



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Disertační práce

Spolehlivost kompozitních konstrukcí

Dependability of Composites Constructions

Autor: **Ing. Alexander Čapka**

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

Vydala **Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně** v edici **Doctoral Thesis**.

Publikace byla vydána v roce 2018

Klíčová slova: spolehlivost, životnost, predikce životnosti, sendvičová konstrukce, voštinová struktura, tříbodový 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

Práce je dostupná v Knihovně UTB ve Zlíně.

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

ABSTRAKT – (RESUMÉ)	3
ABSTRACT – (SUMMARY)	4
OBSAH	5
0. ÚVOD	9
1. TERMINOLOGIE, DEFINICE A ROZDĚLENÍ	11
1.1 Úvod do terminologie.....	11
1.2 Spolehlivost a životnost.....	11
1.3 Kompozity a kompozitní konstrukce	13
1.4 Zkoušení a diagnostika.....	16
2. SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY	17
2.1 Kompozity a sendvičové konstrukce.....	17
2.1.1 Úvod do problematiky kompozitních materiálů a PSP.....	17
2.1.2 Historie a vývoj sendvičových konstrukcí.....	20
2.1.3 Využití sendvičových konstrukcí.....	21
2.2 Materiálové složení PSP	24
2.2.1 Jádro	24
2.2.2 Potah.....	25
2.2.3 Prepregy	25
2.3 Inserty	26
2.4 Výrobní technologie PSP	28
2.4.1 Výroba voštinových jader	28
2.4.2 Výroba PSP	29
3. TEORETICKÝ RÁMEC	32
3.1 Mechanické vlastnosti nosníku z PSP.....	33
3.1.1 Problematika únosnosti nosníku z PSP.....	33
3.2 Statické zatěžování nosníku z PSP v ohybu.....	34
3.3 Životnost konstrukcí z PSP	38
3.3.1 Únavové zatěžování konstrukcí a analýza zatěžování	39
3.3.2 Únavové vlastnosti PKM	42

3.3.3	Únavové vlastnosti PSP	45
3.3.4	Únavové vlastnosti insertů.....	48
3.3.5	Mezní stav PSP	48
3.3.6	Metody stanovení životnosti a dimenzování na únavu	49
3.4	Modelování a predikce únavové životnosti	50
3.4.1	Palmgren-Minerova (P-M) hypotéza.....	50
3.4.2	Další metody predikce životnosti PKM	50
3.5	Únavové zkoušky PKM a PSP.....	51
3.6	Statistické metody v únavě	51
3.6.1	Hodnocení výsledků únavových zkoušek dle normy	51
3.6.2	Hornův postup	53
3.7	Základy spolehlivosti konstrukcí	55
3.8	Vady PSP	56
3.8.1	Vady PKM.....	56
3.8.2	Vady PSP	57
3.9	Nedestruktivní testování kompozitů a PSP.....	59
3.9.1	Používané metody NDT	59
3.9.2	Infračervená termografie	60
3.9.3	Aktivní infračervená termografie	60
3.10	Shrnutí poznatků ze současného stavu řešené problematiky.....	62
4.	CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE	63
4.1	Základní cíl	63
4.2	Vedlejší cíl	63
5.	ZVOLENÉ METODY ZPRACOVÁNÍ.....	65
5.1	Statická zkouška třibodovým ohybem.....	65
5.2	Únavová zkouška	65
5.3	Statistická analýza dat.....	66
5.4	Infračervená termografie.....	66
6.	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	67
6.1	Použité materiály a výrobní technologie	67

6.1.1	Materiály jader	67
6.1.2	Materiály potahů	68
6.1.3	Použitý insert.....	68
6.1.4	Výroba vzorků.....	68
6.2	Experimentální zařízení a vybavení	71
6.2.1	Statická zkouška tříbodovým ohybem	71
6.2.2	Únavová zkouška	71
6.2.3	Experimentální zařízení a vybavení pro IRNDT	73
7.	VÝSLEDKY	75
7.1	Výsledky statické zkoušky tříbodovým ohybem	75
7.1.1	Vzorky bezinsertu	75
7.1.2	Vzorky s insertem – vytržení insertu	76
7.2	Výsledky únavových zkoušek	76
7.2.1	Vzorky bez insertu	76
7.2.2	Vzorky s insertem	80
7.3	S-N (Wöhlerovy) křivky	82
7.3.1	Vzorky bez insertu	82
7.3.2	Vzorky s insertem	86
7.4	Poškození nosníků z PSP po únavových zkouškách.....	87
7.4.1	Poškození pilotních vzorků	87
7.4.2	Vzorky bez insertu	87
7.4.3	Vzorky s insertem	89
7.4.4	Spoj voština – potah.....	89
7.5	IRNDT	90
7.5.1	Aktivní IRNDT	90
7.5.2	Pasivní IRNDT	90
7.6	Rozbor výsledků experimentů.....	91
7.6.1	Vzorky bez insertu	91
7.6.2	Vzorky s insertem	92
7.6.3	Poškození vzorků po únavových zkouškách.....	93

7.6.4	IRNDT	93
8.	PŘÍNOS PRÁCE PRO VĚDU A PRAXI.....	94
8.1	Přínos pro vědu	94
8.2	Přínos pro praxi.....	94
8.3	Náměty pro další zkoumání	95
	ZÁVĚR	96
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	97
	SEZNAM OBRÁZKŮ.....	102
	SEZNAM TABULEK.....	104
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	105
	PŘÍLOHY.....	109
	Příloha č. 1 Tabulka Hornových kvantilů	109
	Příloha č. 2 Tabulky ze statistického zpracování výsledků.....	110
	Příloha č. 3 Fotografie poškození vzniklých při únavových zkouškách.....	111
	Vzorky bez insertu	111
	Vzorky s insertem.....	112
	PUBLIKAČNÍ AKTIVITY AUTORA	114
	ODBORNÝ ŽIVOTOPIS AUTORA	117

0. ÚVOD

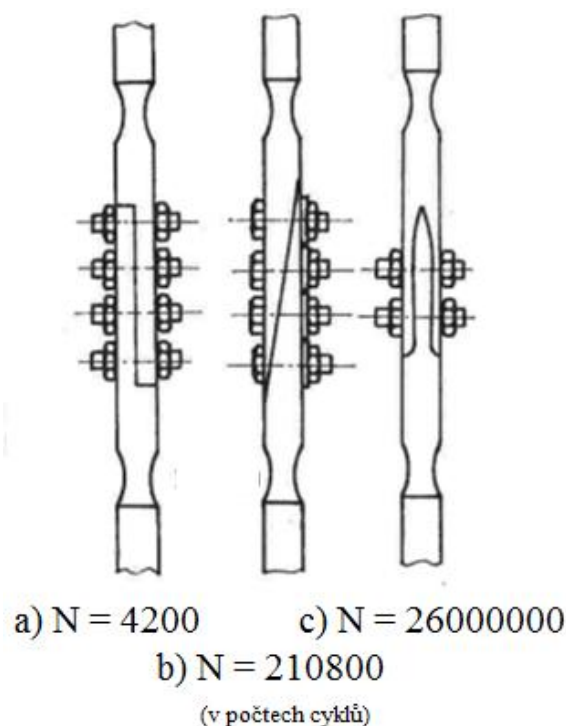
Kompozitní materiály mají výrazně odlišné vlastnosti od klasických konstrukčních materiálů – kovů. Kovy mají homogenní izotropní materiálové a pevnostní vlastnosti. Při pevnostním návrhu konstrukce se navrhuje konstrukční materiál tak, aby jeho pevnostní charakteristiky odpovídaly místu maximálního namáhání. 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. Kompozit lze označit za polotovar, který se skládá ze dvou základních částí: matrice a výztuže. Polymerní kompozitní materiál má matici (nebo i vlákna) z polymeru.

