzu, a nebyly dále analyzovány na únosnost.

Výsledkem z experimentů jsou dvě hodnoty sil pro každý z testovaných vzorků. První hodnotou je síla prokluzu šroubu. U dvojice desek, které byly spojeny šroubem M6, byly předepínací síly menší, proto i síla prokluzu byla menší než u vzorků se šroubem M8. Druhá hodnota udává únosnost šroubového spoje pro každý ze vzorků. Je to síla, při



Obrázek 3.4: Graf závislosti síly na posunutí pro vzorky s dírou pro šroub M6.

které došlo k výraznějšímu porušení vzorku. Z experimentů lze vyvodit, že síla prokluzu či skladba vláken nemá dopad na únosnost spoje.

Na obrázcích 3.7 a 3.8 jsou znázorněny vzorky po konci experimentu. Zachycují typy porušení, která vznikla na testovaných vzorcích. Na obrázku 3.7 došlo k přetržení laminátu. Obrázek 3.8 zachycuje porušení desek otláčením. Pohybem desek a šroubu vůči sobě se deska deformuje, a tak se díra pro šroub zvětšuje v podélném směru, případně dochází k oddělení vrstev, delaminaci.

Tabulka 3.3: Rozměry vzorků s dírou pro šroub M8.

| # | Název vzorku | W [mm] | $2E$ [mm] | φ_1 [°] | φ_2 [°] |
|----|--------------------|----------|-----------|-----------------|-----------------|
| 15 | D8_E24_W16_90_90_1 | 15,86 | 47,16 | 90 | 90 |
| 16 | D8_E24_W16_0_0_1 | 15,88 | 48,41 | 0 | 0 |
| 17 | D8_E24_W18_0_90_1 | 17,78 | 47,55 | 0 | 90 |
| 18 | D8_E30_W16_0_0_1 | 15,88 | 60,25 | 0 | 0 |
| 19 | D8_E30_W16_90_0_1 | 15,85 | 60,13 | 90 | 0 |
| 20 | D8_E30_W16_90_90_1 | 15,82 | 59,88 | 90 | 90 |
| 21 | D8_E24_W24_90_90_1 | 23,82 | 48,42 | 90 | 90 |
| 22 | D8_E24_W24_90_90_2 | 23,77 | 48,23 | 90 | 90 |
| 23 | D8_E24_W24_90_90_3 | 23,76 | 48,70 | 90 | 90 |
| 24 | D8_E24_W24_0_0_1 | 23,81 | 48,92 | 0 | 0 |
| 25 | D8_E24_W24_0_0_2 | 23,87 | 48,34 | 0 | 0 |
| 26 | D8_E24_W24_0_0_3 | 23,78 | 47,79 | 0 | 0 |
| 27 | D8_E30_W24_90_90_1 | 23,76 | 60,39 | 90 | 90 |
| 28 | D8_E30_W24_90_90_2 | 23,84 | 59,99 | 90 | 90 |
| 29 | D8_E30_W24_90_90_3 | 23,80 | 60,02 | 90 | 90 |
| 30 | D8_E30_W24_0_0_1 | 23,77 | 60,17 | 0 | 0 |
| 31 | D8_E30_W24_0_0_2 | 23,92 | 59,86 | 0 | 0 |
| 32 | D8_E30_W24_0_0_3 | 23,84 | 60,16 | 0 | 0 |
| 33 | D8_E24_W32_0_0_1 | 31,72 | 47,27 | 0 | 0 |
| 34 | D8_E24_W32_90_90_1 | 31,78 | 48,37 | 90 | 90 |
| 35 | D8_E24_W32_0_90_1 | 31,79 | 48,14 | 0 | 90 |
| 36 | D8_E30_W40_90_90_1 | 39,87 | 59,81 | 90 | 90 |
| 37 | D8_R30_W40_90_90_2 | 39,80 | 60,74 | 90 | 90 |
| 38 | D8_E30_W40_90_90_3 | 39,83 | 59,82 | 90 | 90 |

Tabulka 3.4: Rozměry hliníkových vzorků s dírou pro šroub M6.

| # | Název vzorku | W [mm] | $2E$ [mm] |
|----|--------------|----------|-----------|
| A1 | A6_E24_W25_1 | 25,11 | 48,10 |
| A2 | A6_E24_W25_2 | 25,07 | 48,93 |
| A3 | A6_E24_W25_3 | 25,10 | 48,21 |

Tabulka 3.5: Hodnoty z montáže předepnutí pro šroub s dírou M6.

