

# **Spolehlivost kompozitních konstrukcí**

Ing. Alexander Čapka, Ph.D.

Teze disertační práce



# Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

## Fakulta technologická

Teze disertační práce

### **Spolehlivost kompozitních konstrukcí**

### **Dependability of Composites Constructions**

Autor: **Ing. Alexander Čapka, Ph.D.**

Studijní program: P3909 Procesní inženýrství

Studijní obor: 3909V013 Nástroje a procesy

Školitelka: doc. Ing. Soňa Rusnáková, Ph.D.

Oponenti: prof. Ing. Zdeněk Jonšta, CSc.  
prof. Dr. Ing. Libor Beneš  
doc. Ing. Oldřich Šuba, CSc.

Zlín, září 2018

© Ing. Alexander Čapka, Ph.D.

Vydala **Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně** v edici **Doctoral Thesis Summary**.  
Publikace byla vydána v roce 2018

*Klíčová slova: spolehlivost, životnost, predikce životnosti, sendvičová konstrukce, voštinová struktura, třibodový ohyb, S-N křivka, malý výběr, nedestruktivní testování*

*Key words: dependability, durability, fatigue life prediction, sandwich construction, honeycomb structure, three-point bending, S-N curve, small sample, non-destructive testing*

Plná verze disertační práce je dostupná v Knihovně UTB ve Zlíně.

ISBN 978-80-7454-782-9

## ABSTRAKT – (RESUMÉ)

Sendvičové materiály jsou konstrukčními prvky, které jsou známy poměrně dlouhou dobu. V letectví byly použity již v době 2. světové války v konstrukci britských letadel. V Československu byly první zmínky o sendvičích v odborných časopisech již kolem roku 1960. Sendvičové materiály mají velmi příznivé mechanické vlastnosti vztažené k jejich hmotnosti. Sendvičové materiály byly předmětem již mnoha výzkumů a jejich statické mechanické vlastnosti jsou již dobře známy. Málo výzkumných prací se věnovalo jednomu druhu ze sendvičových materiálů: polymernímu kompozitnímu sendvičovému panelu s voštinovým jádrem (což je již konstrukční prvek). Jen velmi málo výzkumů se věnovalo únavové životnosti těchto konstrukčních prvků. Zřejmě žádný výzkum neporovnal životnost jednoduchých konstrukčních prvků z polymerních kompozitních sendvičových panelů s voštinovým jádrem o stejné statické pevnosti (únosnosti), ale předpokládané rozdílné životnosti.

Základním cílem této disertační práce je určení únavové životnosti jednoduchých, konstrukčně a pevnostně podobných prvků z kompozitních sendvičových panelů s voštinovým jádrem. Výsledkem zkoumání jsou S-N (Wöhlerovy) křivky. Hlavním vědeckým přínosem práce je doposud nepoužitá metoda statistického zpracování naměřených dat tzv. Hornovým postupem. Praktickým přínosem je navržení metody zkoumání životnosti sendvičů, která je použitelná zjm. ve vývoji pozemních dopravních prostředků, kdy ekonomická otázka životnostních zkoušek hraje velkou roli. Vedlejšími cíli je ověření vhodnosti použití metody aktivní infračervené termografie při zjišťování vad sendvičů.

Pro určování životnosti se používá celá řada metod. Základními jsou experimentální metody, které jsou velmi časově náročné, tudíž také velmi drahé. V současnosti se vedle experimentálních metod používají i výpočetně-analytické metody a na ně navazující simulační metody (opět drahé, cena SW). V této práci je použita experimentální metoda, která využívá jednoduché zkušební zařízení, které je mnohonásobně levnější, než běžně používané zkušební stroje. Na tomto jednoduchém stroji jsou odměřeny malé výběry a tyto jsou statisticky zpracovány speciální metodou určenou pro analýzu malých výběrů. Výsledkem takto získaných dat pak může být navržení dalšího, zpřesňujícího postupu ve zkoumání životnosti. Tento následující výzkum (na drahém zařízení) může být zaměřen např. jen na část Wöhlerovy křivky, související s provozem daného pozemního dopravního prostředku.

Aktivní infračervená termografie je jednou z mnoha metod nedestruktivního testování vhodnou pro detekci vad sendvičů. Tato práce dokazuje, že pomocí infračervené termografie lze získat stejné, nebo i lepší testovací výsledky a to s lepší efektivitou, než je tomu u doposud nejvíce používaných ultrazvukových metod.

## **ABSTRACT – (SUMMARY)**

Sandwich materials are construction elements which have been well-known for a relatively long period. They were already used in the construction of British aircraft during the period of World War II. In Czechoslovakia, First mention of sandwich materials in technical magazines was already around the year 1960. Sandwich materials are marked by their very favourable mechanical properties related to their weight. Sandwich materials have been the subject of much research and their mechanical properties are already well-known. Only a small part of research has been applied to a certain type of sandwich material - to the polymeric composite panel with a honeycomb core – which already is, in itself, a construction element. Very little research has been dedicated to the fatigue life of these construction elements. It is evident that no comparison has been made of the life of polymeric composite sandwich panels with a honeycomb core of same static strength (load capacity), but of differing life expectancy.

The basic aim of this thesis is determination of the fatigue life of basic, constructional and similar-in-strength comparable elements of composite sandwich panels with a honeycomb core. The research results are Wöhler's curves. The main scientific benefit of the work is the up-to-now unapplied method of statistical processing of measured data by the so-called Horn's procedure. The practical advantage is proposal of the method of research of the life expectancy of sandwiches, which is applicable, in particular, in the development of terrestrial means of transport, where the question of life expectancy plays a major role.

In determining life expectancy a whole line of methods is utilised. Basic methods are experimental and very time-demanding, which means also very costly. Currently, besides the experimental methods, use is made of computer-analytical methods and of simulation methods linked to them (again very costly, high-cost SW). In this work an experimental method is used, which utilizes basic test equipment, which is several times cheaper than currently used testing machines. On this simple machine small samples are taken off and measured and then statistically processed by a special method designated for the analyses of small samples. The result of such-obtained data can be utilised for the design of further refined procedures of research of life expectancy. This subsequent research (on expensive equipment) can be directed at e.g. only on a certain section of Wöhler's curve, related to operation of the given terrestrial means of transport.

A secondary target: active infra-red thermography is one of many methods of non-destructive tests suitable for detection of sandwich defects. This work proves that with the aid of infra-red thermography it is possible to achieve the same, or even better test results, namely with improved effectivity than that achieved by the up-to-now mostly utilised ultrasound methods.

# OBSAH

<b>ABSTRAKT – (RESUMÉ)</b> .....	<b>3</b>
<b>ABSTRACT – (SUMMARY)</b> .....	<b>4</b>
<b>OBSAH</b> .....	<b>5</b>
<b>0. ÚVOD</b> .....	<b>8</b>
<b>1. TERMINOLOGIE A DEFINICE</b> .....	<b>9</b>
<b>2. SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY</b> .....	<b>10</b>
2.1 Sendvičové konstrukce .....	10
2.1.1 Úvod do problematiky PSP.....	10
2.2 Materiálové složení PSP .....	10
2.2.1 Jádro .....	10
2.2.2 Potah.....	11
2.2.3 Prepregy .....	11
2.3 Inserty .....	11
2.4 Výrobní technologie PSP .....	12
<b>3. TEORETICKÝ RÁMEC</b> .....	<b>13</b>
3.1 Mechanické vlastnosti nosníku z PSP.....	13
3.1.1 Problematika únosnosti nosníku z PSP.....	13
3.2 Statické zatěžování nosníku z PSP v ohybu.....	13
3.3 Životnost konstrukcí z PSP .....	14
3.3.1 Únavové zatěžování konstrukcí a analýza zatěžování .....	14
3.3.2 Únavové vlastnosti PSP .....	15
3.3.3 Únavové vlastnosti insertů .....	15
3.3.4 Mezní stav PSP .....	16
3.4 Únavové zkoušky PKM a PSP .....	16
3.5 Statistické metody v únavě.....	16
3.5.1 Hodnocení výsledků únavových zkoušek dle normy .....	16
3.5.2 Hornův postup.....	17
3.6 Vady PSP.....	18
3.6.1 Vady PSP .....	18

<b>4. CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE .....</b>	<b>19</b>
4.1 Základní cíl .....	19
4.2 Vedlejší cíl .....	19
<b>5. ZVOLENÉ METODY ZPRACOVÁNÍ .....</b>	<b>20</b>
5.1 Statická zkouška tříbodovým ohybem.....	20
5.2 Únavová zkouška .....	20
5.3 Statistická analýza dat.....	20
<b>6. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST .....</b>	<b>21</b>
6.1 Použité materiály a výrobní technologie .....	21
6.1.1 Materiály jader.....	21
6.1.2 Materiály potahů.....	21
6.1.3 Použitý insert .....	21
6.1.4 Výroba vzorků .....	21
6.2 Experimentální zařízení a vybavení.....	22
6.2.1 Statická zkouška tříbodovým ohybem.....	22
6.2.2 Únavová zkouška.....	22
<b>7. VÝSLEDKY .....</b>	<b>23</b>
7.1 Výsledky únavových zkoušek.....	23
7.1.1 Vzorky bez insertu.....	23
7.1.2 Vzorky s insertem.....	23
7.2 S-N (Wöhlerovy) křivky .....	24
7.2.1 Vzorky bez insertu.....	24
7.2.2 Vzorky s insertem.....	27
7.3 Poškození nosníků z PSP po únavových zkouškách .....	28
7.3.1 Vzorky bez insertu.....	28
7.3.2 Vzorky s insertem.....	29
7.4 IRNDT .....	29
7.4.1 Aktivní IRNDT .....	29
7.4.2 Pasivní IRNDT .....	30
7.5 Rozbor výsledků experimentů .....	30

7.5.1	Vzorky bez insertu .....	31
7.5.2	Vzorky s insertem .....	32
<b>8.</b>	<b>PŘÍNOS PRÁCE PRO VĚDU A PRAXI .....</b>	<b>33</b>
8.1	Přínos pro vědu.....	33
8.2	Přínos pro praxi .....	33
	<b>ZÁVĚR.....</b>	<b>34</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....</b>	<b>35</b>
	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>40</b>
	<b>SEZNAM TABULEK .....</b>	<b>40</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....</b>	<b>41</b>
	<b>PUBLIKAČNÍ AKTIVITY AUTORA .....</b>	<b>44</b>
	<b>ODBORNÝ ŽIVOTOPIS AUTORA.....</b>	<b>47</b>



## 0. ÚVOD

Kompozitní materiály mají výrazně odlišné vlastnosti od klasických konstrukčních materiálů – kovů. Kovy mají homogenní izotropní materiálové a pevnostní vlastnosti. Při pevnostním návrhu konstrukce se navrhuje konstrukční materiál tak, aby jeho pevnostní charakteristiky odpovídaly místu maximálního namáhání. V dalších částech konstrukce je materiál „zbytečný“. Technologie kompozitních materiálů umožňuje vytvořit strukturu, která odpovídá poli napjatosti. Moderní kompozitní materiály mají ve srovnání s kovy celou řadu předností, např. nízkou hustotu, větší měrnou pevnost a odolnost povětrnostním vlivům. Při studiu vlastností kompozitních materiálů je nutno si uvědomit, že se jedná o nehomogenní anizotropní materiálovou strukturu.

Jedním z druhů kompozitních materiálů je sendvič, který lze označit za zvláštní druh laminátu. Sendvič se skládá aspoň ze tří vrstev různého charakteru, které jsou navzájem pevně spojeny (nejčastěji lepením). Vzniká tak strukturální sendvičová konstrukce, která se skládá ze dvou tenkých a pevných potahů a méně pevného jádra s výrazně větší tloušťkou, než mají potahy. Je-li alespoň jedna vrstva z polymeru a jádro z voštiny, pak se jedná o polymerní kompozitní sendvičovou konstrukci s voštinovým jádrem. Obsahem této práce je studium mechanických vlastností těchto konstrukcí.

Při studiu únavových vlastností kompozitních materiálů je nutno brát na zřetel zásadní rozdíl mezi kompozity a kovy, patrný zejména v otázce vzniku a šíření únavové trhliny. U kovů nejčastěji dochází k nukleaci únavové trhliny v jednom místě (např. v místě vrubu) a u kompozitních materiálů naopak ve velkém objemu kompozitního materiálu vznikají drobné trhlinky. U kovů pak dochází k šíření trhliny až do prasknutí součásti a u kompozitů se trhlinky spojují a častým pokračováním poškozování je pak delaminace, tj. rozlepování jednotlivých vrstev laminátu vedoucí k porušení součásti. Únavové poškozování sendvičů není doposud úplně prozkoumané. Jedním z důvodů je velmi složité mechanické chování sendvičové struktury, závislé na materiálových, technologických (kvalitativních) parametrech. Poškození sendviče může vzniknout v potahu, ve vrstvě lepidla mezi potahem a jádrem a ve vlastním jádře.

### Hlavní cíl disertační práce

Hlavním cílem disertační práce je studium únavových (životnostních) charakteristik jednoduchých sendvičových konstrukcí a konstrukce Wöhlerových (S–N) křivek na základě životnostních zkoušek těchto prvků.

### Poděkování

Tato práce byla realizována s finanční pomocí vnitřního grantu UTB ve Zlíně číslo: IGA/FT/2018/004 financovaný ze zdrojů specifického univerzitního výzkumu.

# 1. TERMINOLOGIE A DEFINICE

**Vzorek:** část nebo kus materiálu, který se má použít k jediné zkoušce.

**Spolehlivost:** dle [100] je spolehlivost definována následujícím způsobem: „*Spolehlivost* je souhrnný termín používaný pro popis pohotovosti a činitelů, které ji ovlivňují: bezporuchovost, udržovatelnost a zajištěnost údržby“. Tato práce však chápe spolehlivost obecněji v souladu s [2] jako „vědu o správné nebo nesprávné funkci objektu“. Obecně se jedná o spolehlivost konstrukce, kterou lze vyjádřit např. nejkratší životností.

**Životnost:** obecně je životnost chápána jako schopnost objektu plnit požadovanou funkci v daných podmínkách používání a údržby do dosažení mezního stavu. V této práci jde o únavovou životnost, což je počet vložených cyklů do dosažení definovaného kritéria porušení (mezního stavu).

**Únava:** souhrn degradačních procesů probíhajících v materiálu pod účinkem časově proměnných vnějších sil.

**Mezní stav (MS):** je stav, při kterém musí být ukončeno používání objektu z technických, technologických, ekonomických, bezpečnostních, aj. důvodů. Je to okamžik poruchy, kdy je ukončena schopnost neopravovaného výrobku plnit funkci. O MS v [1] a [3] je podrobně popsána teorie mezních stavů a mezní stav je definován jako „stav výrobku, ... kdy stavová veličina dosáhne své mezní hodnoty“. „Mezní hodnoty musí být stanoveny v technických podmínkách“. Z toho vyplývá nutnost definovat mezní stav pro tuto práci.

**Kompozitní materiál (KM):** konstrukční materiál složený ze dvou nebo více chemicky a fyzikálně odlišných složek (fází), které se vzájemně mezi sebou nerozpouštějí a mají mezi sebou vždy identifikovatelné fázové rozhraní; skládá se vždy z matrice a výztuže. Lze používat i slovo kompozit.