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.

Mým důvodem pro zvolení tématu této disertační práce bylo předchozí studium oboru Letadlová technika. Inspirací byl obrázek z [1], Obr. 0.1. Na obrázku jsou zobrazeny varianty šroubového spoje, kdy varianta c) vykázala při únavových zkouškách nejdelší životnost. To bylo zřejmě způsobeno tím, že se jedná o symetrické provedení bez případného ohybového namáhání a bez ostrých přechodů.



Obr. 0.1 Tři spoje stejné statické pevnosti, ale rozdílné životnosti [1]

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.

Poděkování patří mé školitelce, paní doc. Ing. Soně Rusnákové, Ph.D. za odborné a manažerské vedení nejen této práce, ale i za mé vedení v průběhu celého studia. Zvláště bych jí chtěl poděkovat za podporu a umožnění všech mých stáží a účastí na konferencích v několika zemích světa, kdy výsledky těchto stáží jsou obsaženy i v této práci. Dále bych chtěl poděkovat konzultantovi, panu Ing. Milanu Žaludkovi, Ph.D. za pomoc zejména při praktických laboratorních činnostech. Poděkování si zaslouží ještě mnoho dalších profesorů a docentů, z nichž bych chtěl alespoň jmenovat pana doc. Dr. Ing. Vladimíra Patu a pana doc. Ing. Oldřicha Šubu, CSc. za odborné konzultace, pana prof. Vladimíra Vavilova a Arsenije Čulkova, PhD. (oba z Tomské polytechnické univerzity). Poděkování patří i všem mým spolužákům – doktorandům z našeho studijního kolektivu. Asi největší poděkování patří mé manželce, Romaně Čapkové, za mimořádné, obětavé a hlavně dlouhodobé „trpění“ mého doktorandského studia.

1. TERMINOLOGIE, DEFINICE A ROZDĚLENÍ

1.1 Úvod do terminologie

Jednotná terminologie je základem každého vědního oboru. Zejména ve spolehlivosti je nezbytné použití jednotného jazyka. Jinak může dojít k nepochopení a v nejhorším případě i k haváriím. V oboru kompozitních materiálů (sendvičů) neexistuje žádný český terminologický standard (norma). Po roce 1990 došlo k opuštění jednotného systému Československých státních norem a do české normalizace byly vpuštěny cizí prvky, které způsobily obrovský chaos v současné normalizaci včetně nezávažnosti norem. Příkladem budiž platné, tematicky podobné normy: ČSN EN ISO 14125 Vlákniny vyztužené plastové kompozity - Stanovení ohybových vlastností, kde je průhyb označen písmenem „s“ a norma ČSN EN 2562 Letectví a kosmonautika - Plasty vyztužené uhlíkovými vlákny - Jednosměrné kompozity - Zkouška ohybem ve směru vláken, kde je průhyb označen písmenem „f“ (použito v této práci¹). Tato kapitola byla zařazena pro zachování terminologické a symbolové jednoty nejen v této práci.

1.2 Spolehlivost a životnost

Vzorek: část nebo kus materiálu, který se má použít k jediné zkoušce a který se obvykle připravuje podle předem stanoveného tvaru a určených rozměrů.

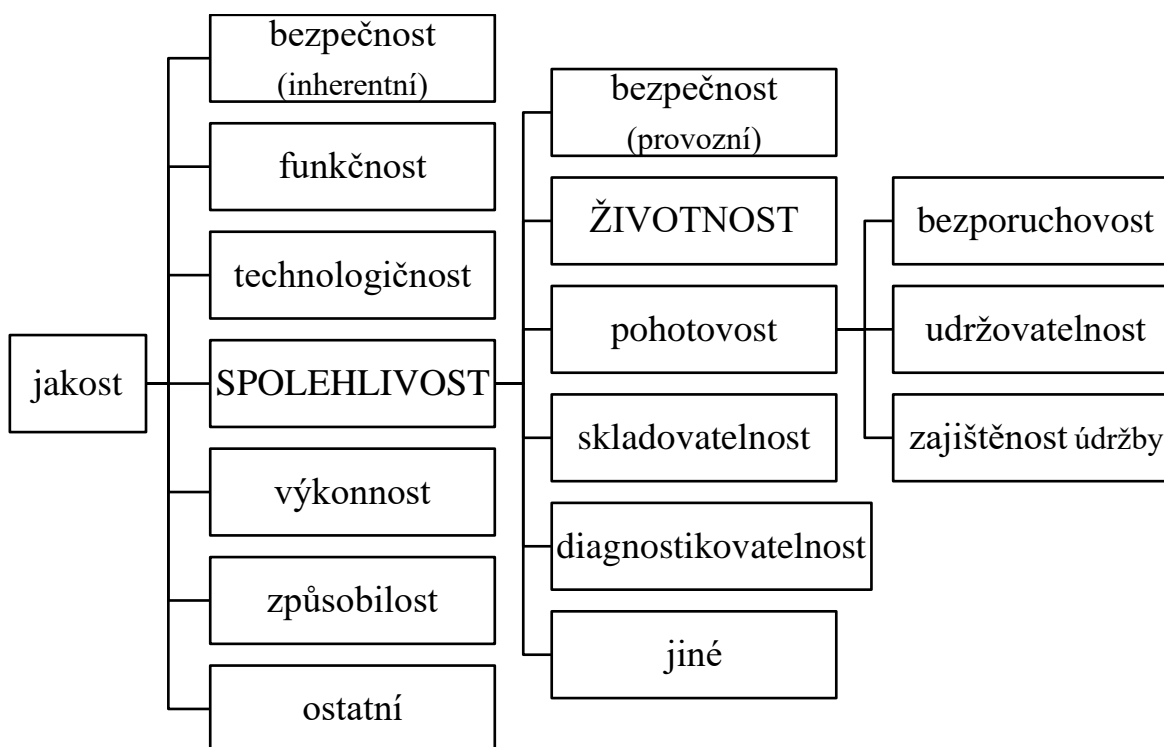
Zkušební těleso: je vyrobené ze vzorku. V této práci nepoužito, použít pouze termín „vzorek“.

Objekt (entita): jakákoliv neživá část, součást, zařízení, funkční jednotka, aj., s kterým je možné se individuálně zabývat. V této práci půjde jen o neopravované objekty (vzorky), které se po poruše (prasknutí) neopravují.