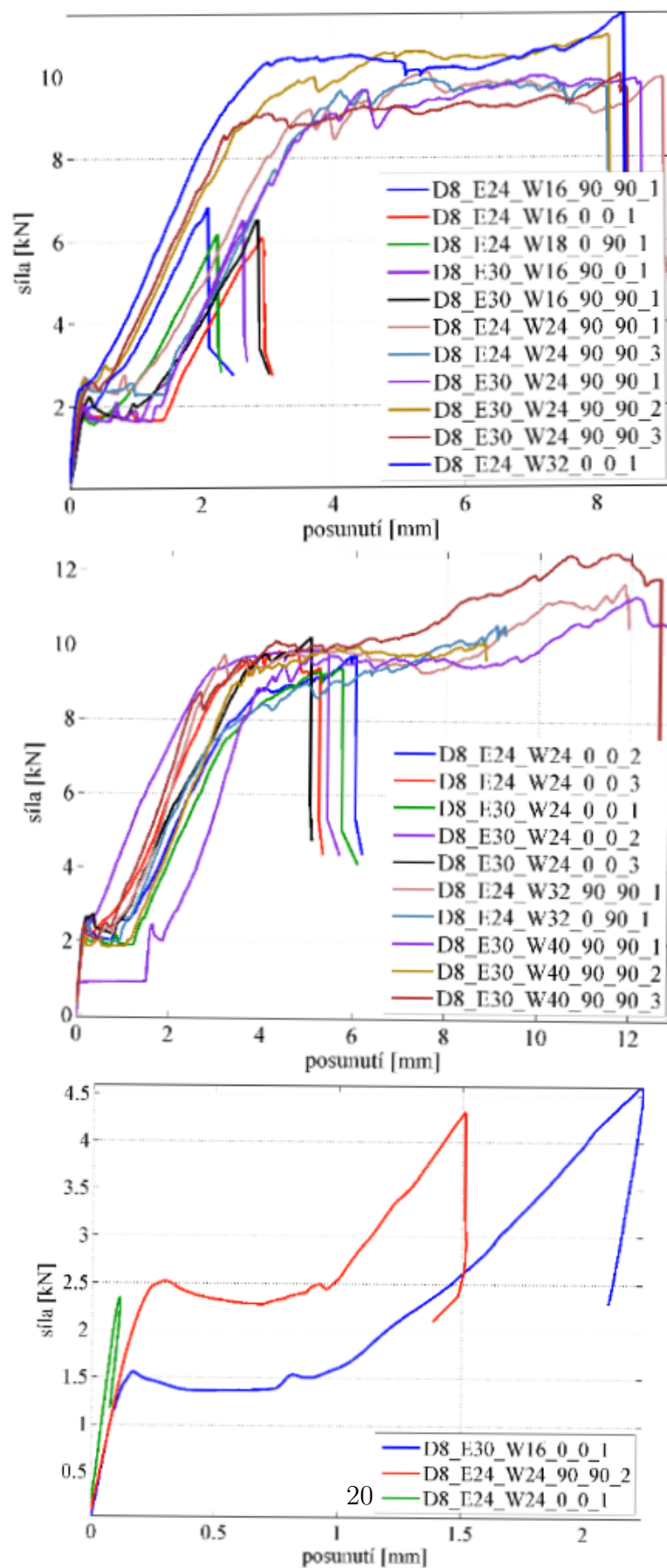
| # | Název vzorku | M_U [Nm] | φ_U [°] | F_P [N] |
|----|--------------------|------------|-----------------|-----------|
| 1 | D6_E18_W16_0_0_1 | 10,65 | 14,0 | 9071 |
| 2 | D6_E18_W16_90_0_1 | 10,51 | 16,0 | 8952 |
| 3 | D6_E18_W16_90_90_1 | 10,63 | 16,0 | 9054 |
| 4 | D6_E18_W24_0_0_1 | 10,64 | 17,0 | 9062 |
| 5 | D6_E18_W24_0_0_2 | 10,54 | 18,0 | 8977 |
| 6 | D6_E18_W24_0_0_3 | 10,55 | 15,0 | 8986 |
| 7 | D6_E18_W24_90_90_1 | 10,51 | 15,0 | 8952 |
| 8 | D6_E18_W24_90_90_2 | 10,57 | 15,0 | 9003 |
| 9 | D6_E18_W24_90_90_3 | 10,62 | 18,0 | 9045 |
| 10 | D6_E18_W32_0_0_1 | 10,63 | 16,0 | 9055 |
| 11 | D6_E18_W32_0_0_2 | 10,63 | 20,0 | 9054 |
| 12 | D6_E18_W32_0_0_3 | 10,68 | 18,0 | 9097 |
| 13 | D6_E18_W32_90_90_1 | 10,54 | 16,0 | 8977 |
| 14 | D6_E18_W32_90_90_2 | 10,59 | 15,0 | 9020 |

Tabulka 3.6: Hodnoty z montáže předeprnutí pro šroub s dírou M8.