**Sendvič:** je tvořen různými jednoduchými nebo i složitými materiály různého charakteru, které jsou navzájem pevně spojeny (lepením) tak, aby při využití vlastností jednotlivých materiálů byly získány určité výhody pro konstrukci.

**Potah:** vnější část sendviče (povrch), vyrobená ze dvou tenkých, tuhých a pevných materiálů (plech, polymerní kompozitní materiál (prepreg).

**Jádro:** střední část sendviče mezi potahy z materiálu, který má velmi odlišné mechanické vlastnosti oproti potahům (je lehčí) a má za úkol zvýšit pevnost, tuhost a izolační schopnosti; jádro může být např. z balzy, voštiny.

**Voština:** je většinou nekorozivní materiál ve tvaru hexagonálních buněk nejčastěji z papíru (nomex), tenké fólie z hliníkové slitiny nebo polymeru.

**Polymerní kompozitní sendvičový panel s voštinovým jádrem (PSP):** je vrstvená konstrukce, skládající se ze tří základních vrstev: dvou potahů a jádra. U PSP je potah vždy z polymerního kompozitního materiálu, nejčastěji z laminátu se skelnou výztuží nebo z výztuží s uhlíkových vláken. Matrice bývá z epoxidové pryskyřice. Voštinové jádro může být vyrobené z fólie z hliníkové slitiny nebo z jiných materiálů (nomex).

**Insert:** upevňovací prvek používaný v sendvičových panelech pro přenos vnější síly do panelu.

## 2. SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

### 2.1 Sendvičové konstrukce

#### 2.1.1 Úvod do problematiky PSP

Základní rozdělení sendvičů lze provést např. dle:

- 1) Materiálu potahu:
  - s potahy kovovými (ze slitin kovů, např. oceli, hliník, titan),
  - s potahy nekovovými (vláknový kompozit (PKM), polyuretanové desky).
- 2) Materiálu jádra:
  - pěnová jádra (otevřená, uzavřená, polyuretanová, kovová, nekovová),
  - voštiny (kovová, nekovová; hliníkové slitiny, nomex),
  - tvarová jádra (vlnitá),
  - přírodní materiály (balza).
- 3) Výrobní technologie:
  - ruční (ruční laminování s dodatečným vakuováním),
  - polomechanizované (lisování),
  - výroba s pomocí autoklávu,
  - plně mechanizované a automatizované (kontinuální).

Sendviče jsou speciální kompozitní vrstvené materiály. Hlavní předností sendvičových konstrukcí je velmi nízká hmotnost a vysoká měrná ohybová pevnost a tuhost. Mechanické vlastnosti sendvičové konstrukce se zlepšují rostoucí tloušťkou jádra. Zároveň ale díky konstrukci jádra nedochází k výraznému nárůstu hmotnosti sendviče.

Přednosti sendvičové konstrukce:

- nízká hmotnost a zároveň vysoká nosnost,
- výborné mechanické vlastnosti zejména tuhost a pevnost v ohybu,
- poskytuje tepelnou (zjm. PUR jádro) i zvukovou izolaci,
- nepropustné vodě a vzduchu,
- nízké údržbové náklady, snadná výměna a oprava poškozených součástí,

Zápory sendvičové konstrukce:

- hořlavost u pěnových sendvičů,
- hořlavost při použití epoxidových pryskyřic,
- obtížná recyklace.

### 2.2 Materiálové složení PSP

#### 2.2.1 Jádro

Největší objem materiálů zauímají dva základní druhy materiálů pro výrobu jádra: pěna a voština. Pěnové jádro bývá vyrobeno z polymerních polyuretanových, polystyrenových, polypropylenových a polyethylenových pěn. Výhodou oproti voštinám je tvarovatelnost a cena. Na potahy se lepí.

Voštinová jádra jsou tvořena otevřenými, spojenými buňkami vyrobenými z velmi tenkých vrstev. Voštinová jádra mají při stejné hustotě lepší mechanické vlastnosti než jádra z polymerních pěn. Jako materiál pro výrobu voštin se používají buď kovy (hliníkové slitiny, nerezová ocel, titan) nebo nekovové materiály (skleněná vlákna, aramidová vlákna, nomex, aj.). Z hlediska vlastností je u jader důležitá hustota (s ní související měrná hmotnost), smykové a ostatní fyzikální vlastnosti (např. zvukově a tepelně-izolační). Ve stavbě dopravních prostředků hraje důležitou roli nehořlavost.

### **2.2.2 Potah**

Materiály potahů lze členit dle rozdělení v odstavci 2.1.1., tj. na kovové (plechy z hliníkových nebo titanových slitin nebo ocelí) a nekovové, zjm. vláknové kompozity s různou maticí (epoxidová, fenolová) a různou výztuží (skleněná a uhlíková vlákna). Zejména v letecké výrobě se vyžaduje pro výrobu potahů použití prepregů. Matrice v kompozitu potahu zaručuje tvarovou stálost součásti, polohu vláken, přenos a rozložení namáhání a ochranu vláken před okolními vlivy. Maticí polymerního potahu tvoří pryskyřice, což jsou polymerní materiály, buď reaktoplastické nebo termoplastické.

### **2.2.3 Prepregy**

Zvláštním druhem materiálu používaným pro vnější krycí vrstvy jsou prepregy. Jsou to vláknové materiály, již předem nasycené částečně vytvrzenou reaktivní pryskyřicí. U té již došlo k zesíťování molekul, ale hustota sítě je velmi malá. Používá se epoxidová i fenolická pryskyřice. K vytvrzování prepregu je obvykle potřebná vytvrzovací teplota (70 – 180) °C. Nevýhoda prepregu je, že je nutné jej skladovat v teplotách okolo -18°C. Před aplikací je potřeba prepreg na určitou dobu temperovat na teplotu místnosti.

## **2.3 Inserty**

Inserty jsou prvky, které slouží k přenosu vnějších sil do sendvičového panelu. Např. při použití šroubového spoje nelze šroub prostrčit skrz panel a pak dotáhnout matici. Došlo by k deformaci a zničení panelu. V místě umístění šroubu je třeba do zesílené části jádra vložit nosný prvek, vložku - insert. Šroub pak může tímto insertem procházet nebo být do insertu zašroubovaný.

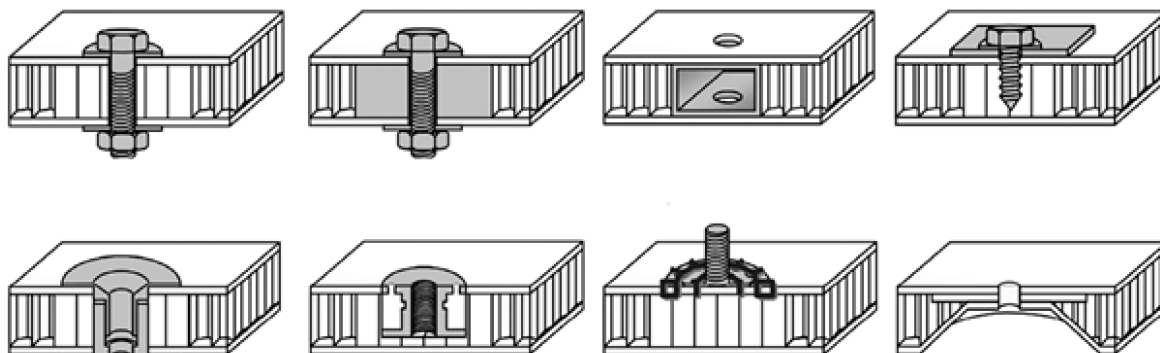
V [101] je uvedeno rozdělení insertů do tří základních skupin:

- typ A: insert vlepený při výrobě sendviče,
- typ B: zalitý nebo zalepený insert (nestandardní postup),
- typ C: mechanicky vložený insert.

System insertu se skládá ze tří základních komponentů:

- insertu,
- sendvičové struktury,
- zalévací hmoty.

Na Obr. 2.1 jsou uvedeny příklady insertů. Inserty jsou nejčastěji vyráběné např. z oceli, z nerezové oceli, titanové slitiny, hliníkové slitiny, z mosazi s různými úpravami povrchů (pasivované, elektrolyticky pokovené).



Obr. 2.1 Různé druhy insertů v PSP [38]

## 2.4 Výrobní technologie PSP

PSP lze vyrábět několika různými technologiemi. Při volbě technologie je nutno brát ohled na sériovost, složitost součásti, použité komponenty (materiál), rozměry a tvar (2D, 3D), na požadovanou kvalitu povrchu, kvalifikaci pracovníků, náklady na výrobu, apod. Stejně jako u výroby laminátových součástí, lze výrobu PSP rozdělit na:

- ruční technologie,
- částečně mechanizované,
- plně mechanizované (automatizované).

Pro výrobu voštinového jádra se používají dvě základní metody, z toho první je používanější [9]:

- expanzní proces,
- tvarovací (zvlňovací, vrapovací) proces

Základním principem výroby PSP je překrytí obou stran voštinového plátu potahy, které se při vytvrzení částečně roztaví a slepí s voštinou. Pokud není potah lepidlý, tak je nutno použít lepidlo ve formě fólie a to vložit mezi potahy a voštinu. Pro výrobu PSP se používají tři základní metody [10], z toho první byla využita při výrobě vzorků v této práci:

- rovinné lisování za tepla,
- s využitím vakuové fólie (bágu),
- lisování ve formě.

### 3. TEORETICKÝ RÁMEC

Při navrhování výrobků z PKM a PSP je nutno brát do úvahy složitost predikce vlastností napjatosti a deformace při cyklickém zatěžování, neboť poznatky o únavovém chování těchto materiálů nejsou úplné. V současné době je velmi obtížné předpovědět životnost KM ze statických zkoušek tak, jak je to možné např. u ocelí. Při dlouhodobém cyklickém namáhání KM může dojít vlivem vzniku vnitřní energie k zahřívání součásti a toto zatížení může přesáhnout zatížení způsobené prostým cyklováním. Mezi hlavní faktory ovlivňující životnost patří zatížení, teplota, stárnutí, ultrafialové záření, atd. Nejpřesnějším způsobem stanovení životnosti polymerního kompozitu je jeho sledování po celou dobu jeho provozu. To se často nedá provést a pak je nutno použít různé metody předpovědi životnosti, kdy se životnost studovaného kompozitu vypočte z individuálních faktorů nebo krátkodobých testů.

#### 3.1 Mechanické vlastnosti nosníku z PSP

##### 3.1.1 Problematika únosnosti nosníku z PSP

Na rozdíl od konstrukcí z homogenních materiálů není výsledná únosnost sendvičů v ohybu dána pouze materiálovými charakteristikami. Tato únosnost je dána výslednicí složitého mechanického chování sendvičové struktury. Únosnost sendvičů tedy závisí na geometrických, materiálových a technologických parametrech. Nosník z PSP může být v průběhu zatěžování poškozen v jedné i více vrstvách, ze kterých je složen. Kromě poškození potahu nebo jádra je problémem soudržnost všech vrstev.

#### 3.2 Statické zatěžování nosníku z PSP v ohybu

Pro nosník na dvou podporách, zatížený uprostřed osamělou silou  $F$  [N], („tříbodový ohyb“) platí, že celkové napětí v ohybu se rovná součtu ohybového napětí v potahu  $\sigma_f$  [MPa] a smykového napětí v jádře  $\tau_c$  [MPa], přičemž smykové napětí nabývá o mnoho menších hodnot, jak ohybové [13]. Ohybové napětí lze vypočítat dle rovnice (3.1):

$$\sigma_f = \frac{F_{B,i} \cdot L \cdot h}{4 \cdot b \cdot t_f \cdot d^2} \quad (3.1)$$

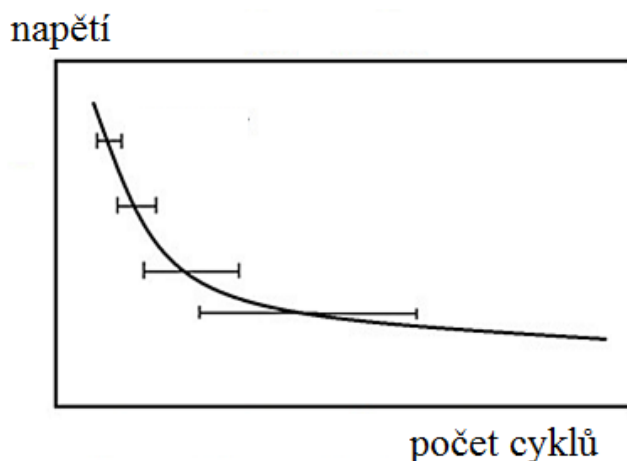
kde:  $\sigma_f$  je ohybové napětí [MPa],  $F_{B,i}$  - zatěžující síla [N],  $L$  - vzdálenost podpěr [mm],  $h$  - výška vzorku [mm],  $b$  - šířka vzorku [mm],  $t_f$  - tloušťka potahu [mm],  $t_c$  - tloušťka jádra [mm],  $d$  - se vypočte:  $d = t_f + t_c$

Uvedená napětí je nutno považovat za **efektivní** (zdánlivá). Statická zkouška v ohybu v této práci je potřebná jen pro určení zatěžovacích hladin při únavovém zatěžování. Problematika u voštinového jádra je komplikovaná tzv. indentací (lokální zatížení).

### 3.3 Životnost konstrukcí z PSP

Křivku, která popisuje je statisticky vyhodnocené experimenty únavového zatěžování nazýváme Wöhlerova křivka (S-N), Obr. 3.1. Tato křivka zobrazuje závislost amplitudy napětí  $\sigma_a$  na počtu cyklů  $N$ .

Na svislé ose  $S$  může být vynesena i jiná jednotka, než je napětí, např. poměrná deformace, normovaná zbytková tuhost, amplituda průhybu (v mm) nebo hladiny v % z maximální síly (poslední dvě použity v této práci).



Obr. 3.1 Teoretická Wöhlerova (S-N) křivka

Teoretickou Wöhlerovu křivku (Obr. 3.1) lze rozdělit na oblast nízkocyklové (do  $10^5$  cyklů) a vysokocyklové únavy (od  $10^6$  cyklů do lomu). Od určité hodnoty počtu cyklů, kdy je Wöhlerova křivka rovnoběžná s osou  $x$  se jedná o mez únavy  $\sigma_{muc}$  nebo-li o neomezenou životnost.

Při dostatečném množství vzorků (od 20 kusů) se pro statistické rozdělení životů vzorků nejčastěji volí normální, logaritmickeo-normální nebo Weibullovo rozdělení. Pro získání křivky se využije regresní křivka proložená průměrnými, lépe mediánovými hodnotami nebo odhady střední hodnoty. Vodorovné úsečky na Obr. 3.1 znázorňují rozptyly naměřených hodnot na daných hladinách zatížení. V této práci bude ověřena hypotéza, že rozptyly jsou největší na nejnižší hladině zatěžování (stejně jako u oceli).

#### 3.3.1 Únavové zatěžování konstrukcí a analýza zatěžování

Zatížení konstrukce může mít charakter statický, kvazistatický nebo proměnlivý (nahodilý). Hlavní náplní této práce je výzkum nahodilého zatěžování.