Spolehlivost (dependability, надёжность): dle [100] je spolehlivost definována následujícím způsobem: „*Spolehlivost* je souhrnný termín používaný pro popis pohotovosti a činitelů, které ji ovlivňují: bezporuchovost, udržitelnost a zajištění údržby“. V [2] je spolehlivost definována jako „schopnost fungovat tak, jak je požadováno, a tehdy, když je to požadováno“. Tato práce však chápe spolehlivost obecněji v souladu s [2] jako „vědu o správné nebo nesprávné funkci objektu“. Zabývá se základními podmínkami správné funkce objektu, možnostmi jejich ovlivňování, predikce, ověřování a měření. Obecně se jedná o spolehlivost konstrukce, kterou lze vyjádřit např. nejkratší životností. Spolehlivost lze také chápat i tak, jak ji definoval prof. Černý: *spolehlivost* = pravděpodobnost

¹Průhyb je označován různými autory různými písmeny, např. v, w, y, Y.

neodchylky (od cílového chování)². Jak vyplývá z Obr. 1.1, je spolehlivost součástí jakosti. Pojem *reliability* je pojem pouze pro bezporuchovost.



Obr. 1.1 Rozdělení spolehlivosti

Odhadovaná spolehlivost: je výsledek výpočtů, analýz a prognóz spolehlivosti objektu. Závisí na metodě odhadu, vstupních informacích (výsledcích měření), použitém výpočtovém modelu, aj.

Životnost (durability, долговечность): 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 (fatigue life), což je počet vložených cyklů do dosažení definovaného kritéria porušení (mezního stavu).

Životnost je obecná vlastnost, kterou lze kvantifikovat užitečnou dobou života. V definici užitečné doby života, která zní „časový interval od prvního použití do doby, kdy již nejsou požadavky uživatele nadále plněny z důvodu hospodárnosti provozu a údržby nebo z důvodu zastarání“ není exaktně zakotvena hranice, která by jednoznačně identifikovala konec užitečné doby života.

² prof. RNDr. Jan Černý, DrSc., Dopravní fakulta J. Pernera, Pardubice; definice převzatá z přednášek předmětu: Teorie dopravních a telekomunikačních systémů.

Predikce životnosti (fatigue life prediction, прогнозирование усталостной долговечности): odhad (předpověď) počtu cyklů do mezního stavu na základě provedených experimentů.

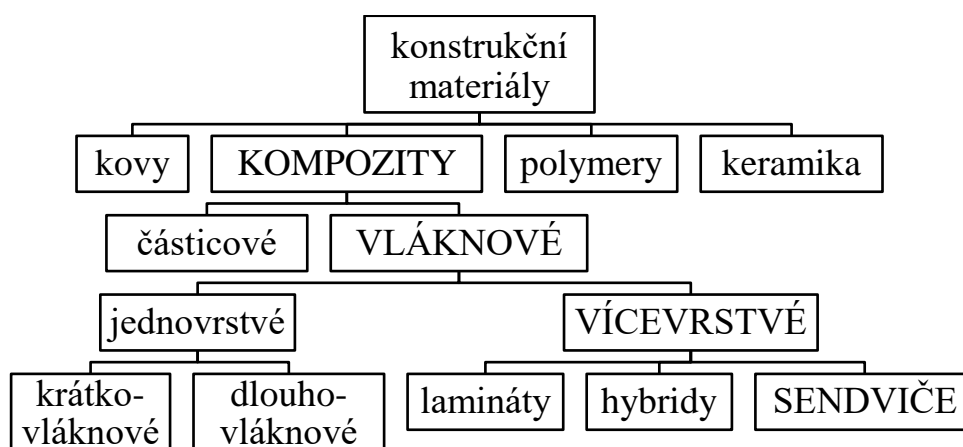
Únava (materiálu) (fatigue, усталость): souhrn degradačních procesů probíhajících v materiálu pod účinkem časově proměnných vnějších sil. Ve strojírenství je to nejdůležitější mezní stav únosnosti.

Únavová životnost (fatigue life, усталостная долговечность): počet vložených cyklů do dosažení definovaného kritéria porušení.

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. V [1] je mezní stav únavy materiálu definován stav, kdy v důsledku působení časově proměnných dynamických zatížení dojde k poruše funkční způsobilosti součásti. Charakteristické pro tento proces je to, že maximální hladina kmitavého napětí je mnohem nižší, než činí statická pevnost součásti. V [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 (viz odstavec 3.3.5).

1.3 Kompozity a kompozitní konstrukce

V českých normách je jen několik málo termínů z oboru polymerních kompozitních materiálů, např. „laminát (laminata) – dvě nebo více vrstev lamin“. V [4] je definice laminátu: „laminát (z lat. lamina – vrstva) – označuje kompozit ve tvaru plošného výrobku z jednotlivých rozlišitelných vrstev, který vzniká spojením vláken a pryskyřice nezávisle na formě konstrukčního prvku nebo na stavu výroby“. Základní rozdělení kompozitů je na Obr. 1.2.



Obr. 1.2 Rozdělení konstrukčních materiálů a kompozitů

Kompozitní materiál (KM)(composite material, композиционный материал): konstrukční materiál složený ze dvou nebo více chemicky a fyzikálně odlišných složek (fázi), které se vzájemně mezi sebou nerozpouštějí a mají mezi sebou vždy identifikovatelné fázové rozhraní; skládá se vždy z matrice a výztuže; u kompozitního materiálu musí být dosaženo synergického efektu.

Kompozit (composite, композит): nespisovný, všeobecně používaný termín pro kompozitní materiál, používaný i v odborné (vědecké) literatuře (i v této práci).

Kompozit vláknový (fiber reinforced composite, армированный композит nebo непрерывноармированный к.): konstrukční materiál s dlouhou výztuží, kdy délka výztuže mnohonásobně převyšuje její průměr; výztuž musí být pevnější než matrice a musí mít vyšší tuhost jak matrice.

Laminát (laminated, слоистый пластик): kompozit vytvořený ze dvou nebo více vrstev (lamin) obsahující vyztužující vlákna orientované v jednom nebo ve více směrech; vzniká až při výrobě polotovaru nebo výrobku.

Matrice (matrix, матрица): základní složka (fáze) kompozitu, která slouží k uložení výztuže, přenáší zatížení na výztuž a zajišťuje tvar výrobku, chrání výztuž před poškozením; obvykle má nižší pevnost než výztuž; matici lze označovat i slovem pojivo (zde také použito).

Pryskyřice (resin, смола): polymer používaný jako matrice, který se za pomoci tvrdidla vytvrzuje polymerací.

Plnivo (filler, добавка (наполнитель)): látka přidávaná do pojiva za účelem úpravy vlastností pojiva.

Vlákn (fiber, волокно): přírodní nebo člověkem vytvořený útvar, konečné nebo nekonečné délky, který tvoří základní prvek tkanin nebo jiných textilních struktur; u vláknových kompozitů je z vláken sestavená výztuž.

Výztuž (reinforcement, армирующий материал): je zpevňující složkou kompozitu, která u vláknových kompozitů přenáší většinu zatížení a má větší pevnost než matrice a je sestavená z vláken.

Prepreg (pregreg nebo preimpregnated fibers, препрег): polotovar určený k výrobě výrobků z vláknových kompozitů, který má nejčastěji pryskyřici (pojivem) předimpregnovanou výztuž a je připraven k tvarování s využitím tepla a tlaku.