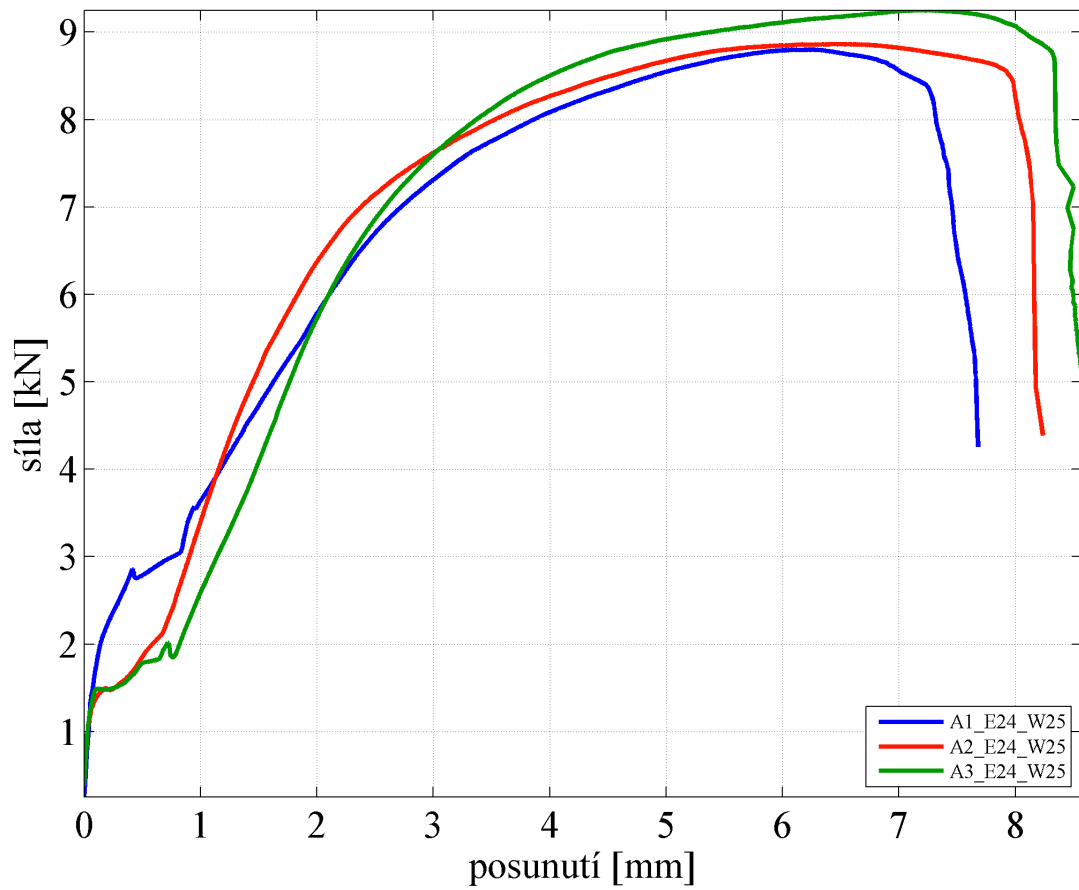
| # | Název vzorku | M_U [Nm] | φ_U [°] | F_P [N] |
|----|--------------------|------------|-----------------|-----------|
| 15 | D8_E24_W16_90_90_1 | 20,62 | 42,0 | 13364 |
| 16 | D8_E24_W16_0_0_1 | 20,55 | 43,0 | 13318 |
| 17 | D8_E24_W18_0_90_1 | 20,70 | 39,0 | 13416 |
| 18 | D8_E30_W16_0_0_1 | 20,74 | 35,0 | 13442 |
| 19 | D8_E30_W16_90_0_1 | 21,61 | 32,0 | 14005 |
| 20 | D8_E30_W16_90_90_1 | 20,71 | 35,0 | 13422 |
| 21 | D8_E24_W24_90_90_1 | 20,71 | 42,0 | 13422 |
| 22 | D8_E24_W24_90_90_2 | 20,57 | 30,0 | 13331 |
| 23 | D8_E24_W24_90_90_3 | 20,65 | 37,0 | 13383 |
| 24 | D8_E24_W24_0_0_1 | 20,63 | 36,0 | 13370 |
| 25 | D8_E24_W24_0_0_2 | 20,59 | 35,0 | 13344 |
| 26 | D8_E24_W24_0_0_3 | 20,74 | 39,0 | 13442 |
| 27 | D8_E30_W24_90_90_1 | 20,60 | 43,0 | 13351 |
| 28 | D8_E30_W24_90_90_2 | 20,74 | 40,0 | 13442 |
| 29 | D8_E30_W24_90_90_3 | 20,67 | 43,0 | 13396 |
| 30 | D8_E30_W24_0_0_1 | 20,67 | 38,0 | 13396 |
| 31 | D8_E30_W24_0_0_2 | 20,70 | 37,0 | 13416 |
| 32 | D8_E30_W24_0_0_3 | 20,69 | 35,0 | 13409 |
| 33 | D8_E24_W32_0_0_1 | 20,68 | 35,0 | 13403 |
| 34 | D8_E24_W32_90_90_1 | 20,81 | 39,0 | 13487 |
| 35 | D8_E24_W32_0_90_1 | 20,53 | 36,0 | 13305 |
| 36 | D8_E30_W40_90_90_1 | 20,41 | 37,0 | 13228 |
| 37 | D8_R30_W40_90_90_2 | 20,63 | 28,0 | 13370 |
| 38 | D8_E30_W40_90_90_3 | 20,67 | 37,0 | 13396 |

Tabulka 3.7: Hodnoty z montáže předepnutí hliníkových vzorku pro šroub s dírou M6.

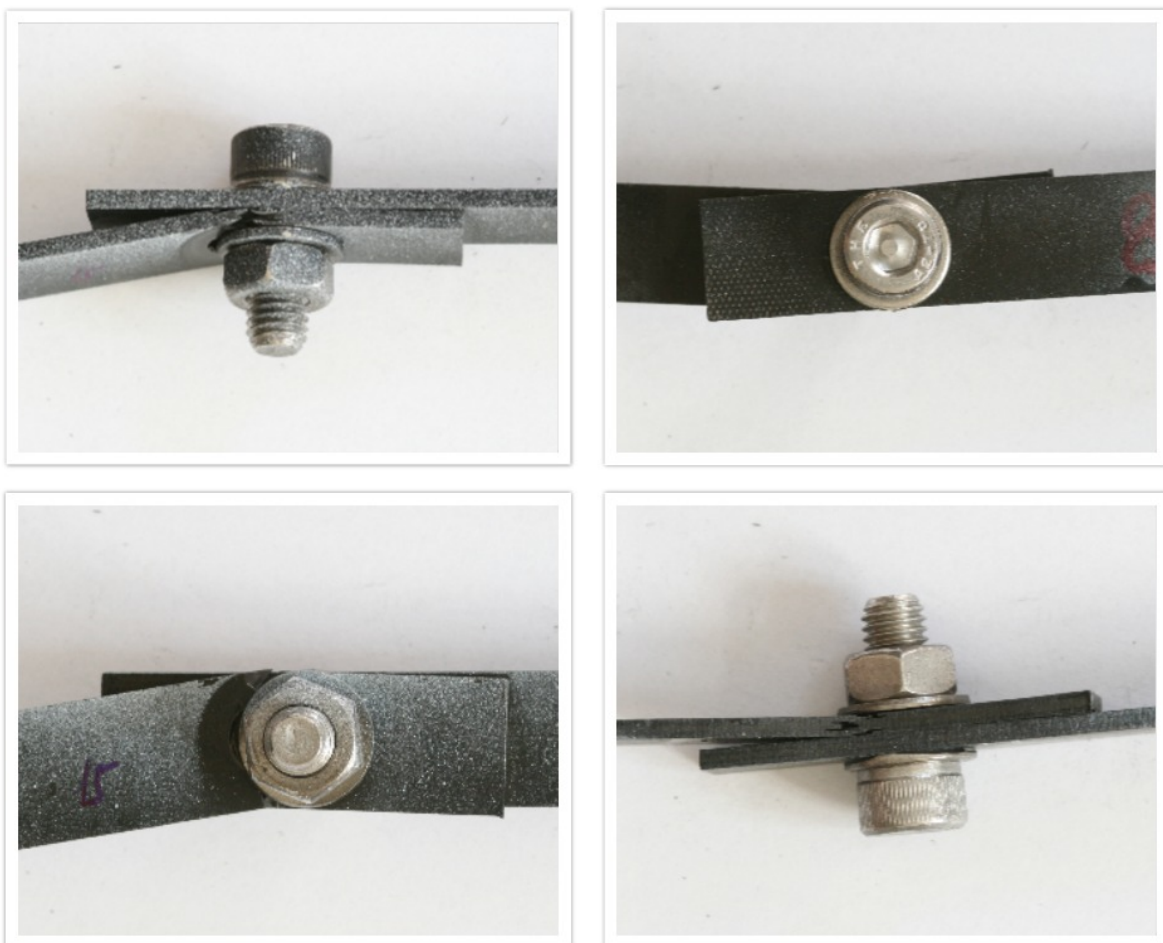
| # | Název vzorku | M_U [Nm] | φ_U [°] | F_P [N] |
|----|--------------|------------|-----------------|-----------|
| A1 | A6_E24_W25_1 | 10,53 | 12,0 | 8969 |
| A2 | A6_E24_W25_2 | 10,57 | 14,0 | 9003 |
| A3 | A6_E24_W25_3 | 10,62 | 14,0 | 9045 |