Únavový proces lze členit dle různých kritérií:

- podle zatěžujících podmínek (měkké zatěžování, tvrdé zatěžování, aj.),
- podle pracovních podmínek a prostředí (normální podmínky, vakuum, zvýšené - snížené teploty, atd.),

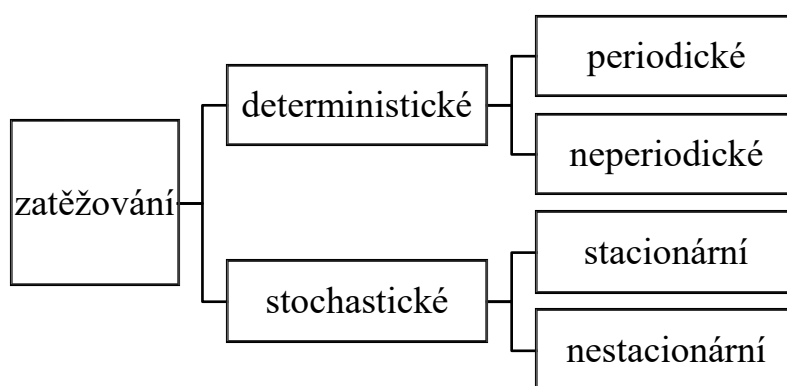
- podle zkušebních objektů (standardní vzorky, nestandardní vzorky, konstrukční části, celé zařízení).

Důležitým poznatkem je to, že životnost složité konstrukce je ovlivněna životností jednotlivých prvků konstrukce a je nižší, než životnost jednotlivých prvků. Únavový proces ovlivňuje především:

- použitý materiál a jeho charakteristiky,
- tvar součásti a konstrukční řešení,
- technologie výroby součásti,
- provozní podmínky.

### ***Klasifikace proměnlivého zatížení***

Náhodné zatížení v podobě kmitavých procesů lze dělit podle Obr. 3.2.



*Obr. 3.2 Rozdělení proměnlivého zatěžování*

### **3.3.2 Únavové vlastnosti PSP**

PSP mají specifické vlastnosti s hlediska únavové životnosti. Problematika je komplikovaná odlišnými vlastnostmi každé z uvedených složek. U zkoušek PSP jde vždy o zkoušky konstrukčního prvku. Proto ke známým činitelům, které mají vliv na dosažený počet cyklů, tj. velikost napětí, struktura jednotlivých složek, geometrický tvar, rozměry a stav povrchu, přibývají komplikace vyplývající z náročné výrobní technologie lepení. Výsledkem statistického zpracování únavových zkoušek PSP je grafické zobrazení s využitím klasické S-N (Wöhlerovy) křivky. V případě dostatečného počtu vzorků se určuje medián životnosti, nejkratší životnost, dolní mez únavové životnosti a spolehlivost odhadů statistických veličin. V případě malého počtu vzorků je nutno použít metody analýzy malých výběrů (Hornův postup) – použito v této práci.

### **3.3.3 Únavové vlastnosti insertů**

Při únavovém zatěžování mohou být poškozovány všechny prvky z insertního systému: jádro, potah, zalévací hmota i insert [101]. Velký vliv na životnost má celkové geometrické uspořádání umístění insertu v panelu. Hlavní roli hraje tvar



a velikost objemu, který zabírá zalévací hmota v buňkách voštiny. Méně pravděpodobné je porušení potahu. Akumulace únavového poškození v jádru při cyklickém zatěžování závisí na třech hlavních proměnných:

- místní smykové zatížení (rozměr zalitého objemu jádra, výška jádra, koncentrace napětí,
- aplikovaná zatěžovací sekvence: střední napětí, druh zátěžného cyklu, počet cyklů,
- odolnost materiálů proti únavě.

### **3.3.4 Mezní stav PSP**

Termín mezní stav (MS) je definován v kapitole 1 a jde o ztrátu schopnosti plnit zadanou funkci. Faktory, které mají vliv na MS jsou:

- provozní,
- technologické,
- materiálové.

Definice MS pro tuto práci: Mezní stav deformační stability vzorku je takový stav, při jehož dosažení se jeho geometrická konfigurace stane nestabilní. V této práci znamená, že k dosažení nestability stačí vyvození lidské síly (vzorek – nosník lze ohnout lidskou rukou bez použití náradí nebo jiných pomůcek). Přitom musí být prostým okem viditelná aspoň jedna porucha vzorku:

- prasklý aspoň jeden potah v celé šířce  $b$  [mm] vzorku,
- odlepený aspoň jeden potah od jádra v celé šířce  $b$  vzorku,
- prasklé nebo trvale deformované jádro v celé šířce  $b$ , vzorku,

## **3.4 Únavové zkoušky PKM a PSP**

Při návrhu metodiky únavové zkoušky PKM a PSP lze vycházet se standardizovaných zkoušek kovových materiálů [106] a např. normy [107]. Přitom je nutno brát do úvahy frekvenci zatěžování. Při cyklickém zatěžování dochází k ohřevu zkušebního tělesa (autogenous, selfgeneratedheating). Vlákny vyztužené kompozity mají nižší teplotní vodivost a vyšší vnitřní tlumení. Maximální přípustný nárůst teploty je dán závislostí mechanických vlastností na teplotě. Např. [107] připouští nárůst teploty o max.  $10^{\circ}\text{C}$ .

## **3.5 Statistické metody v únavě**

Únavové zkoušky jsou takové, kdy se vzorek zkouší do poruchy (do poškození, zničení). U každého vzorku nastane porucha při jiném počtu cyklů. Počet cyklů je náhodnou veličinou. Při mnohonásobném opakování zkoušek mnoha vzorků lze vysledovat zvláštní pravidelnost, kterou lze vyjádřit rozdělením pravděpodobností náhodné veličiny.

### **3.5.1 Hodnocení výsledků únavových zkoušek dle normy**

Výsledky únavových zkoušek je možno vyhodnotit dle [106].

### 3.5.2 Hornův postup

#### *Analýza malých výběrů* [33]

Malé výběry jsou ty, které osahují méně jak dvacet naměřených hodnot. U malých výběrů jsou výsledky analýzy zatíženy značnou mírou nejistoty. U souborů s méně jako deseti hodnotami, nelze zamítnout normalitu. Analýza malých výběrů se používá pouze tam, kde z **ekonomických nebo časových důvodů není možné získat větší počet dat**.

#### *Malé výběry*

Metoda nesoucí název **Hornův postup**: pro počet hodnot  $4 \leq n \leq 20$

- Postup se zakládá na pořádkových statistikách,  $x_{(i)}$ .  
- naměřené hodnoty se musí seřadit od minima po maximum.
- Hloubka pivotu jde ze dvou rovnic (3.1) a (3.3):

$$H = \frac{\left( \text{int} \left( \frac{(n+1)}{2} \right) \right)}{2} \quad (3.1)$$

$$H = \frac{\left( \text{int} \left( \frac{(n+1)}{2} \right) + 1 \right)}{2} \quad (3.3)$$

dle toho se určuje, které číslo vyjde celé a dolní pivot je potom (3.4):

$$x_D = x_{(H)} \quad (3.4)$$

a horní pivot (3.5):

$$x_H = x_{(n+1-H)} \quad (3.5)$$

- Jinak řečeno maximální a minimální hodnota, ze které se dále vyhodnocují následující parametry.
- Odhadem parametru polohy je pivotová polosuma (3.6):

$$P_L = \frac{(x_D + x_H)}{2} \quad (3.6)$$

- Odhadem parametru rozptýlení je pivotové rozpětí (3.7):

$$R_L = x_H - x_D \quad (3.7)$$

Náhodná veličina  $T_L$ , kterou můžeme použít k testování má přibližně symetrické rozdělení (3.8):

$$T_L = \frac{P_L}{R_L} = \frac{x_D + x_H}{2(x_H - x_D)} \quad (3.8)$$

- Hornovy kvantily:
  - $t_{L'1-\alpha}(n)$  rozdělení  $T_L$

## 3.6 Vady PSP

### 3.6.1 Vady PSP

U sendvičů může dojít k vadám různého typu. Potahy představují tenkostěnné prvky, uložené na pružném jádru. Potahy jsou tedy náchylné ke ztrátě stability. Tato porušení mohou být doprovázena odlepením potahu od jádra a následným porušením – prasknutím potahu. Při působení místní osamělé síly může dojít k místnímu zdeformování jádra vlivem místního prohnutí potahu a následnému prasknutí jádra a poté potahu.

Vady PSP mohou být rozděleny do čtyř skupin podle závažnosti a celkového vlivu vady na konstrukci PSP:

- 1. skupina - povrchové vrypy, důlky, škrábance nebo eroze potahů, které nejsou doprovázeny proražením nebo prasknutím potahu,
- 2. skupina - proražení nebo prasknutí potahu na jedné straně sendviče, případně doprovázené poškozením jádra,
- 3. skupina - poškození, které zasahují oba potahy a jádro,
- 4. skupina - rozsáhlá poškození vyžadující kompletní výměnu součástky.

#### ***Poškození PSP v důsledku ztráty adheze a koheze***

Ztráta adheze představuje selhání vazby (lepeného spoje) mezi lepidlem a lepeným materiálem. Příčinami ztráty adheze mohou být:

- nedostatek adhezivního prostředku,
- nedostatek chemických vazeb mezi lepidlem a lepeným materiálem,
- špatná povrchová úprava nebo kontaminace lepeného materiálu,
- použití špatného druhu lepidla pro daný lepený materiál.

Ztráta koheze představuje selhání soudržnosti v rámci adhezivní vrstvy, kdy příčinou může být:

- špatně vytvrzené lepidlo,
- vlhkost nebo jiné nečistoty přítomné v lepidle,
- vyšší než předpokládané zatížení PSP.

## **4. CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE**

### **4.1 Základní cíl**

Základním cílem disertační práce je výzkum životnosti kompozitních konstrukcí z polymerních kompozitních sendvičových panelů s voštinovým jádrem (PSP). Základním úkolem je nalezení vhodné (levné) metodiky, použitelné zejm. při vývoji pozemních dopravních prostředků.

V této disertační práci bude zkoumána hypotéza o tom, že různě konstrukčně řešené prvky z kompozitních sendvičových panelů s voštinovým jádrem o stejné statické únosnosti (pevnosti) mají různou únavovou životnost způsobenou zejména rozdílnými použitými materiály v jednotlivých vrstvách. Dále bude ověřena hypotéza, že konstrukční a materiálové uspořádání kompozitní konstrukce má vliv na její životnost. Dále bude zkoumána obecně platná hypotéza o velkém rozptylu naměřených dat (cyklů) na nízké hladině zatěžování, oproti rozptylu dat na vysoké hladině zatěžování.

Výsledkem zkoumání životnosti sendvičů bude navržena levná metoda na získání S-N (Wöhlerových) křivek, které mohou sloužit k predikci životnosti konstrukcí z PSP.

Důležitými kroky pro dosažení stanoveného základního cíle jsou:

- rešerše poznatků z problematiky životnosti PSP,
- rešerše problematiky statistického zpracování únavových zkoušek,
- konstrukce jednoduchého zkušebního zařízení pro životnostní zkoušky,
- návrh a provedení experimentů za účelem získání vstupních dat,
- nalezení a ověření vhodné statistické metody pro vyhodnocení a porovnání naměřených dat – malých výběrů,
- vyhodnocení získaných dat.

### **4.2 Vedlejší cíl**

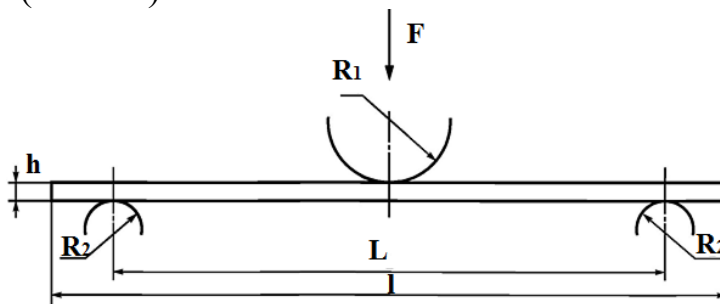
Vedlejším cílem je ověření možnosti použití metod aktivní i pasivní infračervené termografie pro detekci vad PSP.

Veškeré zkoumání bude jen za standardních laboratorních podmínek. Nebude zkoumán vliv teploty, vlhkosti a dalších vlivů (např. střední hodnoty zatížení u cyklického namáhání, změna tuhosti s počtem cyklů, aj.).

## 5. ZVOLENÉ METODY ZPRACOVÁNÍ

### 5.1 Statická zkouška třibodovým ohybem

Statická zkouška PKM a PKSPVJ třibodovým ohybem je normalizovaná, viz [102] a lze využít i norem [103] a [104]. V této práci jsou uvedené normy použity jen jako vzor a nejsou plně dodrženy. Důvodem je srovnatelnost výsledků této práce s již dříve provedenými experimenty. Uspořádání ohybové zkoušky „třibodovým ohybem“ je na Obr. 5.1. Tato zkouška byla provedena jen se vzorky bez insertu s jádrem z hliníkové slitiny a prepregovým potahem s výztuží ze skelných vláken (bALSV).



Obr. 5.1 Uspořádání statické zkoušky „třibodovým ohybem“ [103]

Statická zkouška je nutná pro získání zatěžovacích parametrů použitých v únavových zkouškách, tj. pro stanovení hladin. Podstatou zkoušky je, že vzorek je ve zkušebním přípravku ohýbán při konstantní rychlosti, dokud nedojde k jeho porušení. Během zkoušky se měří síla při porušení  $F_{B,i}$  a průhyb při porušení  $f_{B,i}$ . Jedná se o lineární závislost.

### 5.2 Únavová zkouška

Podle kapitoly 3 a s ohledem na možnosti testovacího stroje byl v této práci použit pro vzorky bez insertu koeficient nesouměrnosti  $R = 0$  (míjivý ohyb) a vzorky byly prohýbány až na  $\sigma_{max}$  - horní napětí cyklu. Pro vzorky s insertem byl použit koeficient nesouměrnosti  $R = 1$  (souměrně střídavý ohyb) a vzorky byly namáhány amplitudou danou v mm. Vzorky s jádrem z hliníkové slitiny a prepregovým potahem s výztuží (bALSV) ze skelných vláken byly cyklovány měkkým zatěžováním ve čtyřech hladinách. Ostatní materiálové kombinace byly zatěžovány na stejnou deformaci, jako byla u vzorků bALSV.

### 5.3 Statistická analýza dat

Statistická analýza naměřených dat je provedena pomocí výpočetní techniky. Testování dat neprovedeno – malé množství měřených vzorků - kuriózní data.

## 6. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

### 6.1 Použité materiály a výrobní technologie

#### 6.1.1 Materiály jader

Pro jádra byly použity dva druhy materiálů:

- 1) Pro jádro označené Al byla použita hliníková voština od firmy EURO-COMPOSITES, obchodní označení: ECM 6,4-60. Hliníková slitina byla Aul-Alloy 3003 (AlMnCu) s povrchovou úpravou oxidem zirkončitým. Hustota:  $60 \text{ kg.m}^{-3}$ . Jmenovité rozměry: velikost buňky  $6,4 \text{ mm}$  a výška buňky  $7,0 \text{ mm}$  (skutečný rozměr  $t_c = 6,6 \text{ mm}$ ).
- 2) Pro jádro označené No byl použit nomex od firmy Schutz composites, obchodní označení: Cormaster C2-6,4-64. Hustota:  $64 \text{ kg.m}^{-3}$ . Jmenovité rozměry: velikost buňky  $6,4 \text{ mm}$  a výška buňky  $7,0 \text{ mm}$ .