Polymerní kompozitní materiál (PKM): kompozit, který má matici (nebo i vlákna) z polymeru. V této práci je PKM uvažován ve formě laminátu.

Sendvič ((lze použít i vrstvená konstrukce (třívrstvá konstrukce)), (sandwich, трехслойная конструкция): 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 jako celek (výhody by měly být synergické); sendvič je tvořen dvěma potahy a jádrem.

Potah (face sheet, skin, обшивка): vnější část sendviče (povrch), vyrobená ze dvou tenkých, tuhých a pevných materiálů (plech, polymerní kompozitní materiál (prepreg), apod.); dle materiálu potahu může být tento k jádru přilepen nebo spoj může vzniknout při vytvrzovacím procesu (polymerní kompozit – vytvrzení pryskyřice); přenáší tahové a tlakové síly a má ochrannou funkci proti impaktnímu poškození sendviče.

Jádro (core, заполнитель): 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.

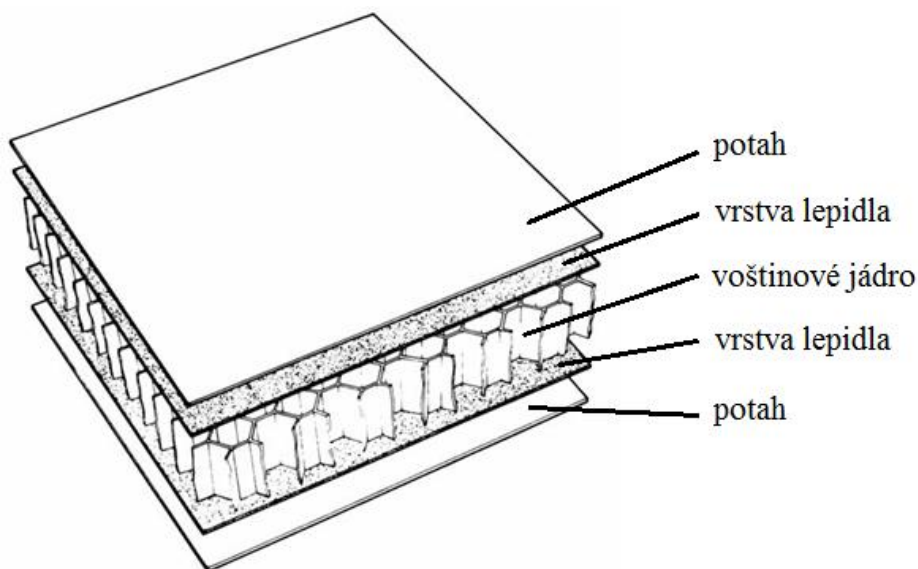
Nomex®: obchodní název (DuPont) pro aramidový papír prosycený fenolickou pryskyřicí; obchodní název zevšeobecněl, stejně jako dural³; v této práci používán jako nomex.

Voština (honeycomb core, сотовый заполнитель): 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) (polymer composite honeycomb sandwich panel, сотовая панель): je vrstvená konstrukce, skládající se ze tří základních vrstev: dvou potahů a jádra. Na Obr. 1.3 je znázorněno pět vrstev, kdy výskyt vrstvy lepidla záleží na tom, z jakého materiálu je potah. U potahu z prepregu nebo laminátu vrstva lepidla chybí (dle použité pryskyřice může chybět). 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 (insert, втулка): upevňovací prvek používaný v sendvičových panelech pro přenos vnější síly do panelu; v odborné češtině (i této práci) je běžně používán anglický termín, který v češtině znamená vložka.

³ Alfréd Wilm, 1906: *Duraluminium* = slitina hliníku s obsahem 4 % Cu, 0,5 % Mg a 0,5 % Mn, dnes zevšeobecněno na dural.



Obr. 1.3 Polymerní kompozitní sendvičový panel s voštinovým jádrem

1.4 Zkoušení a diagnostika

Nedestruktivní testování (nondestructive testing, неразрушающий контроль): jsou metody a techniky testování kontrolovaného objektu bez jeho porušení, kdy na základě měřitelných fyzikálních jevů lze odhalit vady; je součástí řízení jakosti.

Infra-červená termografie (infra-red (IR) thermography, инфракрасная термография): je analytická technika založená na detekci záření objektů v IR spektru vlnových délek.

Nedestruktivní testování s využitím infra-červené termografie: (IRNDT, infra red nondestructive testing, тепловой неразрушающий контроль) – nedestruktivní metoda testování s využitím infra-červené termografie.

Teplotní vodivost (thermal diffusivity, температуропроводность): ukazuje rychlost změny teploty, je ukazatelem difuze vnitřní energie v materiálu, lze také použít: tepelná difuzivita⁴.

⁴ doc. Ing. Milan Honner, PhD., Měření ve fyzikálních technologiích, ZČU

2. SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

2.1 Kompozity a sendvičové konstrukce

Kompozity a sendvičové konstrukce našly své první uplatnění v leteckém průmyslu, kde postupně (ne zcela) nahradily integrální konstrukce. Hlavním faktorem jejich zavedení do výroby byla úspora hmotnosti.

2.1.1 Úvod do problematiky kompozitních materiálů a PSP

V podkapitole 1.3 Kompozity a kompozitní konstrukce (terminologie) je uvedena definice kompozitního materiálu: kompozit je 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. Tuto definici lze ještě doplnit o to, že každá ze složek plní jinou specifickou funkci; základní složka (fáze) kompozitu, tj. matrice, slouží k uložení výztuže, přenáší zatížení na výztuž a zajišťuje tvar výrobku a výztuž je zpevňující složkou kompozitu, která u vláknových kompozitů přenáší většinu zatížení a má větší pevnost než matrice a je sestavená z vláken.

Klasifikace kompozitních materiálů

Základní rozdělení kompozitů je na Obr. 1.2. Kompozity lze ale dělit i podle jiných hledisek, např.:

1) Podle materiálu výztuže:

- s výztuží kovovou (ze slitin kovů, např. z W, Cr, Mo, Ti, Ni),
- nekovovou výztuží z:
 - anorganických materiálů (keramické materiály, např. Al_2O_3 , ZrO_2 , SiC, TiC), skla, čediče, aj.,
 - organických materiálů - polymery (aramidová vlákna (Kevlar®), uhlíková vlákna, polyamidová vlákna, atd.).

2) Podle materiálu matrice: nekovová a kovová.

Materiál vláken a materiál matrice je možné kombinovat nejrůznějším způsobem, kompozit může být typu kov – kov, polymer – polymer, keramika – keramika, keramika – kov, keramika – polymer. Samozřejmým předpokladem je však dobrá mezifázová adheze a vhodné deformačně-napěťové vlastnosti.

3) Podle geometrického tvaru výztuže: vláknové a částicové.

Vláknové kompozity mohou být s jednosměrnými dlouhými nebo krátkými vlákny, s dvousměrným vyztužením (tkanina), svíce směrným vyztužením, s náhodnou orientací vláken, aj.

4) Podle použití - žárupevné, žáruvzdorné, korozivzdorné, aplikace v letectví, strojírenských výrobních technologiích, stavebnictví (železobeton), atd.