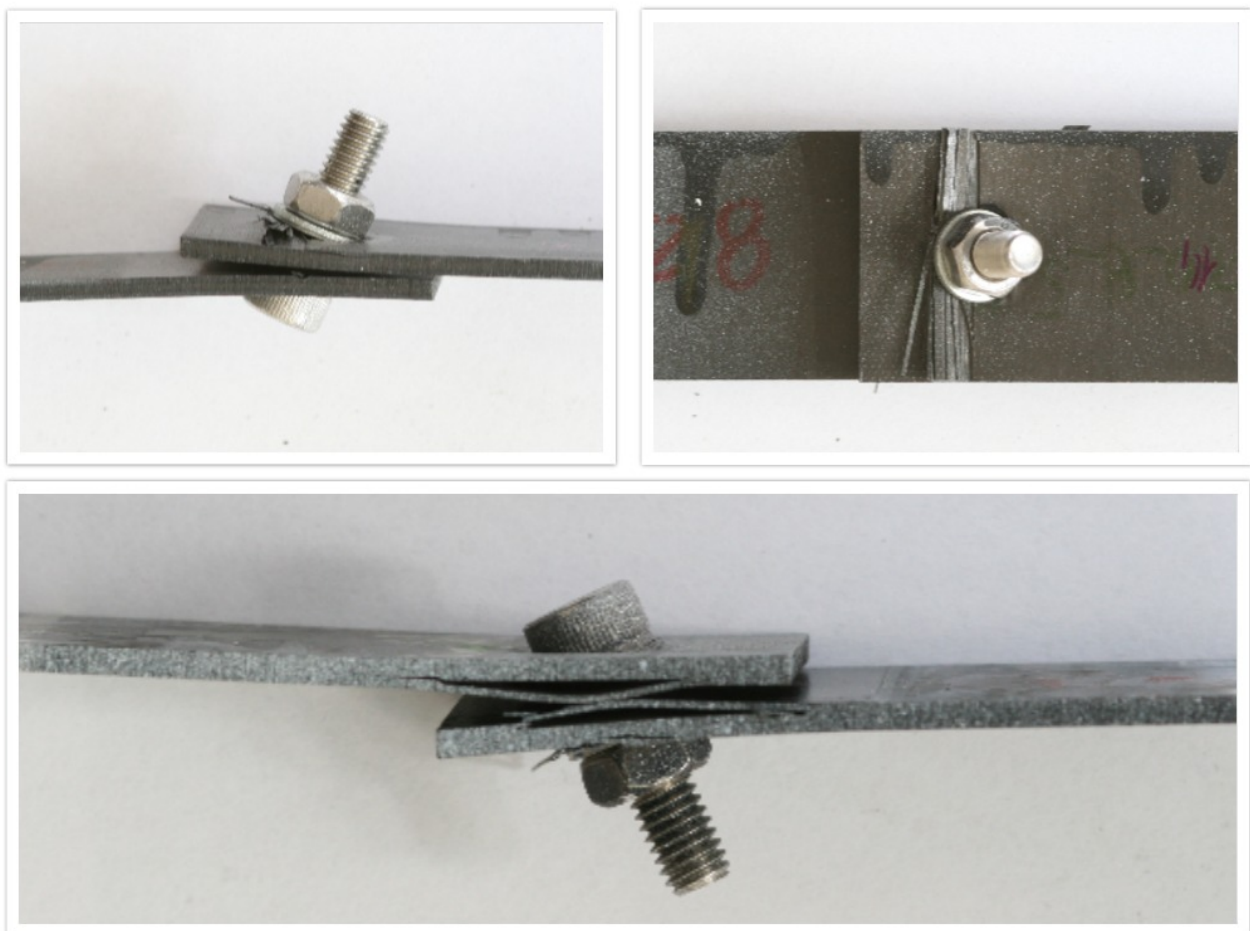
Obrázek 3.5: Graf a podgrafy závislosti síly na posunutí pro vzorky s dírou pro šroub M8.