#### 6.1.2 Materiály potahů

Na potahy všech experimentálních vzorků byly použity tři prepregové vrstvy. V obou materiálových verzích byl použit prepreg byl od firmy G. Angeli:

- 1) Na potah označený Sv byl použit prepreg, obchodní označení: IMP503/VV 192 T. Hustota skelné tkaniny byla  $202 \text{ g.m}^{-2}$  a vazba kepr 2/2.
- 2) Na potah označený Uv byl použit prepreg, obchodní označení: IMP503Z/GG204 T. Hustota uhlíkové tkaniny byla  $204 \text{ g.m}^{-2}$  a vazba kepr 2/2. Podíl výztuže u obou materiálů byl 59%.

#### 6.1.3 Použitý insert

Jako insert byly použity ocelové závitové vložky samořezné s řeznou drážkou určené pro výrobu vysoce namáhaných a vibračně odolných šroubových spojů v materiálech s nízkou pevností ve stříhu (např. v hliníku, mosazi, termoplastech). Rozměr byl vnitřní závit:  $4,0 \text{ mm}$ , velký průměr  $6,5 \text{ mm}$  a délka  $8,0 \text{ mm}$ ,

#### 6.1.4 Výroba vzorků

Pro výrobu vzorků určených pro tuto práci byl použit školní laboratorní vulkanizační lis.

Před lisováním byly připraveny voštinové desky rozměru  $(210 \times 210) \text{ mm}$ . Prepreg vyjmutý z mrazicího boxu byl vytemperován na laboratorní teplotu a také nastříhán na rozměr  $(210 \times 210) \text{ mm}$ . Ručním kladením byly na obě strany voštinového jádra položeny tři vrstvy prepregu, shora opatřené vrstvou teplotě odolného papíru (separační vrstva). Lisování probíhalo 15 minut při teplotě  $150^\circ\text{C}$ . Před lisováním neprobíhal náběh na pracovní teplotu. Po lisování probíhalo chladnutí vylisované sendvičové desky na laboratorní teplotu mimo lis. Z vylisované sendvičové desky byly na kotoučové pile nařezány vzorky o rozměrech  $l = 200 \text{ mm}$ ,  $b = 45 \text{ mm}$  a  $h = 7,6 \text{ mm}$ . Tloušťka potahu ze skelného pre-

pregu byla  $t_c = 0,5 \text{ mm}$  a tloušťka potahu z uhlíkového prepregu byla  $t_c = 0,5 \text{ mm}$ . Podkladem pro výrobu vzorků byla norma [109].

Výroba sendvičových panelů s inserty proběhla obdobně. Jen lisování bylo rozděleno na dva kroky z důvodu zalití zalévací hmoty. Pro zalévací hmotu byla použita epoxidová pryskyřice od firmy Havel Composites, s obchodním označením L285 a příslušné tvrdidlo. Po vytvrzení pryskyřice byla změřena její tvrdost: 75 Shore D. Prostor ve voštině byl připraven ručním odstraněním části voštiny. Inserty byly s pomocí šroubu ručně zařezány do připravených otvorů v zalévací hmotě.

## 6.2 Experimentální zařízení a vybavení

### 6.2.1 Statická zkouška tříbodovým ohybem

Použit byl stroj pro statické zkoušení Zwik/Roell, typ: 145665, výrobní číslo: 122480/93. Schéma zkoušky je na Obr. 5.1.

### 6.2.2 Únavová zkouška

Únavová zkouška byla provedena na zkušebním zařízení vlastního konstrukčního návrhu a výroby (Obr. 6.1). Jedná se klasický klikový mechanismus s pístnicí poháněný přes převody elektromotorem s říditelnými otáčkami. Zařízení je bez možnosti měření zatěžující síly  $F_{max,i}$ . Změnou polohy ojnice lze nastavit amplitudu kmitu (v mm) a změnou délky ojnice lze nastavit střední napětí (v mm). Při známých otáčkách elektromotoru a převodovém poměru lze měřením času získat počet měřených cyklů. Na zkušební zařízení bylo vydáno Osvědčení o zápisu užitého vzoru ČR č. 31443.



Obr. 6.1 Zkušební zařízení pro únavovou zkoušku

Napětí na hladinách bylo vypočteno dle rovnice (3.1). Zatěžující síly  $F_{b,i}$  byly určeny jako procenta ze zatěžující síly při porušení vzorku u statické zkoušky „tříbodovým ohybem“ ( $F_B$ ). Jednalo se o 80%, 65%, 50% a 35% z aritmetického průměru síly  $F_B = 891 \text{ N}$ .

## 7. VÝSLEDKY

### 7.1 Výsledky únavových zkoušek

#### 7.1.1 Vzorky bez insertu

Podle kapitol 3. a 5. byly stanoveny čtyři hladiny zatížení  $\sigma_{max,1} = 94 \text{ MPa}$  (35%),  $\sigma_{max,2} = 134 \text{ MPa}$  (50%),  $\sigma_{max,3} = 175 \text{ MPa}$  (65%) a  $\sigma_{max,4} = 215 \text{ MPa}$  (80%), které byly spočítány dle rovnice (3.1). Tyto hladiny jsou uvedeny v Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.. Síly  $F_{max,i}$  [N] byly vypočítány jako procenta aritmetického průměru síly  $F = 891 \text{ N}$  (lineární závislost; dtto určení průhybů  $f_{max,i}$  [mm]). Podle popisu zkušebního zařízení z odstavce 6.2.2 byly změřeny počty cyklů  $N_i$  (Tab. 7.1) a dle odstavce 3.5.2 počítačem vypočtené statistické charakteristiky.

Tab. 7.1 Naměřené počty cyklů u vzorků bez insertů

Jádro		Al		No	
Potah		Sv	Uv	Sv	Uv
		Počty naměřených cyklů $N_i$ [-]			
Hladina:	<b>A: 35% z <math>f_{b,i}</math></b> (2,1 mm), $\sigma_{max,1}$ = <b>94 MPa</b>	1015200	998280	786780	321480
		1015200	1015200	549900	507600
		693720	1015200	642960	360548
		795240	1015200	1015200	520498
	<b>B: 50% z <math>f_{b,i}</math></b> (3,0 mm), $\sigma_{max,2}$ = <b>134 MPa</b>	59220	2825	14100	67680
		93060	2250	11285	62028
		50760	1134	47934	67680
		59220	1692	23688	67108
	<b>C: 65% z <math>f_{b,i}</math></b> (4,0 mm), $\sigma_{max,3}$ = <b>175 MPa</b>	1658	67	615	1810
		7563	150	499	2707
		3350	108	237	1357
		3570	41	356	1472
	<b>D: 80% z <math>f_{b,i}</math></b> (4,9 mm), $\sigma_{max,4}$ = <b>215 MPa</b>	1007	17	246	73
		1354	21	306	62
		710	16	309	69
		2487	15	310	57

#### 7.1.2 Vzorky s insertem

Obdobně jako u vzorků bez insertu byly stanoveny čtyři hladiny zatížení – amplitudy:  $u_1 = 1,8 \text{ mm}$ ,  $u_2 = 2,5 \text{ mm}$ ,  $u_3 = 3,0 \text{ mm}$  a  $u_4 = 3,4 \text{ mm}$ . Tyto hladiny jsou uvedeny v Tab. 7.2. Podle popisu zkušebního zařízení z odstavce 6.2.2 byly změřeny počty cyklů  $N_i$  (Tab. 7.2) a dle odstavce 3.5.2 počítačem vypočtené statistické charakteristiky.



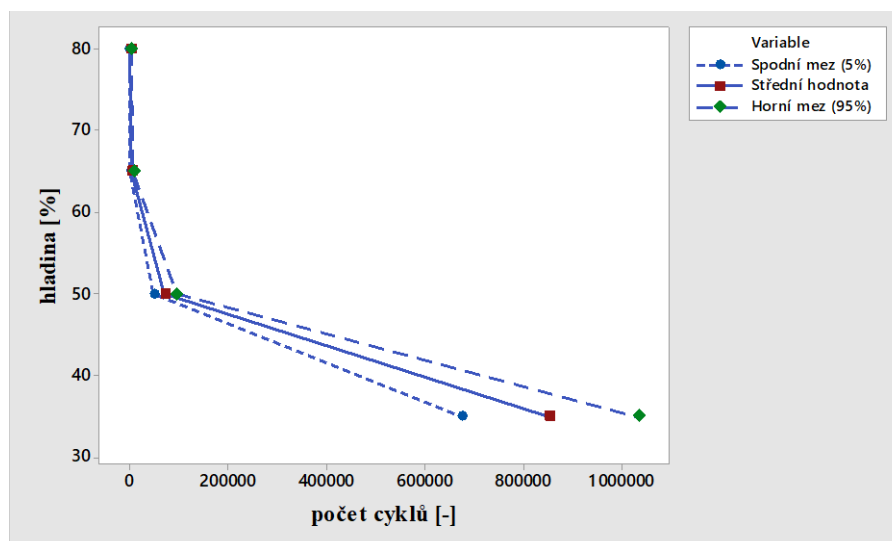
Tab. 7.2 Naměřené počty cyklů u vzorků s inserty

Jádro		Al	
Potah		Sv	Uv
		Počty naměřených cyklů $N_i$ [-]	
Hladina:	A (u = 1,8 mm)	5076	3942
		6946	3218
		5123	3838
		7859	2774
	B (u = 2,5 mm)	3384	4230
		5922	4517
		3096	3096
		5060	3133
	C (u = 3,0 mm)	1181	2377
		2470	2279
		902	2542
		1433	2261
	D (u = 3,4 mm)	174	74
		253	28
		108	43
		130	57

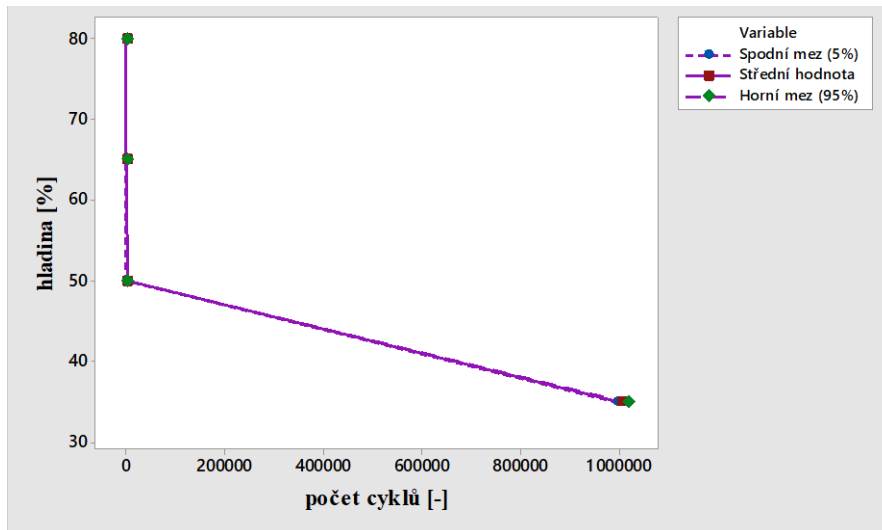
## 7.2 S-N (Wöhlerovy) křivky

Na následujících obrázcích (Obr. 7.1 – Obr. 7.10) jsou znázorněny Wöhlerovy křivky. Jedná se o spojnice jednotlivých bodů – statisticky zpracovaných naměřených hodnot. V závorce je uvedena střední hodnota  $\mu$  pro hladinu A.

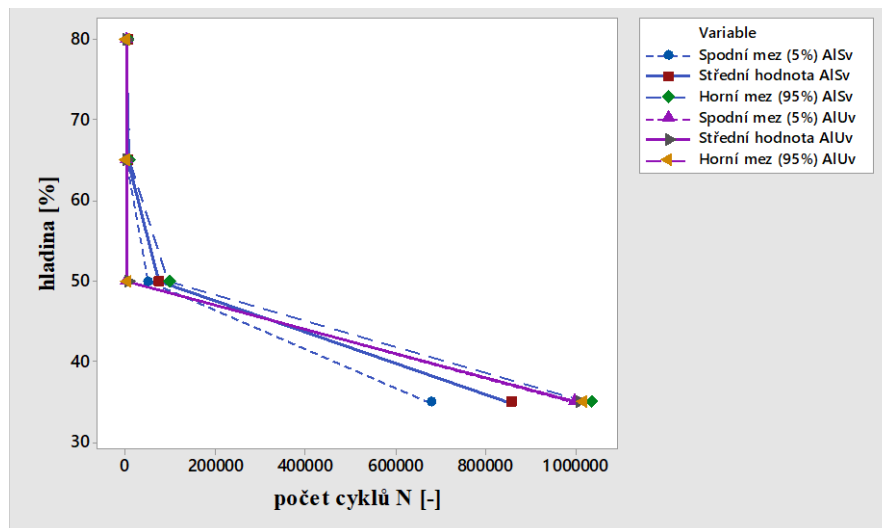
### 7.2.1 Vzorky bez insertu



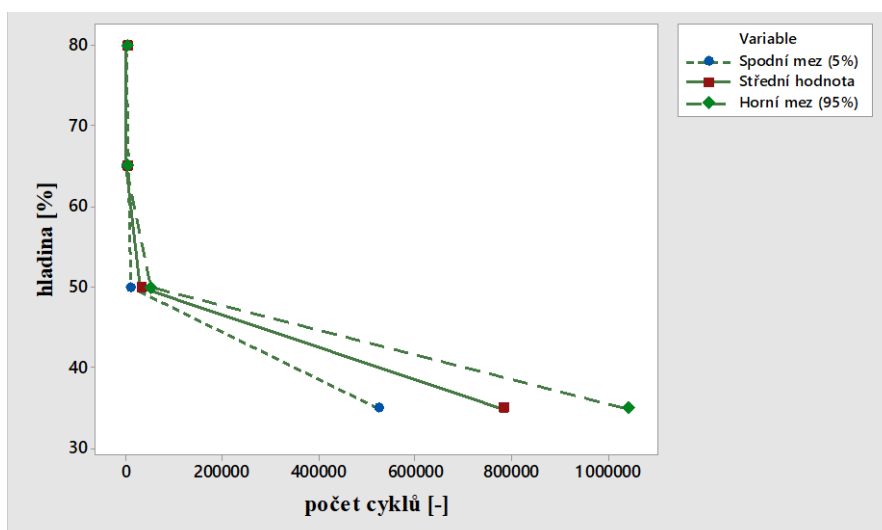
Obr. 7.1 Wöhlerova křivka bAlSv (854460)