Jedním z druhů kompozitních materiálů je sendvič, který lze označit za zvláštní druh laminátu. Jedná se také o vrstvenou konstrukci (nejčastěji třívrstvou), která je tvořena různými jednoduchými nebo i složitými materiály různého charakteru, které jsou navzájem pevně spojeny.

Klasifikace sendvičů

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), dřevěné a polyuretanové desky). aj.

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).

Zvláštnosti kompozitů a sendvičů jako konstrukčních materiálů

Specifičnost kompozitů jako konstrukčních materiálů spočívá v tom, že se spojují technologické procesy tvarování konstrukčních prvků a samotných materiálů. Z toho vyplývá, že odhad životnosti konstrukčních prvků vyrobených částečně nebo plně z kompozitů je značně komplikovaný kvůli rozmanitosti konstrukcí kompozitních materiálů a sendvičů. Každá část konstrukce vyžaduje samostatné stanovení vlastností materiálu.

Pevnost a tuhost součásti z kompozitů závisí především na pevnosti vláken výztuže. Vlákna a jejich orientace ovlivňují mechanické vlastnosti. V důsledku odlišných mechanických vlastností matrice a výztuže vznikají ve struktuře kompozitu složité místní stavy napjatosti. Při výpočtu konstrukčních prvků z kompozitů, jako jsou lamináty a sendviče, je nutno brát do úvahy to, že se skládají z vrstev. Vrstva je nejmenší výpočetní jednotka při návrhu konstrukčních prvků.

Mechanické vlastnosti jednotlivých vrstev se mohou výrazně lišit. To závisí zejm. na druhu matrice a vláken, na velikosti rozměrů vláken a jejich orientaci, na tloušťce lamin nebo potahu, na vazbě mezi vlákny a matricí, na tloušťce jádra, na orientaci buněk voštiny, na pevnosti spoje potah – jádro (vyzlínání prys-

kyřice z matrice potahu do voštinového jádra, Obr. 3.2), aj. Při návrhu součástí z kompozitů je nutno brát do úvahy vliv okolního prostředí (zjm. teplotu).

Přednosti kompozitů v porovnání s kovy:

- vysoká pevnost a tuhost při nízké hmotnosti,
- vynikající dynamické vlastnosti,
- možnost navržení různé pevnosti v různých částech součásti,
- tlumení vibrací,
- odolnost proti šíření únavové trhliny,
- možnost různé (ne)vodivosti v ploše součásti,
- korozivzdornost v ovzduší,
- a vždy synergický efekt.

K nevýhodám kompozitů lze počítat zjm.:

- nutnost dodržení výrobní technologie (zjm. u lepení sendvičů),
- problematická opakovatelnost u jednoduchých (ručních) technologií,
- časová výrobní náročnost (např. s porovnáním lisování plechů),
- ekologická a zdravotní rizika (rakovinotvorné látky),
- vysoká cena kompozitů s uhlíkovými vlákny,
- doposud neúplná databáze znalostí zjm. o únavovém chování kompozitů.

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,
- neprostupné vodě a vzduchu⁵,
- nízké údržbové náklady, snadná výměna a oprava poškozených součástí,
- dlouhý operační život.

Zápory sendvičové konstrukce:

- hořlavost u pěnových sendvičů,
- hořlavost při použití epoxidových pryskyřic,
- obtížná recyklace,
- deformace působením tepla,
- creep při trvalém zatížení.

⁵Neprostupnost vzdušné vlhkosti není absolutní. Z různých důvodů dochází k akumulaci vody v buňkách voštinových sendvičových panelů [31].

2.1.2 Historie a vývoj sendvičových konstrukcí

Historické kořeny výroby papírové voštiny lze najít již před asi 2000 lety v Číně, kde tehdy byly ozdobným prvkem při různých slavnostech. První sendvičová struktura byla použita při stavbě mostu ve Walesu v roce 1845. První patent na papírovou voštinu byl uveřejněn v roce 1905 (Budwig patent).

Historickým předchůdcem sendvičových konstrukcí byla konstrukce použitá na anglickém letounu „Moskito“ z druhé světové války. Potah byl z březového dřeva a jádro z balzy. Pokračováním byla třívrstvá konstrukce, sestávající z potahů z duralového plechu přilepených k vnitřnímu jádru z balzy. Tyto konstrukce vznikly kolem let 1941-42 a měly obchodní název „Metalite“.

Výzkumem vrstvené konstrukce s voštinovou výplní se jako první zabývala americká firma Glen L. Martin. Použili voštinové jádro z textilu impregnovaného fenolovou pryskyřicí. Velký rozvoj voštinových konstrukcí nastal s objevem nadzvukové rychlosti. Bylo třeba řešit značné tepelné namáhání potahů letadel při letu nadzvukovou rychlostí. To bylo řešeno voštinovým jádrem a potahy z nerezavějící oceli nebo titanu. Obojí bylo natvrdo pájeno. V souvislosti s kosmickým programem vývoj dále směřoval k využití keramických materiálů na jádro i potah, jak je tomu do dnes.

Přes známé potíže bývalého socialistického výzkumu a průmyslu nebylo Československo nikterak významně pozadu ve výzkumu a vývoji PSP. Informace o vrstvených lepených konstrukcích byly uveřejněny např. v roce 1960 v [5]. Výzkumná zpráva o únavových charakteristikách sendvičového materiálu s voštinovou výplní byla zveřejněna v roce 1972 v [6]. Únavové zkoušky probíhaly na zkušební stroji založeném na rezonančním principu. Sledovanou veličinou byla vlastní frekvence kmitavé soustavy; frekvence pak byla převedena na veličinu tuhosti. Vzorky byly ve tvaru desky. Jádro bylo voštinové hliníkové a potah z plátovaných plechů z hliníkové slitiny o tloušťce 0,8 mm. Počet naměřených cyklů byl až 10^7 . Sledována byla také tuhost, která se při asi $3 \cdot 10^5$ cyklu začala prudce zmenšovat, kdy při asi $6 \cdot 10^5$ se blížila k nule (nastala celková destrukce) vzorku. Byla zjištěna hodnota maximálního rozptylu $\sigma^2 (s_{log}) = 0,25$. Byla potvrzena hypotéza, že rozptyl výsledků souborů na nižších hladinách zatížení je vyšší, než na vyšších hladinách.

Rozsáhlý výzkum únavových vlastností leteckých konstrukcí podnítily tragické lety dopravních letadel Comet, kdy došlo k rozlomení jejich trupů z tehdy neznámých příčin. Při laboratorním zkoumání zbytků letounů pak bylo zjištěno, že příčinou katastrofy bylo únavové šíření trhlin z okrajů oken. Vznik a šíření trhlin způsobily změny v tlakových poměrech v kabině. Od té doby je problematika životnosti letecké konstrukce jednou z nejdůležitějších fází vývoje. Samozřejmostí je tedy zkoumání životnosti sendvičových prvků, které jsou v současnosti již velmi rozšířeným konstrukčním materiálem.