Obrázek 3.6: Graf závislosti síly na posunutí hliníkových vzorků.



Obrázek 3.7: Vzorek číslo 15 - porušení desky přetžením



Obrázek 3.8: Vzorek číslo 14 - porušení otláčením

Kapitola 4

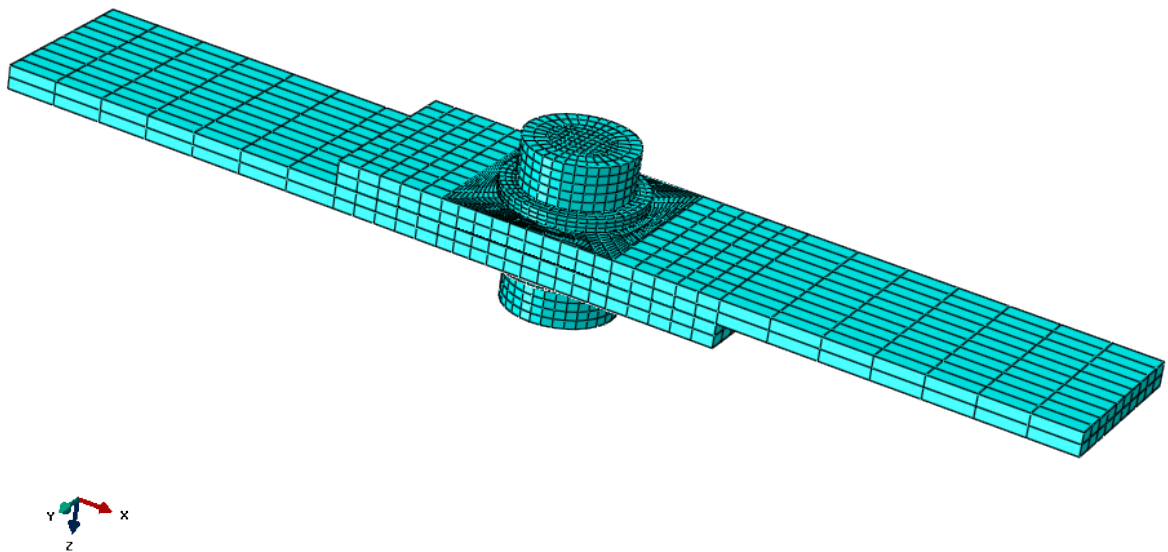
Numerický model

Úkolem bylo vytvořit numerický model dvou kompozitových prvků spojených šroubem. Jedná se o nejkritičtější oblast při implementování kompozitových částí do sestavy. K řešení této problematiky je více než vhodné používat právě numerický model, který není tak nákladný jako výroba prototypů a jejich testování. Numerický model je velmi praktický při testování různých parametrů, ať už to jsou geometrické nebo materiálové. Model lze vytvářet v různých měřítkách a vyhodnocení výsledků bývá rychlejší. Softwary umožňují různé náhledy a detailnější zkoumání požadovaných oblastí. Stále je to ale jistý odklon od reality, kde se některé vlivy a faktory zanedbávají či zjednodušují. Proto je potřeba po navržení optimálního modelu provést reálný experiment a tím potvrdit správnost numerické simulace.

Pro efektivní návrh spoje částí z kompozitového materiálu byl namodelován numerický model. Protože během verifikace vzorků docházelo ke změnám jejich parametrů, byl připraven parametricky psaný skript v softwaru *Python*, který je kompatibilní s MKP (Metoda Konečných Prvků) softwarem *Abaqus*. Pomocí skriptu se numerický model změní, aby se pro každou variantu nemusel ručně vytvářet nový model.

Deska byla modelována jako vícevrstvý solidový prvek. Šroub, podložka i matice pak jako jednovrstvý solidový prvek. Spojující komponenty jsou normované části, rozměry tedy odpovídají tabulkovým hodnotám dle průměru díry. Desce i kovovým prvkům byly přiřazeny odpovídající materiálové parametry (Tabulka 4.1, 4.2 a 4.3). Pro kompozit pak byla zvolena příslušná skladba vrstev laminátu (Tabulka 3.1). Po sestavení (Obrázek 4.1)

byl šroub předeprnut průměrnou silou pro jednotlivé sady vzorků spočítanou z kroutícího momentu získaného z utahovacího klíče (Vztah 2.3, Tabulka 3.5, 3.6 a 3.7). Dále byly definovány okrajové podmínky, jednomu z volných konců se zamezil posun ve všech směrech. Druhému byl předeprán posun v podélném směru, v ostatních směrech je posun zamezen. Okrajové podmínky jsou reprezentovány referenčním bodem pro každou z desek, se kterou je svázán.



Obrázek 4.1: Síť konečnoprvkového modelu.

Tabulka 4.1: Materiálové parametry kompozitu.

| E_{11} | E_{22} | E_{33} | ν_{12} | ν_{13} | ν_{23} | G_{12} | G_{13} | G_{23} |
|----------|----------|----------|------------|------------|------------|----------|----------|----------|
| [GPa] | [GPa] | [GPa] | [-] | [-] | [-] | [GPa] | [GPa] | [GPa] |
| 120,0 | 8,0 | 8,0 | 0,337 | 0,337 | 0,33 | 4,6 | 4,6 | 3,0 |

Hodnoty tření zadávané mezi jednotlivými komponentami, zejména mezi deskami, nebyly jednoznačně známé. Byly tedy testovány různé hodnoty tření. K finálnímu výpočtu

Tabulka 4.2: Materiálové parametry oceli.

| E_{ocel} [GPa] | ν_{ocel} [-] |
|------------------|------------------|
| 210,0 | 0,3 |

Tabulka 4.3: Materiálové parametry hliníku.

| E_{Al} [GPa] | ν_{Al} [-] |
|----------------|----------------|
| 72,0 | 0,3 |

bylo zvoleno tření, které při verifikaci síly prokluzu F_{f_mkp} bylo nejbližší experimentům (F_{f_exp}). Jedná se o hodnoty tření mezi laminátem a laminátem $f_1 = 0,12$, laminátem a podložkou $f_2 = 0,11$ a podložkou a šroubem $f_3 = 0,10$.