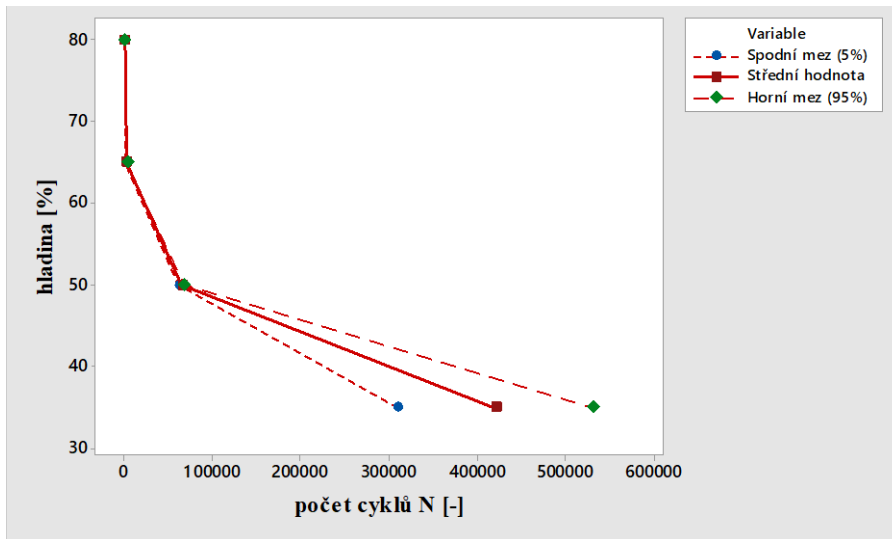
Obr. 7.2 Wöhlerova křivka bAlUv (1006740)



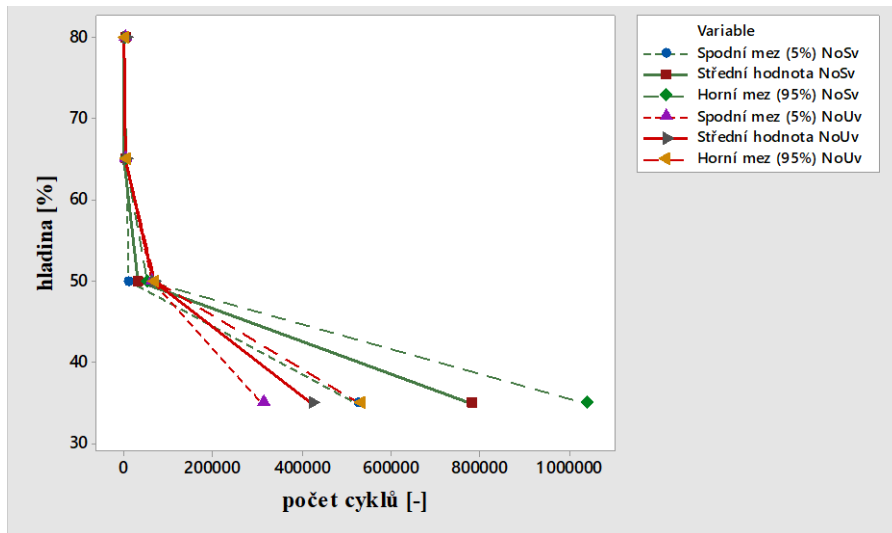
Obr. 7.3 Wöhlerovy křivky bAlSv+bAlUv (854460 + 1006740)



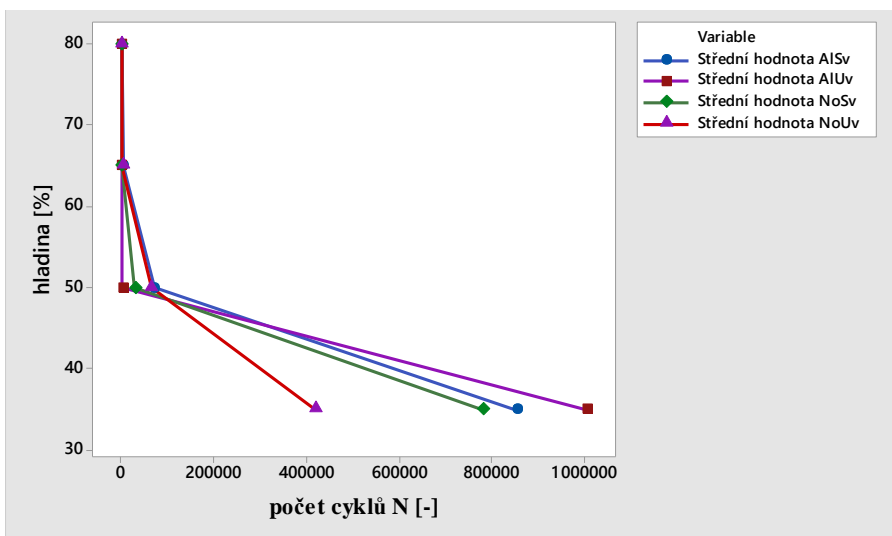
Obr. 7.4 Wöhlerova křivka bNoSv (782550)



Obr. 7.5 Wöhlerova křivka bNoUv (420989)

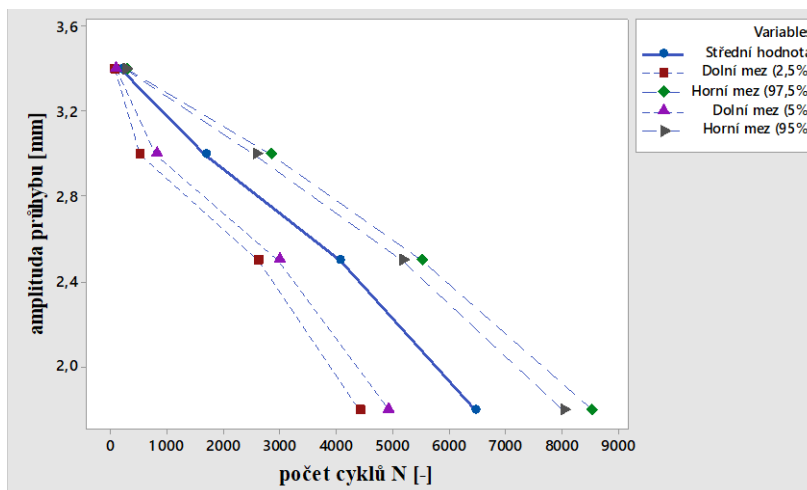


Obr. 7.6 Wöhlerova křivka bNoSv+bNoUv (782550 + 420989)

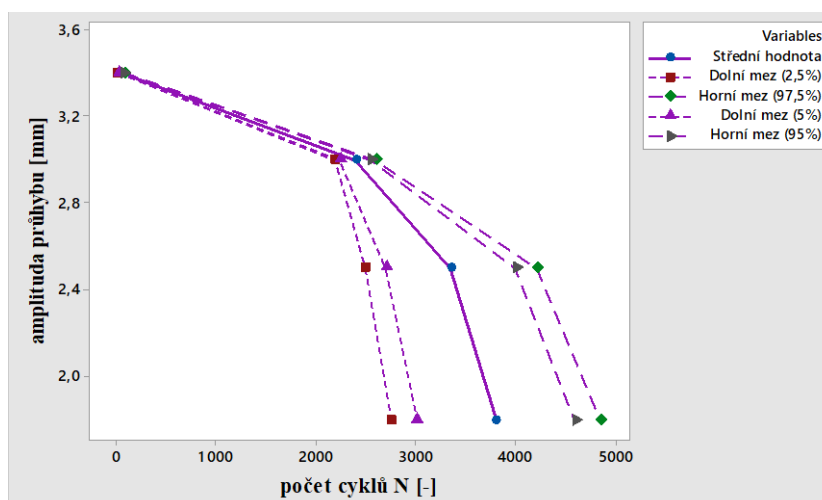


Obr. 7.7 Porovnání Hornových středních hodnot  $\mu$  všech vzorků bez insertu

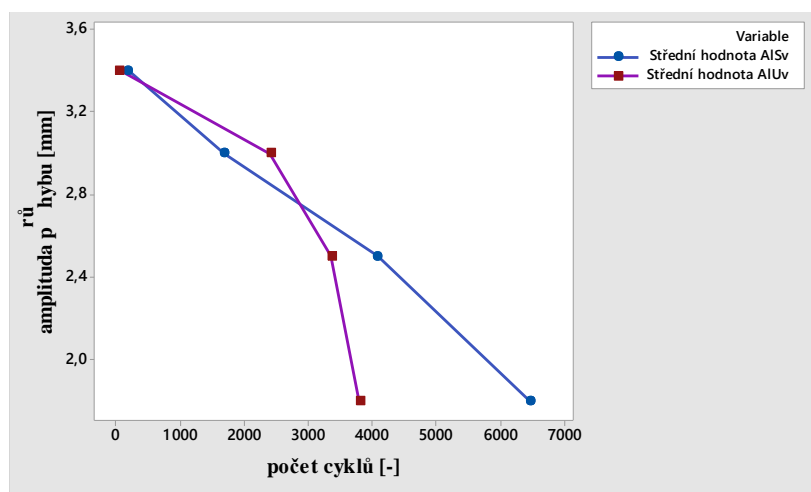
## 7.2.2 Vzorky s insertem



Obr. 7.8 Wöhlerova křivka sAlSv (6468)



Obr. 7.9 Wöhlerova křivka sAlUv (3807)



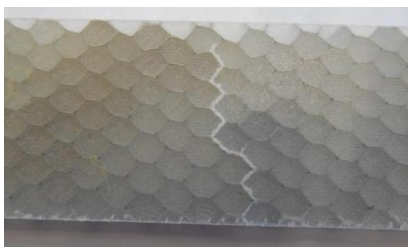
Obr. 7.1 Porovnání Hornových středních hodnot vzorků s insertem sAlSv+sAlUv (6468 + 3807)

## 7.3 Poškození nosníků z PSP po únavových zkouškách

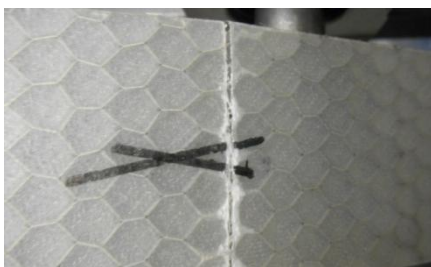
### 7.3.1 Vzorky bez insertu



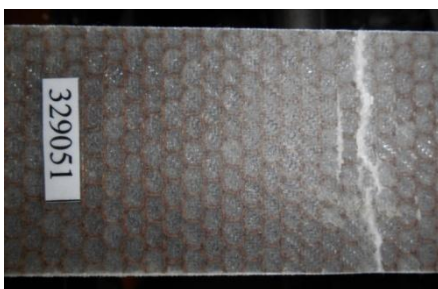
*Obr. 7.2 Trvalé prohnutí vzorku (bAlSv)*



*Obr. 7.3 Prasklina potahu po hranicích voštinových buněk (bAlSv)*



*Obr. 7.4 Přímá prasklina potahu (bAlSv)-(93% vzorků)*



*Obr. 7.14 Roztřepená, zdvojená prasklina (bNoSv)*

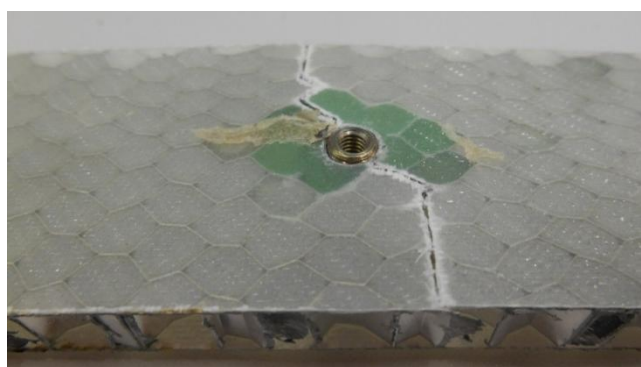


*Obr. 7.15 Dlouhá prasklina jádra (smyk jádra), z počátku rovnoběžná s potahem (bNoUv)*

### 7.3.2 Vzorčky s insertem



*Obr. 7.16 Prasklina potahu tečující insert (sAlUy)*



*Obr. 7.17 Zalomená prasklina jdoucí „středem“ insertu (sAlSv)-(58% vzorků)*

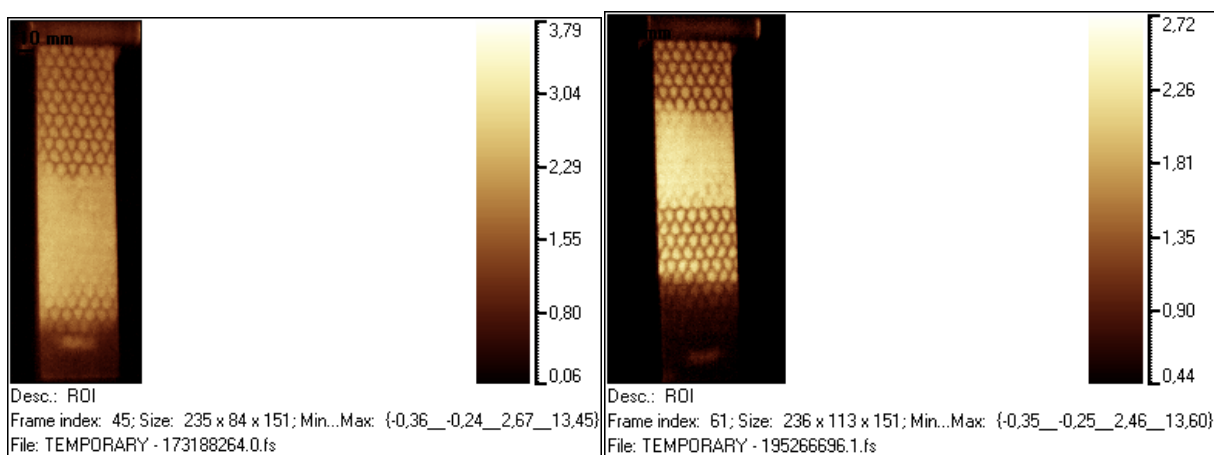


*Obr. 7.18 Rozsáhlá deformace jádra a odlepení obou potahů (sAlSv)-(14% vzorků)*

## 7.4 IRNDT

### 7.4.1 Aktivní IRNDT

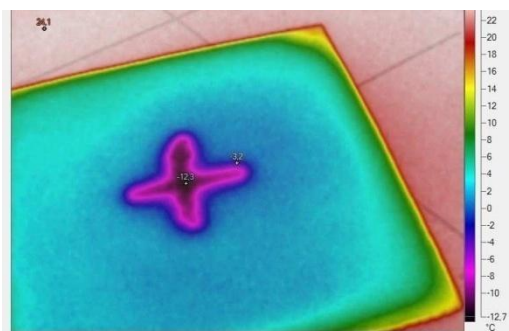
Pro aktivní IRNDT byly využity pilotní vzorky. Na Obr. 7.19 je zcela jasně vidět hranice odlepení potahu od jádra. V ploše, kde jsou potahy přilepeny k voštinovému jádru je dobře viditelný tvar voštinových buněk. V místě, kde je potah odlepený, je tvar buněk vidět nezřetelně.



*Obr. 7.19 Pilotní vzorky testované aktivní IRNDT*

### 7.4.2 Pasivní IRNDT

Pro pasivní IRNDT byly využity vzorky z jiné práce. Na Obr. 7.5 voštinový sendvičový panelu u kterého je detekována přítomnost vody (ledu), která je v buňkách rozmístěna do tvaru kříže.