2.1.3 Využití sendvičových konstrukcí

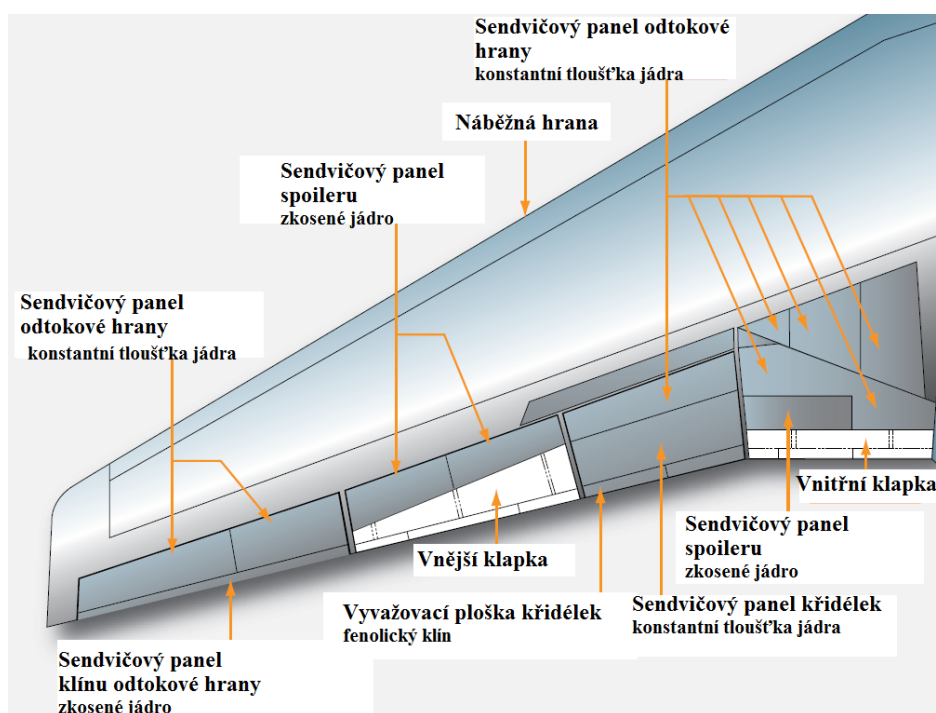
Sendvičové konstrukce se využívají v mnoha průmyslových odvětvích, jako je např. architektura a stavitelství, dopravní technika, stavba lodí, atd.

Letadla

PSP jsou v letectví používány již od 60-tých let minulého století. Nejprve na terciární konstrukce (vybavení kabiny Foyer F 28), později na sekundární a v současnosti i na primární konstrukce (Boeing B 737, B 787). Na Obr. 2.1, použitém z [7], je schematický náčrt umístění sendvičových voštinových panelů na křídle současného civilního dopravního letounu. Na Obr. 2.2 je fotografie skutečného křídla s vysunutými aerodynamickými prvky odpovídajícími Obr. 2.1. Na Obr. 2.3 je řez křídélkem⁶.

V letecké výrobě se pro výrobu potahů používají jak kovové, tenké duralové, ocelové nebo titanové plechy, tak i vyztužené plasty (PKM). Jako materiály jádra se nejčastěji používají voštiny z hliníkových slitin, nomexu nebo pěny. U v současné době nejmodernějších komerčních letounů Boeing B787 Dreamliner a Airbus A350XWB tvoří kompozitní sendvičové materiály až 52% konstrukce.

O leteckých kompozitních materiálech je podrobně pojednáno v [8]. Zde jsou kromě polymerních kompozitů popsány kompozity s kovovou maticí, pseudo-slitiny a jiné kompozity používané ve speciální technice a kosmické technice.

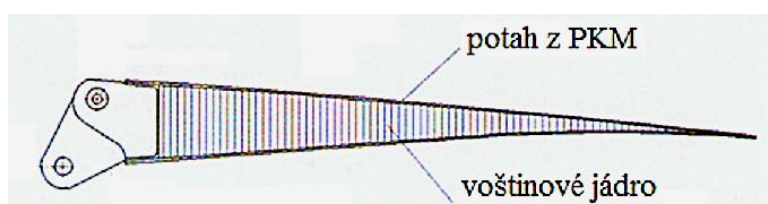


Obr. 2.1 Umístění sendvičových konstrukcí na křídle letadla [7]

⁶ Anglicky: aileron, prostředek pro příčné řízení letu



Obr. 2.2 Fotografie křídla s vysunutými aerodynamickými prvky z PSP



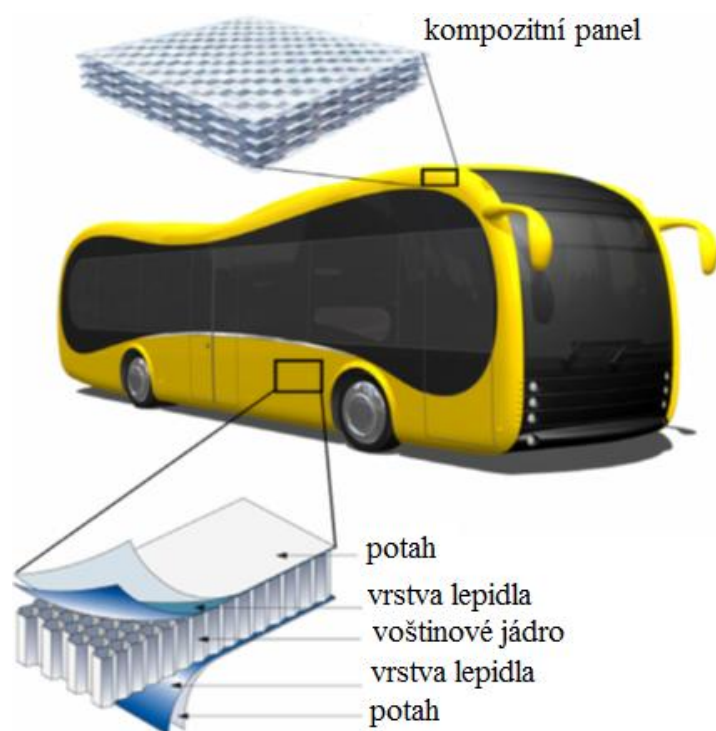
Obr. 2.3 Řez křidélkem sendvičové konstrukce

Pozemní dopravní prostředky - automobily

PSP našly využití nejen v leteckém průmyslu, ale také v průmyslu pozemních dopravních prostředků. Staly se běžným konstrukčním materiálem ve stavbě supersportovních automobilů, dostávají se do výroby běžných silničních vozidel a do stavby železničních dopravních prostředků. Na Obr. 2.4 je fotografie vnějšího panelu dveří osobního automobilu, který je vyroben z PSP. Potah dveřního panelu je z matrice vyztužené uhlíkovými vlákny. Jádro je z voštiny z hliníkové slitiny. Na Obr. 2.5 je ukázka použití PSP ve stavbě autobusu.