Ze záznamu rekační síly v závislosti na čase (Obrázek 4.2) byla zjištěna síla prokluzu F_{f_mkp} . Takto získané hodnoty sil prokluzu F_{f_mkp} jsou pro všechny vzorky uvedeny v tabulkách 4.5, 4.6 a 4.7. Jsou zde uvedeny i síly prokluzu z experimentů F_{f_exp} . Průměrná chyba simulace k experimentu činí 23,7 %.

Výpočet probíhal ve dvou krocích (Obrázek 4.2). V prvním kroku (tj. čas = 0 ÷ 1) byl šroub předepínán a v druhém kroku (tj. čas = 1 ÷ 2) docházelo k zatěžování vzorku posuvem.

K predikování únosnosti bylo použito Kritérium maximálního napětí (Kapitola 1.1). V tabulce 4.4 jsou hodnoty pro meze pevnosti v jednotlivých směrech. V případě, kdy napětí v nějakém místě dosáhlo hodnoty jedné z těchto mezí, nebo ji překročilo, není splněná jedna z nerovností (Vztah 1.1), a dochází tak k porušení laminátu. Tímto způsobem byla v softwaru *Abaqus* provedena analýza porušení. Byla určena mezná síla F_{pp_mkp} (únosnost), při které dle Kritéria maximálního napětí dojde k porušení laminátu.

Porovnání únosnosti laminátu při experimentu F_{pp_exp} a při numerické analýze F_{pp_mkp} je znázorněno v tabulkách 4.8 a 4.9. Kritérium maximálního napětí predikuje první porušení v laminátu. Toto porušení ale nebylo v experimentech ze záznamu závislosti síla

Tabulka 4.4: Pevnosti kompozitu.

| X_T | X_C | Y_T | Y_C | Z_T | Z_C | S_{12} | S_{23} | S_{13} |
|--------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|----------|----------|
| [MPa] | [MPa] | [MPa] | [MPa] | [MPa] | [MPa] | [MPa] | [MPa] | [MPa] |
| 1800,0 | 850,0 | 55,0 | 213,0 | 55,0 | 213,0 | 82,0 | 82,0 | 82,0 |

na posunutí zřejmé a nemělo žádný výrazný vliv na skutečnou únosnost spoje. Únosnost spoje dle Kritéria maximálního napětí F_{pp_mkp} se pohybovala okolo 42 % experimentálně zjištěné únosnosti F_{pp_exp} .

Na obrázku 4.3 zobrazuje deformace vzorku smontovaných desek z profilu červenou stopou. Ta reprezentuje zaznám z experimentu, kde se deformace měřila metodou digitální korelace obrazu. Numerická simulace je zaznamenána modrou barvou. Každá z dvojice křivek představuje střednici jedné z desek a její posuvy v okamžiku působení stejné síly při experimentu i simulaci. Na zmíněném grafu je zachycen vzorek č. 7, na který působí síla o velikosti 8304,9 N.

Tabulka 4.5: Porovnání síly prokluzu z experimentu a simulace pro desky s dírou pro šroub M6.

| # | Název vzorku | $F_{f,exp}$ [N] | $F_{f,mkp}$ [N] | chyba [%] |
|----|--------------------|-----------------|-----------------|-----------|
| 1 | D6_E18_W16_0_0_1 | 1415 | 1988 | -40,5 |
| 2 | D6_E18_W16_90_0_1 | 1698 | 1962 | -15,5 |
| 3 | D6_E18_W16_90_90_1 | 1466 | 1984 | -35,3 |
| 4 | D6_E18_W24_0_0_1 | 1878 | 1974 | -5,1 |
| 5 | D6_E18_W24_0_0_2 | 2350 | 1974 | 16,0 |
| 6 | D6_E18_W24_0_0_3 | 1832 | 1974 | -7,8 |
| 7 | D6_E18_W24_90_90_1 | 1896 | 1971 | -4,0 |
| 8 | D6_E18_W24_90_90_2 | 1680 | 1971 | -17,3 |
| 9 | D6_E18_W24_90_90_3 | 1951 | 1971 | -1,0 |
| 10 | D6_E18_W32_0_0_1 | 1785 | 1987 | -11,3 |
| 11 | D6_E18_W32_0_0_2 | 1827 | 1987 | -8,8 |
| 12 | D6_E18_W32_0_0_3 | 1549 | 1987 | -28,3 |
| 13 | D6_E18_W32_90_90_1 | 1680 | 1971 | -17,3 |
| 14 | D6_E18_W32_90_90_2 | 1557 | 1972 | -26,7 |

Tabulka 4.6: Porovnání síly prokluzu z experimentu a simulace pro desky s dírou pro šroub M8.