*Obr. 7.5 Sendvičový panel se zmrzlou vodou ve voštinovém jádře*

## 7.5 Rozbor výsledků experimentů

U pilotních vzorků platí, že pro každou hladinu zatěžování je rozdíl mezi aritmetickým průměrem počtu naměřených cyklů  $\bar{x}$ , mediánem naměřených cyklů  $\tilde{x}$  a mediánem životnosti  $\hat{N}_{(10)}$  zanedbatelný. Toto je dokladem správně provedených pilotních únavových zkoušek (až na další). Avšak hodnoty dolní meze únavové životnosti  $\hat{x}_{(10)}$  jsou podstatně nižší, než nejkratší životnost  $\hat{N}_0$ . Tento rozdíl ukazuje na to, že pilotní únavové zkoušky byly provedeny s malým počtem vzorků. Z toho vyplývá, že statistické zpracování výsledků únavové zkoušky dle normy nebylo vhodné a bylo nutno využít jinou statistickou metodu; v této práci použitou metodu pro statistické zpracování malých výběrů – Hornovu metodu.

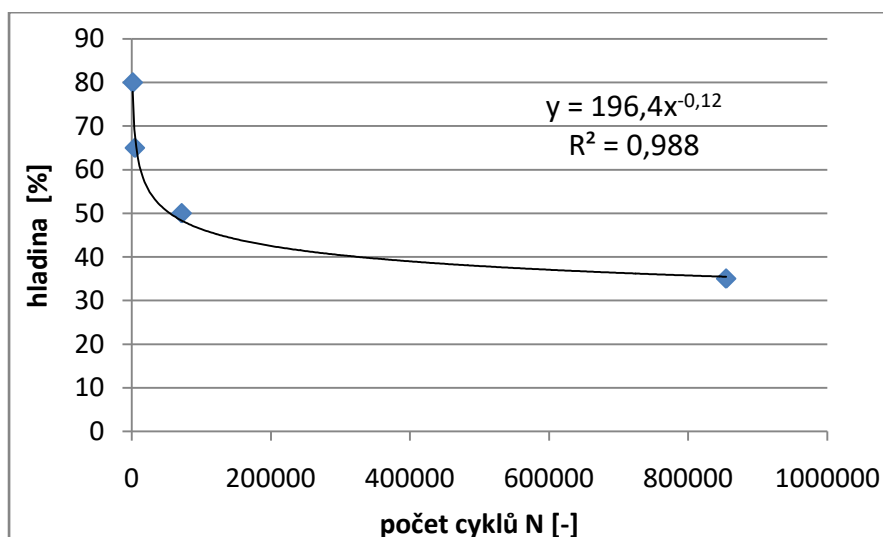
Poškození všech vzorků po pilotních únavových zkouškách spočívalo v odlepení potahu nejprve na tlakové straně panelu a pak i na tahové straně, stejně jak např. v [21].

### 7.5.1 Vzorky bez insertu

Tvar Wöhlerových křivek je u všech materiálových variant přibližně stejný. Jedná se o interpolační lomené (úsečkové) křivky. U všech křivek dochází na 50% hladině k prudkému zlomu. U všech křivek se zvětšuje rozdíl mezi horní a dolní mezí se snižující se hladinou zatížení. Tím se potvrzuje obecně platná hypotéza o velkém rozptylu naměřených dat (cyklů) na nízké hladině zatěžování, oproti rozptylu dat na vysoké hladině zatěžování.

Na Obr. 7.6 je upravená spojitá aproximační Wöhlerova křivka křivky z Obr. 7.1, která vznikla spojením Hornových středních hodnot a jednotlivých hladin napětí<sup>1</sup>. Byl použit Řešitel z MS Office-Excel. Byla použita regresní nelineární mocninná metoda nejmenších čtverců [32]. Hodnota spolehlivosti (stupeň těsnosti)  $R^2 = 0,988$  je velmi blízká k 1. To potvrzuje vhodně zvolenou metodu regrese. Rovnice křivky je dle vztahu (7.1):

$$y = 196,44 \cdot x^{-0,125} \quad (7.1)$$



Obr. 7.6 Upravená spojitá Wöhlerova křivka z obr. 7.6

Porovnáním statisticky zpracovaných dat lze určit pořadí materiálových variant dle velikosti dosažené životnosti následovně (sestupně):

1. Jádru z hliníkové slitiny s prepregovým potahem s výztuží z uhlíkových vláken - AIUv (1006740<sup>2</sup>)
2. Jádru z hliníkové slitiny s prepregovým potahem s výztuží ze skelných vláken - AISv (854460)
3. Nomexové jádro s prepregovým potahem s výztuží se skelných vláken - NoSv (782550)
4. Nomexové jádro s prepregovým potahem s výztuží z uhlíkových vláken - NoUv (420989)

<sup>1</sup> Reprezentativní S-N křivka zřejmě nejvhodnější materiálové varianty

<sup>2</sup> V závorce je uvedena Hornova střední hodnota pro hladinu A (35 %).



Z celkového pohledu na S-N křivky se však jeví nejvýhodnější varianta AlSv.

### 7.5.2 Vzorky s insertem

Naměřené počty cyklů u vzorků s insertem jsou u nízkých hladin zatížení zcela zásadně rozdílné od počtu cyklů u vzorků bez insertu; jsou mnohonásobně nižší. Např. u vzorků s jádrem z hliníkové slitiny a potahem z prepregu s výztuží ze skelných vláken je rozdíl ve středních hodnotách víc jak 132 násobný ve prospěch vzorku bez insertu. Tento rozdíl lze vysvětlit přítomností zalévací hmoty u vzorků s insertem, která vytváří zásadní tvarovou a materiálovou nehomogenitu vzorku. Tato nehomogenita může způsobovat velké špičky napětí, které jsou pak příčinou malé životnosti.

Na nejvyšší zatěžovací hladině (D, 80%) je rozdíl v naměřených počtech cyklů zanedbatelný. To lze vysvětlit tím, že na této hladině se už jednalo o namáhání velmi blízké maximálnímu napětí zjištěnému u statické zkoušky tříbodovým ohybem.

Delší životnost byla naměřena u vzorků s jádrem z hliníkové slitiny s prepregovým potahem s výztuží ze skelných vláken.

Tvar Wöhlerových křivek je na rozdíl od křivek vzorků bez insertu zásadně rozdílný. Tvar křivky u vzorků s jádrem z hliníkové slitiny a prepregovým potahem s výztuží s uhlíkovými vlákny (AlUv) je navíc zcela odlišný od ostatních tvarů; křivka je zalomena opačným směrem. U oboukřivek, stejně jako u vzorků bez insertu, se zvětšuje rozdíl mezi horní a dolní mezí se snižující se hladinou zatížení. Tím se opět potvrzuje obecně platná hypotéza o velkém rozptylu naměřených dat (cyklů) na nízké hladině zatěžování, oproti rozptylu dat na vysoké hladině zatěžování. V praxi však nemusí být nutné brát do úvahy ty části S-N křivek, které jsou na okrajových hodnotách (vysoká hladina zatěžování).

Porovnáním spodních a horních mezí lze konstatovat, že u všech materiálových variant **byly naměřeny statisticky významné rozdíly hodnot počtu cyklů** do poruchy. To platí pro hladiny B, C, a D. Na hladině A (35 %) tomu tak zcela není. Např. pro kombinaci AlSv a AlUv na této hladině je pro AlSv horní mez 1032881 cyklů a pro AlUv je dolní mez 997349 cyklů. Podobně pro materiálovou kombinaci NoSv a NoUv. Rozdíl je však zanedbatelný a lze konstatovat platnost první věty v tomto odstavci.

## 8. PŘÍNOS PRÁCE PRO VĚDU A PRAXI

### 8.1 Přínos pro vědu

Vědecký přínos práce lze spatřovat v tom, že předchozí autoři na několika málo naměřených datech tvrdili, že jejich naměřená data mají normální rozdělení. Tuto metodiku je nutno podrobit kritice, kdy tento přístup považují za vhodný pouze v případě, že počet testovaných vzorků v rámci jednotlivých hladin zatížení přesahuje počet 20 kusů. V této práci použitý přístup ke statistickému vyhodnocení naměřených dat je založen na zcela jiném principu, jehož použití se jeví jako **novum** ve zpracování dat ze životnostních zkoušek PSP. Je použita tzv. Hornova metoda s využitím hornových kvantilů, které byly určeny speciálně pro tzv. malé výběry.

Důležitým poznatkem je ověření hypotézy, že konstrukční a materiálové uspořádání kompozitní konstrukce má vliv na její životnost. Byla potvrzena hypotéza, že na únavovou životnost má velký vliv dodržení výrobní technologie a zejména provedení a pevnost lepeného spoje potah - jádro. Dále byla potvrzena obecně platná hypotéza (která platí i u kovových materiálů) o velkém rozptylu naměřených dat (cyklů) na nízké hladině zatěžování, oproti rozptylu dat na vysoké hladině zatěžování.

### 8.2 Přínos pro praxi

V práci uvedená metoda a využití jednoduchého cyklovacího stroje naznačuje vhodnou a levnou cestu získání použitelných výsledků ze životnostních zkoušek PSP s malým počtem měřených vzorků. Nebo lze tímto postupem získat např. pilotní výsledky, na které je možné se dále zaměřit a navázat dalšími experimenty – cyklováním např. na standardním cyklovacím stroji. Lze např. cyklovat jen v určitém, prakticky využitelném rozsahu Wöhlerovy křivky (na úzkém rozsahu zatěžovacích hladin, v této práci okolo hladiny 50 % u vzorků bez insertu). Takový postup je výhodný v oboru pozemních dopravních prostředků, kde obvykle není možné využít takový objem financí určených pro experimenty, jak je tomu v letectví. Toto je hlavní „ekonomický“ výsledek této práce.

Důležitým výstupem pro praxi je informace o tom, že při navrhování a výrobě konstrukcí z polymerních kompozitních sendvičových panelů s voštinovými jádry je nutno dbát na volbu optimální technologie zjm. lepení jednotlivých vrstev a na přísném dodržení technologické kázně ve výrobě.

Dalším praktickým výstupem je zjištění, že vzorky s insertem mají mnohonásobně nižší životnost, než jim parametricky podobné vzorky bez insertu.

Dalším praktickým výstupem je doporučení pro využívání aktivní IRNDT pro zjišťování vad PSP. Obě uvedené metody IRNDT lze upřednostnit před ostatními v praxi používanými metodami (např. ultrazvukovými).

## ZÁVĚR

Tato disertační práce splnila zadané cíle. Základním cílem byl výzkum životnosti jednoduchých kompozitních konstrukcí z polymerních kompozitních sendvičových panelů s voštinovým jádrem (PSP). Tento cíl byl splněn konstrukcí S-N (Wöhlerových) křivek pro různé materiálové kombinace. Tyto křivky mohou sloužit pro predikci životnosti PSP. Byla nalezena a experimentem ověřena levná metoda zjišťování životnosti PSP, použitelná zejm. při vývoji pozemních dopravních prostředků. Byla provedena rešerše poznatků z oblasti životnosti PSP a zjištěno, že není známo velké množství poznatků o dané problematice. Dále byla provedena rešerše problematiky statistického zpracování únavových zkoušek. Z této rešerše vyšla nutnost použití Hornovy metody pro statistické zpracování malých výběrů naměřených počtů cyklů na jednotlivých hladinách. Autorem této práce bylo navrženo a vyrobeno jednoduché zkušební zařízení pro životnostní zkoušky (Osvědčení o zápisu užitého vzoru ČR č. 31443). Byl splněn i vedlejší cíl, který potvrdil vhodnost použití metod aktivní i pasivní infračervené termografie pro detekci vad PSP.

V této disertační práci byly potvrzeny hypotézy o tom, že různě konstrukčně řešené prvky z kompozitních sendvičových panelů s voštinovým jádrem o stejné statické únosnosti (pevnosti) mají různou únavovou životnost způsobenou zejména rozdílnými použitými materiály v jednotlivých vrstvách. Dále byla ověřena hypotéza, že konstrukční a materiálové uspořádání kompozitní konstrukce má vliv na její životnost. S ohledem na životnost lze doporučit používat potah z prepregu s výztuží ze skelných vláken a jádro z hliníkové slitiny. Dále byla potvrzena obecně platná hypotéza o velkém rozptylu naměřených dat (cyklů) na nízké hladině zatěžování, oproti rozptylu dat na vysoké hladině zatěžování.

Vědecký přínos této práce lze spatřovat v tom, že v této práci použitý přístup ke statistickému vyhodnocení naměřených dat je založen na zcela jiném principu, než použili předchozí autoři a jehož použití se jeví jako **novum** ve zpracování dat ze životnostních zkoušek PSP. Je použita tzv. Hornova metoda s využitím Hornových kvantilů, které byly určeny speciálně pro tzv. malé výběry.

Všechny dopravní prostředky jsou konstruovány na danou životnost. V této disertační práci jsou popsány metody, kterými lze zjistit základní životnostní charakteristiky PSP. Znalost těchto charakteristik je nutná nejen pro to, aby pro dané zatížení konstrukce byla tato navržena správně jak pevnostně (staticky), tak i s ohledem na požadovanou životnost.

## SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [01] RŮŽIČKA, Milan, Miroslav HANKE a Milan ROST. *Dynamická pevnost a životnost*. 2. vyd. Praha: České vysoké učení technické, 1989.
- [02] HOLUB, Rudolf a Zdeněk VINTR. *Spolehlivost letadlové techniky*. Brno: Vysoké učení technické, 2001.
- [03] VLK, Miloš a Zdeněk FLORIAN. *Mezní stavy a spolehlivost*. Brno: Vysoké učení technické, 2007.
- [04] EHRENSTEIN, Gottfried W. *Polymerní kompozitní materiály*. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009, 351 s. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [05] Vrstvené lepené konstrukce s kovovým voštinovým jádrem. *Zpravodaj VZLÚ*. Praha, 1960, (5), 23 - 34.
- [06] Některé únavové charakteristiky sendvičového materiálu s voštinovou výplní. *Zpravodaj VZLÚ*. Praha, 1972, (1), 57 - 64.
- [07] Aircraft Structures: Chapter I [online]. Washington: U.S. Department of Transportation, Federal Aviation Administration, 2016. Dostupné z: [https://www.faa.gov/regulations\\_policies/handbooks\\_manuals/aircraft/amt\\_airframe\\_handbook/media/ama\\_ch01.pdf](https://www.faa.gov/regulations_policies/handbooks_manuals/aircraft/amt_airframe_handbook/media/ama_ch01.pdf)
- [08] USTOHAL, Vladimír. *Letecké materiály*. Brno: Vysoké učení technické, 1988.
- [09] *HexWeb® Honeycomb: Attributes and Properties* [online]. Stamford: Hexcel Corporation. Dostupné také z: [http://www.hexcel.com/user\\_area/content\\_media/raw/HexWebHoneycombAttributesandProperties.pdf](http://www.hexcel.com/user_area/content_media/raw/HexWebHoneycombAttributesandProperties.pdf)
- [10] *HexWeb™ Honeycomb:: Sandwich Design Technology* [online]. Stamford: Hexcel Corporation. Dostupné také z: [http://www.hexcel.com/user\\_area/content\\_media/raw/Honeycomb\\_Sandwich\\_Design\\_Technology.pdf](http://www.hexcel.com/user_area/content_media/raw/Honeycomb_Sandwich_Design_Technology.pdf)
- [11] *DIAB guide to core and sandwich* [online]. Laholm: DIAB group, 2012. Dostupné také z: [diadgroup.com](http://diadgroup.com)
- [12] ŠUBA, Oldřich. *Dimenzování a navrhování výrobků z polymerů*. Vyd. 3. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2010. ISBN 978-80-7318-948-8.
- [13] NOAKES, Keith. *Successful composite techniques: a practical introduction to the use of modern composite materials*. 4th ed. Ramsbury: Crowood, 2008. ISBN 978-184-7970-541.
- [14] GAY, Daniel, Suong V. HOA a Stephen W. TSAI. *Composite materials: design and applications*. 2nd. Boca Raton: CRC, 2007. ISBN 978-1-4200-4519-2.
- [15] SKVORCOV, Ju.V. *Механика композиционных материалов*. Samara: СГАУ, 2013.
- [16] BITZER, Tom. *Honeycomb Technology Materials, Design, Manufacturing, Applications and Testing*. Dordrecht: Springer Netherlands, 1997. ISBN 978-940-1158-565