Obr. 2.4 Dveře automobilu z PSP



Obr. 2.5 Využití sendvičových konstrukcí ve stavbě autobusu

Pozemní dopravní prostředky – železniční vozidla

V konstrukci současných železničních vozů se používá široká škála kompozitních a sendvičových konstrukčních prvků. Jako jeden z mnoha příkladů lze uvést kompozitovou sendvičovou desku (PUROXIT®⁷), která umožňuje výrazně snížit hmotnost při zachování vynikajících mechanických vlastností. Sendvič tvoří speciální jádrový materiál o velmi nízké hmotnosti s laminátovým potahem. PUROXIT® o 35% lehčí než překližka o stejné tloušťce a přitom si zachovává stejné mechanické vlastnosti. Kromě naprosté vodovzdornosti (i slané vodě) má dostatečnou tepelně-izolační vlastnosti. Puroxitové desky tlumí zvuk a jsou nehořlavé (požadavek stavebních předpisů pro kolejová vozidla).

Ostatní využití (stavebnictví, spotřební zboží, vojenství)

Využití PSP je daleko větší, než u uvedených příkladů. PSP se využívají v kosmické technice, ve zbrojním průmyslu, v nábytkářském průmyslu a v neposlední řadě ve výrobě sportovních potřeb. Sendvičové materiály jsou také velmi často využívány ve stavebnictví (fasádní prvky – s potahy většinou kovovými nebo keramickými). Na Obr. 2.6 je fasádní sendvičový panel s jádrem z hliníkové slitiny a s jedním potahem ze žuly⁸.

⁷ 5M s.r.o., Kunovice

⁸Think Rock Stone, Čína.



Obr. 2.6 Fasádní sendvičový panel

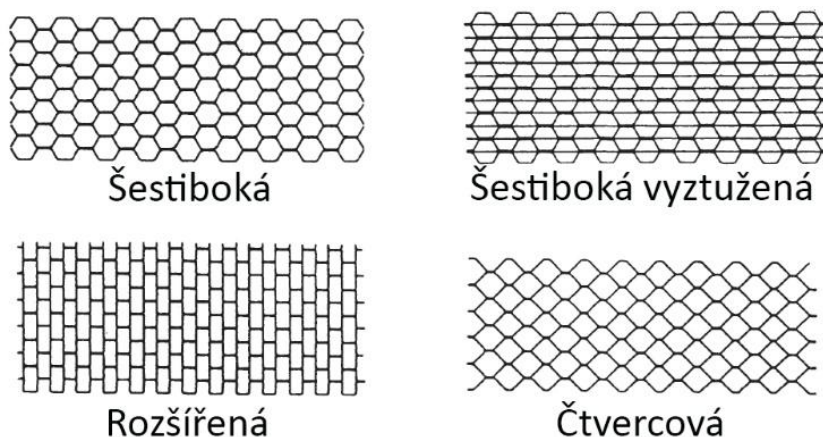
2.2 Materiálové složení PSP

Pro výrobu PSP lze využít velké množství materiálů. Možnosti vzájemných kombinací materiálů jsou stručně naznačeny v odstavci 2.1.1. Tato podkapitola se zabývá jen nejpoužívanějšími materiály pro PSP a to jen z oblasti civilních dopravních prostředků.

2.2.1 Jádro

Materiály jader lze členit dle rozdělení v odstavci 2.1.1. 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.). Základní tvary voštinových jader jsou na Obr. 2.7. V této práci jsou použita výhradně šestiboká jádra.



Obr. 2.7 Základní tvary voštinových jader [16]

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 prepregů⁹.

Velkým kladem kovových materiálů je tuhost, pevnost a vysoká odolnost proti rázům. Nevýhodou kovů je jejich hustota a tedy i hmotnost. Tyto nevýhody odstraňují např. PKM. Matrice v kompozitu potahu zaručuje tvarovou stálost součástí, 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. Ve větší míře se používají reaktoplastické pryskyřice, jako jsou epoxidové, nenasycené polyesterové, vinylesterové nebo fenylakrylátové. Pro vytvrzení pryskyřic je zapotřebí tvrdidel.

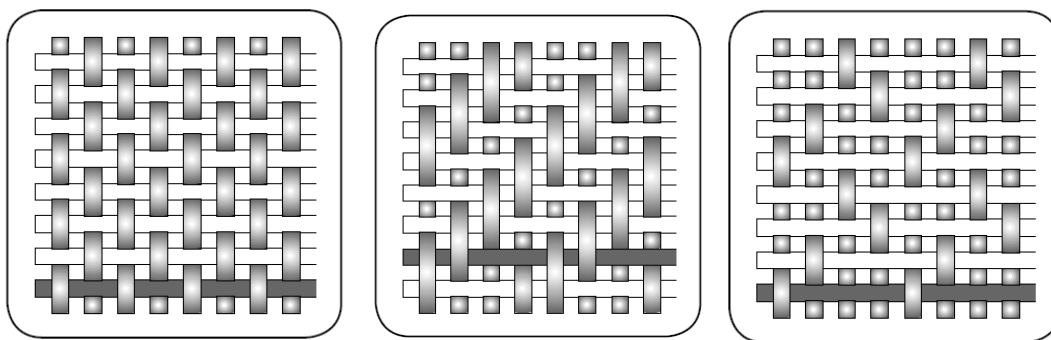
2.2.3 Prepregy

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, k částečnému a pozvolnému vytvrzování dochází už i za pokojové teploty. Nevýhoda prepregu je, že je nutné jej skladovat v teplotách okolo -18°C (náklady na skladování). Před aplikací je potřeba prepreg na určitou dobu temperovat na teplotu místnosti, aby nedošlo k orosení prepregu a navlhnutí matrice a vláken. Při teplotě místnosti jsou prepregy po určitou dobu ohebné a mírně lepivé.

Prepregy jsou kompozity složené ze dvou složek: z matrice a výztuže. Matrice může být z různých materiálů, nejčastěji z epoxidové, polyesterové nebo fenolické pryskyřice. Prepregy obsahují adekvátní množství pryskyřice. Nedochozí ke vzniku přesycených nebo nenasycených míst. Oproti ručnímu laminování bývá dosaženo lepší výrobní opakovatelnosti, stejných mechanických vlastností a vzhledu výrobku. Pryskyřice obsahují různé přísady, které zlepšují vlastnosti jak prepregu, tak konečného výrobku. Jsou to tvrdidla, plniva, flexibilizátory, retardéry hoření apod.

⁹ Jedině použití prepregu zajišťuje opakovatelnost výrob a hlavně jsou zárukou stálých fyzikálních (mechanických) vlastností.

Na výztuž se nejčastěji používají vlákna spletená do tkanin s různými vazbami. Na Obr. 2.8 jsou zobrazeny základní druhy výztuže: plátňová, kepr a atlas. Plátňová vazba se dobře zpracovává, ale je náchylná ke zvlnění. Kepr je vhodná vazba pro tvarově náročné součásti s vyššími požadavky na mechanické vlastnosti. Atlasová vazba je přednostně určena na prostorově složité součásti. Má však značnou nesymetrii vlastností, danou upořádáním pramenců. Vlákna výztuže jsou nejčastěji skleněná nebo uhlíková, v omezenější míře se používají aramidová vlákna.