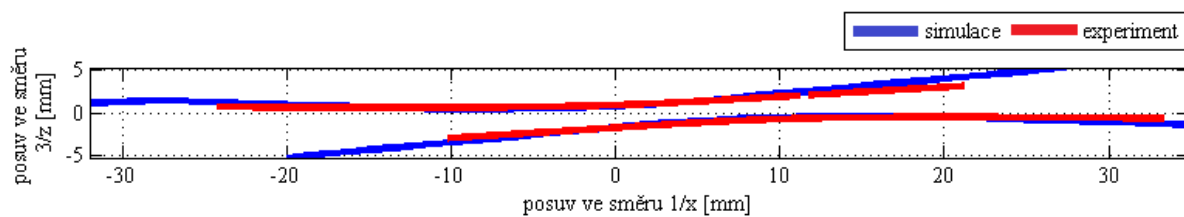
| # | Název vzorku | $F_{f,exp}$ [N] | $F_{f,mkp}$ [N] | chyba [%] |
|----|--------------------|-----------------|-----------------|-----------|
| 15 | D8_E24_W16_90_90_1 | 2001 | 2929 | -46,4 |
| 16 | D8_E24_W16_0_0_1 | 1819 | 2918 | -60,4 |
| 17 | D8_E24_W18_0_90_1 | 1845 | 2940 | -59,3 |
| 19 | D8_E30_W16_90_0_1 | 2057 | 3069 | -49,2 |
| 20 | D8_E30_W16_90_90_1 | 2244 | 2941 | -31,1 |
| 21 | D8_E24_W24_90_90_1 | 2732 | 2932 | -7,3 |
| 23 | D8_E24_W24_90_90_3 | 2679 | 2932 | -9,4 |
| 25 | D8_E24_W24_0_0_2 | 2379 | 2933 | -23,3 |
| 26 | D8_E24_W24_0_0_3 | 2514 | 2933 | -16,7 |
| 27 | D8_E30_W24_90_90_1 | 2013 | 2935 | -45,8 |
| 28 | D8_E30_W24_90_90_2 | 2645 | 2936 | -11,0 |
| 29 | D8_E30_W24_90_90_3 | 2591 | 2936 | -13,3 |
| 30 | D8_E30_W24_0_0_1 | 2087 | 2938 | -40,8 |
| 31 | D8_E30_W24_0_0_2 | 2614 | 2938 | -12,4 |
| 32 | D8_E30_W24_0_0_3 | 2653 | 2938 | -10,7 |
| 33 | D8_E24_W32_0_0_1 | 2446 | 2937 | -20,1 |
| 34 | D8_E24_W32_90_90_1 | 2433 | 2955 | -21,5 |
| 35 | D8_E24_W32_0_90_1 | 2525 | 2916 | -15,5 |
| 36 | D8_E30_W40_90_90_1 | 2471 | 2921 | -18,2 |
| 37 | D8_R30_W40_90_90_2 | 2109 | 2921 | -38,5 |
| 38 | D8_E30_W40_90_90_3 | 2486 | 2921 | -17,5 |

Tabulka 4.7: Porovnání síly prokluzu z experimentu a simulace pro hliníkové desky.

| # | Název vzorku | $F_{f,exp}$ [N] | $F_{f,mkp}$ [N] | chyba [%] |
|----|--------------|-----------------|-----------------|-----------|
| A1 | A6_E24_W25_1 | 1415 | 1706 | -20,6 |
| A2 | A6_E24_W25_2 | 1496 | 1706 | -14,0 |
| A3 | A6_E24_W25_3 | 1489 | 1706 | -14,6 |



Obrázek 4.2: Graf závislosti síly na čase pro vzorek č.4 - numerická simulace.



Obrázek 4.3: Deformace ve směru x, z/1, 3 - vzorek číslo 7.

Tabulka 4.8: Porovnání síly potřebné k porušení laminátu z experimentu a simulace pro desky s dírou pro šroub M6.

| # | Název vzorku | $F_{pp.exp}$ [N] | $F_{pp.mkp}$ [N] | $\frac{F_{pp.mkp}}{F_{pp.exp}}$ [%] |
|----|--------------------|------------------|------------------|-------------------------------------|
| 1 | D6_E18_W16_0_0_1 | 6970 | 3128 | 44,9 |
| 2 | D6_E18_W16_90_0_1 | 5769 | 2756 | 47,8 |
| 3 | D6_E18_W16_90_90_1 | 6622 | 2584 | 39,0 |
| 4 | D6_E18_W24_0_0_1 | 8113 | 3069 | 37,8 |
| 5 | D6_E18_W24_0_0_2 | 8362 | 3058 | 36,6 |
| 6 | D6_E18_W24_0_0_3 | 7876 | 3235 | 41,1 |
| 7 | D6_E18_W24_90_90_1 | 7620 | 3223 | 42,3 |
| 8 | D6_E18_W24_90_90_2 | 7375 | 3229 | 43,8 |
| 9 | D6_E18_W24_90_90_3 | 7016 | 3298 | 47,0 |
| 10 | D6_E18_W32_0_0_1 | 8388 | 3131 | 37,3 |
| 11 | D6_E18_W32_0_0_2 | 8390 | 3101 | 37,0 |
| 12 | D6_E18_W32_0_0_3 | 8405 | 3094 | 36,8 |
| 13 | D6_E18_W32_90_90_1 | 8121 | 3369 | 41,5 |
| 14 | D6_E18_W32_90_90_2 | 7839 | 3367 | 43,0 |

Tabulka 4.9: Porovnání síly potřebné k porušení laminátu z experimentu a simulace pro desky s dírou pro šroub M8.