- [17] VASSILOPOULOS, Anastasios P. *Fatigue life prediction of composites and composite structures: edited by Anastasios P. Vassilopoulos*. Oxford: Woodhead Publishing, 2010. Woodhead Publishing in materials. ISBN 978-1-84569-525-5.
- [18] SHARMA, Nitin, Ronald F. GIBSON a Emmanuel O. AYORINDE. Fatigue of Foam and Honeycomb Core Composite Sandwich Structures: A Tutorial. *Journal of Sandwich Structures*. 2016, 8(4), 263-319. DOI: 10.1177/1099636206063337. ISSN 1099-6362. Dostupné také z: <http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/1099636206063337>
- [19] LOHOTE, Ajit a S. S. KELKAR. Fatigue Analysis and Life Prediction of Honeycomb Structures. *Internation Journal for Science and Advance Research In Technology* [online]. Ahmadábád, 2017, 3(2), 46 - 50. ISSN 2395-1052. Dostupné z: <http://ijsart.com/Content/PDFDocuments/IJSARTV3I28303.pdf>
- [20] WAHL, Laurent, Stefan MAAS, Danièle WALDMANN, Arno ZÜRBEŠ a Patrick FRÈRES. Fatigue in the core of aluminum honeycomb panels: Lifetime prediction compared with fatigue tests. *International Journal of Damage Mechanics*. Thousand Oaks: SAGE Publications, 2013, 23(5), 661-683. DOI: 10.1177/1056789513505892. ISSN 1056-7895. Dostupné také z: <http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/1056789513505892>
- [21] BELINGARDI, G., P. MARTELLA a L. PERONI. Fatigue analysis of honeycomb-composite sandwich beams. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2007, 38(4), 1183-1191. DOI: 10.1016/j.compositesa.2006.06.007. ISSN 1359835x. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359835X06001862>
- [22] BIANCHI, Gabriel. *Structural Performance of Spacecraft Honeycomb Panels*. SOUTHAMPTON, 2011. PhD Thesis, University of Southampton. Vedoucí práce prof. Guglielmo Aglietti.
- [23] SMITH, Bryan a Biswajit BANERJEE. Reliability of inserts in sandwich composite panels. *Composite Structures*. 2012, 94(3), 820-829. DOI: 10.1016/j.compstruct.2011.10.018. ISSN 02638223. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0263822311003813>
- [24] BURMAN, Magnus a Dan ZENKERT. Fatigue of Undamaged and Damaged Honeycomb Sandwich Beams. *Journal of Sandwich Structures*. Stockholm, 2016, 2(1), 50-74. DOI: 10.1177/109963620000200103. ISSN 1099-6362. Dostupné také z: <http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/109963620000200103>
- [25] BOUKHAROUBA, Wahid, Abderrezak BEZAZI a Fabrizio SCARPA. Identification and prediction of cyclic fatigue behaviour in sandwich panels. *Measurement*. 2014, 53, 161-170. DOI: 10.1016/j.measurement.2014.03.041. ISSN 02632241. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0263224114001456>
- [26] ABBADI, A., C. TIXIER, J. GILGERT a Z. AZARI. Experimental study

- on the fatigue behaviour of honeycomb sandwich panels with artificial defects. *Composite Structures*. 2015, 120, 394-405. DOI: 10.1016/j.compstruct.2014.10.020. ISSN 02638223. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0263822314005388>
- [27] BELOUETTAR, S., A. ABBADI, Z. AZARI, R. BELOUETTAR a P. FRERES. Experimental investigation of static and fatigue behaviour of composites honeycomb materials using four point bending tests. *Composite Structures*. 2009, 87(3), 265-273. DOI: 10.1016/j.compstruct.2008.01.015. ISSN 02638223. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0263822308000202>
- [28] *ASM handbook: Composites*. Materials Park, Ohio: ASM International, 2001. ISBN 08-717-0703-9.
- [29] MOULEESWARAN, Senthilkumar. Design, Manufacturing and Testing of Polymer Composite Multi-Leaf Spring for Light Passenger Automobiles - A Review. *Materials Science and Technology*. London: InTech, 2012, 67-71. DOI: 10.5772/32778. ISBN 978-953-51-0193-2. Dostupné také z: <http://www.intechopen.com/books/materials-science-and-technology/design-manufacturing-and-testing-of-polymer-composite-multi-leaf-spring-for-light-passenger-automobil>
- [30] STRIZHIUS, V. E. Некоторые закономерности усталостного разрушения элементов композитных авиаконструкций. *Composites and nanostructures*. Moskva, 2016, 8(4).
- [31] VASSILOPOULOS, A, E GEORGOPOULOS a V DIONYSOPOULOS. Artificial neural networks in spectrum fatigue life prediction of composite materials. *International Journal of Fatigue*. 2007, 29(1), 20-29. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2006.03.004. ISSN 01421123. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0142112306001174>
- [32] KOHOUT, Jan a Stanislav VĚCHET. Vývoj přístupů k regresi únavových křivek. *Zpravodaj*. Praha: Česká společnost pro technickou normalizaci, 2014, (60), 19 - 27.
- [33] MELOUN, Milan a Jiří MILITKÝ. *Kompendium statistického zpracování dat*. Praha: Karolinum, 2012. ISBN 978-80-246-2196-8.
- [34] VAVILOV, Vladimír. *Инфракрасная термография и тепловой контроль*. 1. Moskva: Spektr, 2009. ISBN 978-5-904270-05-6.
- [35] VAVILOV, V. P., O.N. BUDADIN a A. A. KULKOV. Infrared thermographic evaluation of large composite grid parts subjected to axial loading. *Polymer Testing*. 2015, 41, 55-62. DOI: 10.1016/j.polymertesting.2014.10.010. ISSN 01429418. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0142941814002323>
- [36] VAVILOV, V. P., Y. PAN, A. I. MOSKOVCHENKO a A. ČAPKA. Modelling, Detecting and Evaluating Water Ingress in Aviation Honeycomb Panels. *Quantitative InfraRed Thermography Journal*. 2017, 1-12. DOI: 10.1080/17686733.2017.1317443. ISSN 1768-6733. Dostupné také z:

- <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/17686733.2017.1317443>
- [37] PÍŠTĚK, Antonín, Oldřich GRÉGR, Václav KAHÁNEK a Rudolf BOHM. *Pevnost a životnost letadel I*. Brno: VUT Brno, 1988, 266 s.
- [38] HEIMBS, Sebastian a Marc PEIN. Failure behaviour of honeycomb sandwich corner joints and inserts. *Composite Structures*. 2009, 89(4), 575-588. DOI: 10.1016/j.compstruct.2008.11.013. ISSN 0263-8223. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0263822308003425>
- [39] *Sandwich panel fasteners: Design manual*. Chatsworth: Shur-Lok Corporation, 1996.
- [40] Arconic Fastening Systems. *Arconic* [online]. New York. Dostupné z: <http://catalog.arconicfasteners.com/category/delron-sandwich-panel-inserts>
- [41] PANTĚLEJEV, Libor. *Únava kovových materiálů* [online]. Brno: VUT Brno. Dostupné také z: <http://ime.fme.vutbr.cz/images/umvi/opory/ukm/Unava%20kovovych%20materialu.pdf>
- [42] KOKCHAROV, Igor a Andrey BUROV. *Structural Integrity Analysis*
- [43] HARRIS, Bryan. *Fatigue in composites: science and technology of the fatigue response of fibre-reinforced plastics*. Boca Raton: CRC Press, 2003. ISBN 08-493-1767-3.
- [44] MURAŠOV, V. V. a A. F. RUMJANCEV. *Дефекты монолитных деталей и многослойных конструкций из полимерных композиционных материалов и методы их выявления*. Moskva: ВИАМ, 2006.
- [45] DAVIS, Maxwell James a D. A. BOND. *The Importance of Failure Mode Identification in Adhesive Bonded Aircraft Structures and Repairs*. Wing: Royal Australian Air Force, 2008.
- [46] GAJDAČUK, A. V. a M. B. SLIVINSKIJ. Технологические дефекты сотовых конструкций из ПКМ. *Авиационно-космическая техника и технология*. Charkov, 2005, (4), 5-8. ISSN 1727-7337.
- [47] SLIVINSKIJ, M. B. Классификация технологических дефектов сотовых заполнителей из полимерных бумаг и пути ее реализации для повышения их качества. *Авиационно-космическая техника и технология*. Charkov, 85-99. ISSN 1727-7337.

### Seznam použitých norem

- [100] ČSN IEC 50 (191) *Medzinárodný elektrotechnický slovník Kapitola 191: Spol'ahlivost' a akost' služeb*. Praha: Federální úřad pro normalizaci a měření, 1993. 168 s. Třídící znak 01 0102
- [101] ECSS-E-HB-32- *Space engineering. Insert design hand-*

- 22A *book*. Noordwijk: European cooperation for space standardization, 2011
- [102] ASTM C393 *Standard Test Method for Core Shear Properties of Sandwich Constructions by Beam Flexure*. West Conshohocken: ASTM International, 2016
- [103] ČSN EN 2562 *Letectví a kosmonautika. Plasty vyztužené uhlíkovými vlákny. Jednosměrné kompozity. Zkouška ohybem ve směru vláken*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 1999. 12s. Třídící znak 31 7712
- [104] ČSN EN ISO 14125 *Vlákny vyztužené plastové kompozity. Stanovení ohybových vlastností*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 1999. 24. Třídící znak 64 0664
- [105] ČSN 42 0368 *Zkoušení kovů. Zkoušky únavy kovů. Statistické vyhodnocení výsledků zkoušek únavy kovů*. Praha: Úřad pro normalizaci a měření, 1973. 20 s. Třídící znak 42 0368
- [106] ČSN ISO 12107 *Kovové materiály. Zkoušení únavy. Statistické plánování a analýza údajů*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013. 40 s. Třídící znak 64 0664
- [107] ГОСТ 33845-2016 (ISO 13003:2003) *Композиты полимерные. Метод определения характеристик усталости в условиях циклического нагружения*. Moskva: Euro-Asian Council for Standardization, Metrology and Certification (EASC), 2017
- [108] MIL-HDBK-23A *Structural Sandwich Composites*. Washington: U.S. Department of defense, 1968
- [109] ČSN EN 2374 *Letectví a kosmonautika. Skelné lamináty a sendviče. Výroba zkušebních desek*. Praha: (1996) Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 1996. 16 s. Třídící znak 31 7630



## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 2.1 Různé druhy insertů v PSP [38] .....	12
Obr. 3.1 Teoretická Wöhlerova (S-N) křivka.....	14
Obr. 3.2 Rozdělení proměnlivého zatěžování .....	15
Obr. 5.1 Uspořádání statické zkoušky „tříbodovým ohybem“ [103].....	20
Obr. 6.1 Zkušební zařízení pro únavovou zkoušku.....	22
Obr. 7.1 Wöhlerova křivka bAISv.....	24
Obr. 7.2 Wöhlerova křivka bAIUv .....	25
Obr. 7.3 Wöhlerovy křivky bAISv+bAIUv .....	25
Obr. 7.4 Wöhlerova křivka bNoSv.....	25
Obr. 7.5 Wöhlerova křivka bNoUv .....	26
Obr. 7.6 Wöhlerova křivka bNoSv+bNoUv.....	26
Obr. 7.7 Porovnání Hornových středních hodnot všech vzorků bez insertu.....	26
Obr. 7.8 Wöhlerova křivka sAISv .....	27
Obr. 7.9 Wöhlerova křivka sAIUv .....	27
Obr. 7.10 Porovnání Hornových středních hodnot vzorků s insertem sAISv+sAIUv.....	27
Obr. 7.11 Trvalé prohnutí vzorku (bAISv).....	28
Obr. 7.12 Prasklina potahu po hranicích voštinových buněk (bAISv).....	28
Obr. 7.13 Přímá prasklina potahu (bAISv)-(93% vzorků) .....	28
Obr. 7.14 Roztřepená, zdvojená prasklina (bNoSv).....	28
Obr. 7.15 Dlouhá prasklina jádra (smyk jádra), z počátku rovnoběžná s potahem (bNoUv).....	28
Obr. 7.16 Prasklina potahu tečující insert (sAIUv) .....	29
Obr. 7.17 Zalomená prasklina jdoucí „středem“ insertu (sAISv)-(58% vzorků)	29
Obr. 7.18 Rozsáhlá deformace jádra a odlepení obou potahů (sAISv)-(14% vzorků).....	29
Obr. 7.19 Pilotní vzorky testované aktivní IRNDT .....	30
Obr. 7.20 Sendvičový panel se zmrzlou vodou ve voštinovém jádře .....	30
Obr. 7.21 Upravená spojitá Wöhlerova křivka z obr. 7.6 .....	31

## SEZNAM TABULEK

Tab. 7.5 Naměřené počty cyklů u vzorků bez insertů .....	23
Tab. 7.8 Naměřené počty cyklů u vzorků s inserty .....	24

## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbol	Rozměr	Význam symbolu
$C^*$	[-]	Materiálová konstanta
$C, w$	[-]	Parametry únavové křivky
$F_{B,i}$	[N]	Síla při porušení vzorku
$F_{max,i}$	[N]	Maximální síla při cyklickém zatěžování
$H$	[-]	Hloubka pivotu
$L$	[mm]	Vzdálenost podpěr zkušebního přípravku
$N_i$	[-]	Počty naměřených cyklů
$\hat{N}_0$	[-]	Nejkratší životnost v počtu cyklů
$\hat{N}_{(10)}$	[-]	Medián životnosti
$\hat{N}_{(P;1-\alpha;v)}$	[-]	Medián životnosti v počtech cyklů při pravděpodobnosti porušení $P$
$P$	[%]	Pravděpodobnost porušení
$P_L$	[-]	Pivotová polosuma
$P_R$	[-]	Pivotové rozpětí
$R$	[-]	Součinitel asymetrie cyklu
$R^2$	[-]	Hodnota spolehlivosti (stupeň těsnosti)
$S$	[MPa]	Smluvní napětí (lze nahradit např. $\sigma_{max}$ )
$T_L$	[-]	Rozdělení rozdělené veličiny
$b$	[mm]	Šířka vzorku
$f_{b,i}$	[mm]	Průhyb při porušení (maximálním zatížení při lomu vzorku)
$f_{max,i}$	[mm]	Maximální průhyb
$h$	[mm]	Výška vzorku
$l$	[mm]	Délka vzorku
$n$	[-]	Počet cyklů ve spektru zatížení (počet datových souborů)
$n_i$	[-]	Počet cyklů na hladině $i$
$t$	[s]	Čas