| # | Název vzorku | F_{pp_exp} [N] | F_{pp_mkp} [N] | $\frac{F_{pp_mkp}}{F_{pp_exp}}$ [%] |
|----|--------------------|-------------------|-------------------|---------------------------------------|
| 15 | D8_E24_W16_90_90_1 | 6828 | 2591 | 37,9 |
| 16 | D8_E24_W16_0_0_1 | 6090 | 3352 | 55,0 |
| 17 | D8_E24_W18_0_90_1 | 6161 | 3069 | 49,8 |
| 19 | D8_E30_W16_90_0_1 | 6510 | 2794 | 42,9 |
| 20 | D8_E30_W16_90_90_1 | 6518 | 2592 | 39,8 |
| 21 | D8_E24_W24_90_90_1 | 9168 | 3701 | 40,4 |
| 23 | D8_E24_W24_90_90_3 | 9631 | 3679 | 38,2 |
| 25 | D8_E24_W24_0_0_2 | 9744 | 3555 | 36,5 |
| 26 | D8_E24_W24_0_0_3 | 9552 | 3525 | 36,9 |
| 27 | D8_E30_W24_90_90_1 | 9654 | 3680 | 38,1 |
| 28 | D8_E30_W24_90_90_2 | 9961 | 3780 | 37,9 |
| 29 | D8_E30_W24_90_90_3 | 9084 | 3701 | 40,7 |
| 30 | D8_E30_W24_0_0_1 | 9322 | 3600 | 38,6 |
| 31 | D8_E30_W24_0_0_2 | 9723 | 3534 | 36,3 |
| 32 | D8_E30_W24_0_0_3 | 9422 | 3555 | 37,7 |
| 33 | D8_E24_W32_0_0_1 | 10330 | 4627 | 44,8 |
| 34 | D8_E24_W32_90_90_1 | 9760 | 4422 | 45,3 |
| 35 | D8_E24_W32_0_90_1 | 8444 | 4601 | 54,5 |
| 36 | D8_E30_W40_90_90_1 | 8851 | 5015 | 56,7 |
| 37 | D8_R30_W40_90_90_2 | 9011 | 5012 | 55,6 |
| 38 | D8_E30_W40_90_90_3 | 8728 | 4902 | 56,2 |

Závěr

Tato práce se zabývá numerickým modelem šroubového spoje kompozitů. Šroubový spoj je jedním ze zástupců rozebíratelných spojů. Spoje komponent patří ke kritickým oblastem při navrhování konstrukcí, a je jim proto třeba věnovat zvýšenou pozornost.

Hlavním cílem této práce bylo vytvořit numerický model šroubového spoje, který by se dal použít při návrhu spojů kompozitních struktur. Dílčím úkolem bylo provést pevnostní analýzu spoje vybraných geometrií pomocí Kritéria maximálního napětí. Pro ověření numerických simulací bylo třeba provést sérii experimentů a vyhodnotit jejich vzájemnou shodu.

Prvním krokem byla výroba příslušných vzorků, které se lišily geometrickými parametry, ale také např. skladbou vrstev laminátu. Testováno bylo celkem 38 vzorků z laminátu a 3 z hliníku. Hliníkové vzorky sloužily jen k porovnání síly prokluzu šroubu. Vzorky byly spojeny 02 buď šroubem s označením M6, nebo M8. Z experimentů byly získány dvě hodnoty sil pro každý vzorek. Síla, kdy došlo k prokluzu šroubu a síla, při které došlo k výraznému poškození vzorku (tato byla označována jako únosnost spoje). U vzorků se šroubem M6 byly menší předepínací síly a tudíž i síly prokluzu. Nebyl zjištěn vliv skladby vláken na síly prokluzu, ani na únosnost spoje. S rostoucí šířkou vzorku rostla i únosnost spoje. Na vzorky byl nanesen náhodný barevný rastr a byly během testu snímány kamerami. Metodou digitální korelace obrazu pak byly získány hodnoty vzájemných posuvů desek. To posloužilo k validaci numerického modelu.

Numerický model byl vytvářen pomocí parametrického skriptu v programu Python a byl tak plně kompatibilní s použitým konečnoprvkovým softwarem Abaqus. Výpočet probíhal ve dvou krocích. Nejprve bylo na šroub aplikováno předepnutí a v druhém kroku

byl spoj zatěžován posuvem. Ze závislosti reakční síly na posunutí byla zjištěna hodnota síly prokluzu pro každý vzorek zvlášť. Průměrná chyba mezi experimentálně zjištěnou silou prokluzu a hodnotou z numerické simulace byla 23,7 %. Pro některé kombinace byla tato chyba větší, což bylo pravděpodobně způsobeno tím, že v experimentu nebylo zaručeno, že šroub byl na počátku zatěžování přesně v ose díry.

Pevnostní analýza byla provedena pomocí Kritéria maximálního napětí. Toto kritérium predikuje první porušení. Toto porušení nebylo při experimentech ze záznamu závislosti síly na posunutí patrné. Únosnost dle Kritéria maximálního napětí dosahovala tedy jen pouze přibližně 42 % únosnosti zjištěné experimentálně.

V budoucí práci by bylo vhodné otestovat vytvořený numerický model pro vícenásobný šroubový spoj, který se v praxi hojně využívá. Pro přesnější výpočet únosnosti spoje by bylo třeba modelovat spoj pomocí postupného porušování, ke kterému v laminátech docházelo.

Použitá literatura

- [1] *Kompozitní materiály*, Učební podklady, ČVUT - Fakulta strojní, http://umi.fs.cvut.cz/files/6_kompozitni-materialy.pdf.
- [2] ŽABA, T., *Realizace edukační úlohy na experimentální stanici pro modelování předepjatých šroubových spojů*, diplomová práce, VUT v Brně, 2011.
- [3] FALTUS F., *prvky ocelových konstrukcí*, Praha, ČSAV, 1962.
- [4] LAŠ, V., *Mechanika kompozitních materiálů*, Západočeská univerzita v Plzni, 2.ed., 2008.
- [5] ŠLUPINA, M., *Spoje ve strojírenství*, VOŠ, SOŠ a SOU Kopřivnice, 1987, elektronická učebnice.
- [6] VARIOUS, *Behaviour and Analysis of Mechanically Fastened Joints in Composite Structures*, AGARD, Květen 1988, Madrid, Španělsko.