$u$	[mm]	Amplituda u cyklování vzorků s insertem, průhyb
$x_D$	[-]	Dolní pivot
$x_H$	[-]	Horní pivot
$x_i$	[-]	Pořadové statistiky
$\bar{x}$	[-]	Aritmetický průměr počtu naměřených cyklů
$\tilde{x}$	[-]	Medián naměřených cyklů
$\hat{x}_{(10)}$	[-]	Dolní mez únavové životnosti
$\hat{x}_{(P;1-\alpha)}$	[-]	Dolní mez únavové životnosti v počtech cyklů
$1 - \alpha$	[-]	Konfidenční hladina spolehlivosti
$\mu$	[-]	Střední hodnota - Hornův střed (Hornův postup)
$\hat{\mu}$	[-]	Výběrový průměr
$\sigma_{a,i}$	[MPa]	Amplituda napětí
$\sigma_{fB}$	[MPa]	Napětí při porušení
$\sigma_f$	[MPa]	Napětí v potahu (efektivní)
$\sigma_m$	[MPa]	Střední napětí kmitu
$\sigma_{\max}$	[MPa]	Horní napětí
$\sigma_{\min}$	[MPa]	Dolní napětí
$\sigma_{muc}$	[MPa]	Mez únavy při cyklickém namáhání
$\Delta\sigma$	[MPa]	Rozdíl mezi maximálním a minimálním napětím (rozkmit napětí)

### **Zkratky**

A,B,C, D	Označení hladin
Al	Jádro z hliníkové slitiny
ČSN	Česká technická norma, dříve Československá státní norma
FEA	Finite Element Analysis, metoda konečných prvků
EFM	Element Failure Method,
MS	Mezní stav
NDT	Nedestruktivní testování

No	Jádro z nomexu (Nomex je obchodní značka jádra z aramidového papíru prosyceného fenolickou pryskyřicí)
IR	Infra-red, infračervená (termografie)
IRNDT	Nedestruktivní testován s využitím infračervené termografie
KM	Kompozitní materiál
PKM	Polymerní kompozitní materiál
PSP	Polymerní kompozitní sendvičový panel s voštinovým jádrem
PUR	Polyuretan
PVC	Polyvinil chlorid
ÚVI	Ústav výrobního inženýrství, Fak. technologická, UTB ve Zlíně
Sv	Potah s výztuží ze skleněných vláken
Uv	Potah s výztuží z uhlíkových vláken

# PUBLIKAČNÍ AKTIVITY AUTORA

## 1. Publikace evidované v databázi Web of Science:

- 1.1 RUSNÁK, Vladimír, Soňa RUSNÁKOVÁ, Ladislav FOJTL, Milan ŽALUDEK a Alexander ČAPKA. Flame Resistance and Mechanical Properties of Composites Based on New Advanced Resin System FR4/12. In: *Materiali in tehnologije*. Ljubljana: Institut za kovinske materiale in tehnologije, 2015-10-5, 49(5), s. 821-824. ISBN 978-961-92518-7-4. ISSN 1580-2949.
- 1.2 ČAPKA, Alexander, Ladislav FOJTL, Soňa RUSNÁKOVÁ a Milan ŽALUDEK. Product Dependability Testing of Polymer Composite materials. In: *International Conference on Engineering and Production Management (ESPM)*. Production Management and Engineering, 2016, s. 361-364. ISBN 978-1-315-67379-0.
- 1.3 VAVILOV, Vladimir, Yang-yang PAN, Aleksey MOSKOVCHENKO a Alexander ČAPKA. Modelling, Detecting and Evaluating Water Ingress in Aviation Honeycomb Panels. *Quantitative InfraRed Thermography Journal* [online + v tisku]. 2017, 1-12. ISSN 1768-6733.

## 2. Publikace evidované v databázi SCOPUS + SCIENTIFIC.NET:

- 2.1 FOJTL, Ladislav, Soňa RUSNÁKOVÁ, Milan ŽALUDEK, Alexander ČAPKA a Vladimír RUSNÁK. Characterization of Carbon Composites Properties for Application in Sport Industry. *Advanced Materials Research*. 2015, 1120-1121, 515-518. ISSN 1662-8985.
- 2.2 RUSNÁKOVÁ, Soňa, Ladislav FOJTL, Milan ŽALUDEK, Alexander ČAPKA a Vladimír RUSNÁK. Experimental Investigation of Possibilities Vacuum Infusion Technology to Produce Composite Ribs. *Advanced Materials Research*. 2015, 1120-1121, 531-534. ISSN 1662-8985.
- 2.3 RUSNÁKOVÁ, Soňa, Milan ŽALUDEK, Ladislav FOJTL a Alexander ČAPKA. Experimental Determination of Mechanical Properties of Prepreg Carbon Composites Designed for Bicycle Rims. In: *EAN 2015 -53rd Conference on Experimental Stress Analysis*. Český Krumlov: Czech Technical University in Prague, 2015, s. 336-339.
- 2.4 FOJTL, Ladislav, Soňa RUSNÁKOVÁ, Milan ŽALUDEK, Vladimír RUSNÁK a Alexander ČAPKA. Evaluation of mechanical Performance and Failure modes of Sandwich Structures for transport Industry. In: *EAN 2015- 53rd Conference on Experimental Stress Analysis*. Český Krumlov: Czech Technical University in Prague, 2015, s. 94-97.

- 2.5 RUSNÁKOVÁ, Soňa, Alexander ČAPKA, Ladislav FOJTL, Milan ŽALU-  
DEK a Vladimír RUSNÁK. Technology and Mold Design for Production of  
Hollow Carbon Composite Parts. *Manufacturing Technology*. Ústí n. Labem:  
J.E.Purkyně University, 2016, 16(4), 799-804. ISSN 1213-2489.
- 2.6 RUSNÁKOVÁ, Soňa, Ladislav FOJTL, Milan ŽALUDEK, Alexander  
ČAPKA a Vladimír RUSNÁK. Analysis of Mechanical and Impact Proper-  
ties of Prepreg Composites under Elevated Temperature. *Applied Mechanics  
and Materials*. Trans Tech Publications, 2016, 827, 141-144. ISSN 1662-  
7482.
- 2.7 FOJTL, Ladislav, Soňa RUSNÁKOVÁ, Milan ŽALUDEK, Alexander  
ČAPKA a Lukáš MAŇAS. Manufacturing and Mechanical Characterization  
of Bio-Based Laminates and Sandwich Structures. *Materials Science Forum*.  
Trans Tech Publications, 2017, 891, 542-546. ISSN 1662-9752.
- 2.8 ČAPKA, Alexander, Vladimir Platonovič VAVILOV, Soňa RUSNÁKO-  
VÁ, Ladislav FOJTL, Milan ŽALUDEK a Lukáš MAŇAS. Detecting Water  
in Composite Sandwich Panels by Using Infrared Thermography. *Materials  
Science Forum*. Trans Tech Publications, 2017, 891, 516-521. ISSN 1662-  
9752.

### 3. Publikace v recenzním řízení

- 3.1 ČAPKA, Alexander, Soňa RUSNÁKOVÁ, Milan ŽALUDEK a Konstanti-  
nos Karvanis KARVANIS. Fatigue Life of Al-Honeycomb Core Composites  
Construction. *Manufacturing Technology: Journal for Science, Research and  
Production*. Ústí nad Labem: J.E. Purkyně University in Ústí nad Labem,  
2018. ISSN 1212-2489.

### 4. Konferenční příspěvky na mezinárodních konferencích

- 4.1 ČAPKA, Alexander, Ladislav FOJTL, Soňa RUSNÁKOVÁ a Milan ŽA-  
LUDEK. Zkoušení spolehlivosti výrobků z polymerních kompozitních mate-  
riálů. In: *Engineering sciences and production management 2015: Book of  
abstracts*. 1. Košice: Ekonomická univerzita v Bratislave, 2015, s. 189. ISBN  
978-80-971555-4-4.
- 4.2 RUSNÁKOVÁ, Soňa, Milan ŽALUDEK, Ladislav FOJTL, Ondřej BÍLEK,  
Lukáš MAŇAS, Alexander ČAPKA a Vladimír RUSNÁK. A New Approach  
in Production of Composite Ribs in One Step Process. In: *ICMT 2015*. Porto-  
rož, 2015.
- 4.3 RUSNÁKOVÁ, Soňa, Milan ŽALUDEK, Ladislav FOJTL, Alexander  
ČAPKA a Martin DRÁBEK. Výzkum adheze uhlíkových kompozitů z tkani-  
ny KORDCARBON. In: *Polymerní kompozity 2015*. Kurdějov,

4.4 ČAPKA, Alexander, Soňa RUSNÁKOVÁ a Milan ŽALUDEK. Use of Thermo-physical Properties of Composite Materials in NDT. In: *Manufacturing Technology Pilsen 2017*. Plzeň: University of West Bohemia, 2017, s. 3. ISBN 978-80-261-0636-4.

4.5 ŽALUDEK, Milan, Soňa RUSNÁKOVÁ, Alexander ČAPKA, Ladislav FOJTL a Vladimír RUSNÁK. Životnost uhlíkových a skelných laminátů při cyklickém namáhání. In: *Manufacturing technology 2017*. Plzeň: University of West Bohemia, 2017, s. 41. ISBN 978-80-261-0636-4.

## 5. Publikace nesouvisející s tématem disertační práce:

5.1 ČAPKA, Alexander. Provozování "mikro" dopravního podniku v dálkové mezinárodní silniční nákladní dopravě. *Acta Logistica Moravica*. Přerov: VŠLG, 2012, 2, 29-34. ISSN 1804-8315. ISSN 1804-8315.

5.2 ČAPKA, Alexander. Logistika a telematika. ČUJAN, Zdeněk. *Logistika a telematika*. Přerov: Vysoká škola logistiky, 2013. ISBN 978-80-87179-29-1.

5.3 ČAPKA, Alexander. Logistika služeb dopravy a skladování. HALÁSEK, Dušan. *Logistika v odvětví služeb*. Přerov: Vysoká škola logistiky, 2013. ISBN 978-80-87179-30-7.

## 6. Ostatní

6.1 Osvědčení o zápisu užitého vzoru, číslo zápisu: 31443, datum zápisu: 06.02.2018

# ODBORNÝ ŽIVOTOPIS AUTORA

Jméno: Ing. Alexander Čapka, Ph.D.

Narozen: 06. 03. 1963

Bydliště: Okružní 4567, 760 05 Zlín

e-mail: autotechnika@seznam.cz

ORCID: 0000-0002-9095-0426

Scopus autor ID: 56938978800

## **Studium** (řádně ukončené):

2000-2001 Vysoké učení technické Brno, Ústav soudního inženýrství, doplňkové studium technického znanectví

1995-1997 Vysoké učení technické Brno, Ústav soudního inženýrství, studium technického znanectví

1984-1989 Vysoké učení technické Brno, Fakulta strojírenství, letadlová technika

1978-1982 Střední průmyslová škola Zlín, strojírenství

**Pedagogická praxe** (pouze vysoké školy) – vyučované předměty a další činnosti:

## **VUT Brno, KGPT Zlín:**

Technologie, Části a mechanismy strojů, Mechanická technologie, Strojírenská technologie, Technické kreslení (cvičení). Nauka o materiálu (přednášky).

Vedení bakalářských prací (4), vedení diplomových prací (1), recenze diplomových prací (3).

## **VŠLG Přerov:**

Dopravní logistika, Logistika služeb, Logistika cestovního ruchu, Logistika letecké dopravy a Logistika (přednášky).

Vedení a recenze bakalářských prací (28), vedení diplomových prací (2). Člen zkušební komise SZZ (4).

## **UTB, ÚVI:**

Aplikovaná mechanika

Vedení bakalářských prací (5), konzultace diplomové práce (1), recenze bakalářských prací (7), recenze diplomových prací (5).



## **Vedení bakalářských prací:**

Blažek P.: Detekce vody ve voštinových sendvičových panelech

Černoch O.: Statická pevnost spoje kov - kompozit

Dobiáš, J.: Tváření vláknokovových laminátů (FML)

Kostka, P.: Únavová zkouška pružiny z polymerních kompozitních materiálů

Žižka, T.: Návrh zvedací střechy pro obytné vozidlo z kompozitního materiálu

## **Zahraniční stáže:**

2015 Tomská polytechnická univerzita, Tomsk, Ruská federace

2018 Tomská polytechnická univerzita, Tomsk, Ruská federace, obojí  
v laboratoři IRNDT u prof. Vavilova.

## **Účast na konferencích:**

ICMT&T 2014, Portorož, Slovinsko

Únava kompozitních materiálů, 2014, AV, ČSM, Praha

Nové poznatky a výsledky v oblasti materiálů, technologií, zkoušek a aplikací  
kompozitů v leteckém průmyslu ČR, 2015, VZLÚ, Praha

Technické vedy a výrobní management 2015, Tatranská Štrba, Slovensko

Polymerní kompozity 2015, Kurdějov

Metallography 2016, Stará Lesná, Slovensko

Pilsen 2017, Plzeň

ERIN 2017, Ústí nad Labem

ICMT&T 2017, Portorož, Slovinsko

## **Zaměstnání:**

2009-2014 VŠLG Přerov, odborný asistent

2008-2009 SPŠP Zlín, učitel strojírenských předmětů a SOŠ Otrokovice, učitel  
automobilových předmětů a silniční dopravy

1998-2000 VUT Brno, Fakulta technologická ve Zlíně, odborný asistent

1997- soudní znalec (oceňování vozidel, dopravní nehody)

1997-1997 Blok, s.r.o., vedoucí prodejny KIA a Yamaha

1995-1995 Metal PS., s.r.o., vedoucí prodejny a servisu Citroen

1993-1993 TOTAL ČR, prospektor pozemků pro čerpací stanice PH

1991- OSVČ (inženýrská kancelář-konstrukce, podnikatelské projekty)

1989-1991 Moravan, n. p., Otrokovice, dělník na prototypové dílně, konstruk-  
tér letadel

1984-1984 ZPS, n. p., mechanik-vrtař

1983-1983 Kovohutě Rokycany, n. p., soustružník

### **Ostatní praxe:**

1988-            technický komisař automobilového sportu  
1985-1994 učitel v autoškole (externí)  
1989-1990 ZVS - letiště Líně a Přerov

### **Ostatní:**

Jazyky:        ruština B2, angličtina A2  
PC:            kancelářský SW, CAD, účetnictví  
ŘP:            A, B a E  
Zájmy:        mikroelektronika, automobilová diagnostika, technika závodních  
                  automobilů a cestování.

Ing. Alexander Čapka, Ph.D.

## **Spolehlivost kompozitních konstrukcí**

Dependability of Composites Contructions

Teze disertační práce

Vydala Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně,

nám. T. G. Masaryka 5555, 760 01 Zlín.

Náklad: vyšlo elektronicky

Sazba: autor

Publikace neprošla jazykovou ani redakční úpravou.

Rok vydání: 2018

Pořadí vydání: první

ISBN 978-80-7454-782-9