Obr. 2.8 Vazby výztužných tkanin; zleva:plátňová, keprová a atlasová) [4]

Podstatnou nevýhodou prepregu je jejich vysoká pořizovací cena. Výhodou, kromě již uvedených, je vhodnost využití moderních technologií při jejich zpracování (řezání vodním paprskem, robotizace při kladení vrstev). Prepregy se dodávají nejčastěji ve formě rolí. Skladovatelnost je uvedena v technických listech a bývá až 12 měsíců při $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$. Základní technologií zpracování prepregu na výrobky je vytvrzování v podtlakových nebo přetlakových formách (v lisech). V letecké výrobě je základem využití autoklávu (teplota, tlak, podtlak, doba).

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. Proto je nutné posílit jádro a tím rozdělit zatížení do většího objemu panelu. V místě umístění šroubu je třeba do zesílené části jádra vložit nosný prvek, vložku nebo-li insert. Šroub pak může tímto insertem procházet nebo být do insertu zašroubovaný. Takto posílená místa jsou schopná přenášet zatížení např. ze zavěšení podvozku.

V [101] je uvedeno rozdělení insertů do tří základních skupin¹⁰:

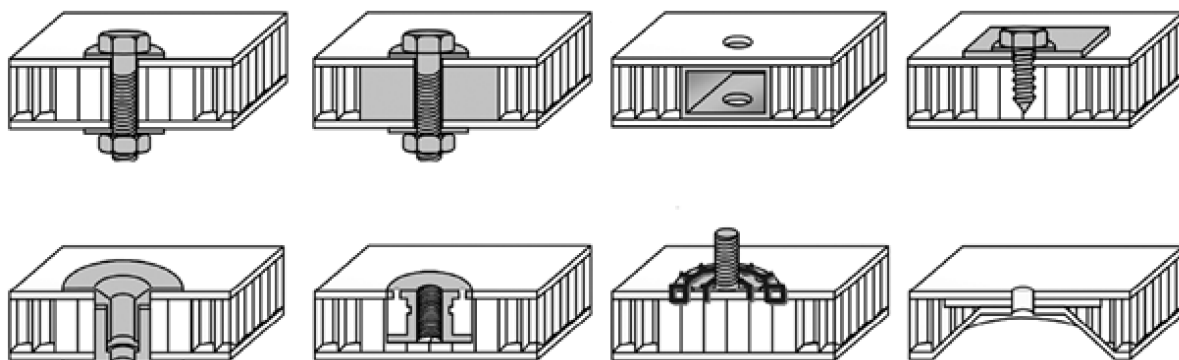
- typ A: insert vlepený při výrobě sendviče,
- typ B: zalitý nebo zalepený insert (nestandardní postup),
- typ C: mechanicky vložený insert.

¹⁰ Uvedené skupiny naznačují způsob montáže insertu do PSP

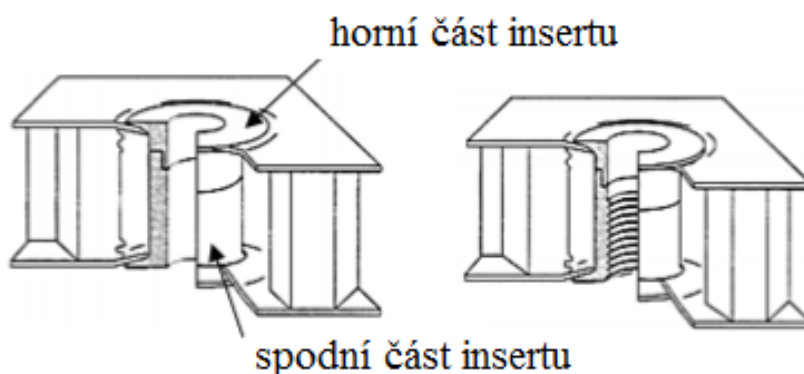
System insertu se skládá ze tří základních komponentů:

- insertu,
- sendvičové struktury,
- zalévací hmoty.

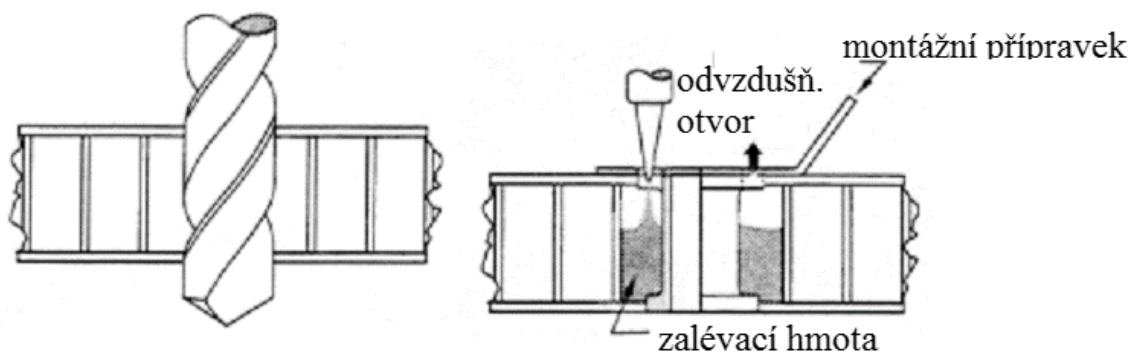
Na Obr. 2.9 jsou uvedeny příklady insertů. Na Obr. 2.10 je řez insertem typu C. Inserty jsou nejčastěji vyráběné např. z oceli, z nerezové oceli, titanové slitiny, hliníkové slitiny, z mosazi s různými úpravami povrchů (pasivované, elektrolyticky pokovené). Příklad montáže insertu je na Obr. 2.11. Základní zatěžovací módy insertů jsou na Obr. 2.12.



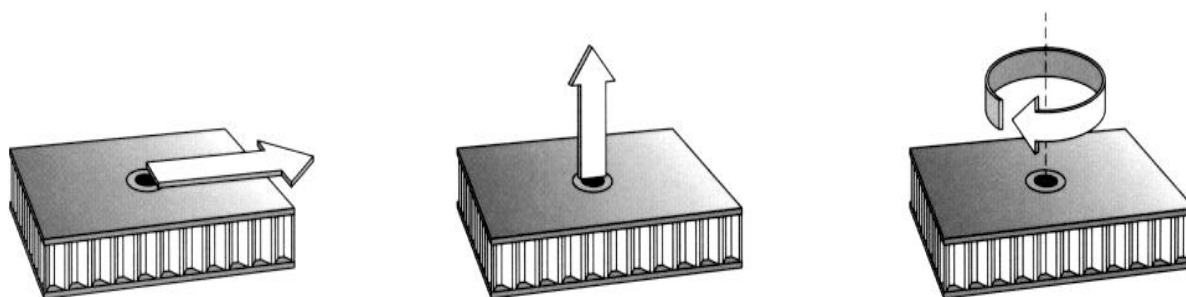
Obr. 2.9 Různé druhy insertů v PSP [38]



Obr. 2.10 Řez insertem typu C (bez a s vnitřním závitem) [40]



Obr. 2.11 Postup montáže insertu typu B do PSP [39]



Obr. 2.12 Zatěžovací módy insertů (zleva: smyk, vytažení v ose, krut) [16]

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).

Výroba PSP se skládá ze dvou základních částí:

- výroba voštinového jádra,
- výroba vlastního sendviče (spojení jádra s potahy nebo vytvoření potahu na povrchu jádra).

2.4.1 Výroba voštinových jader

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

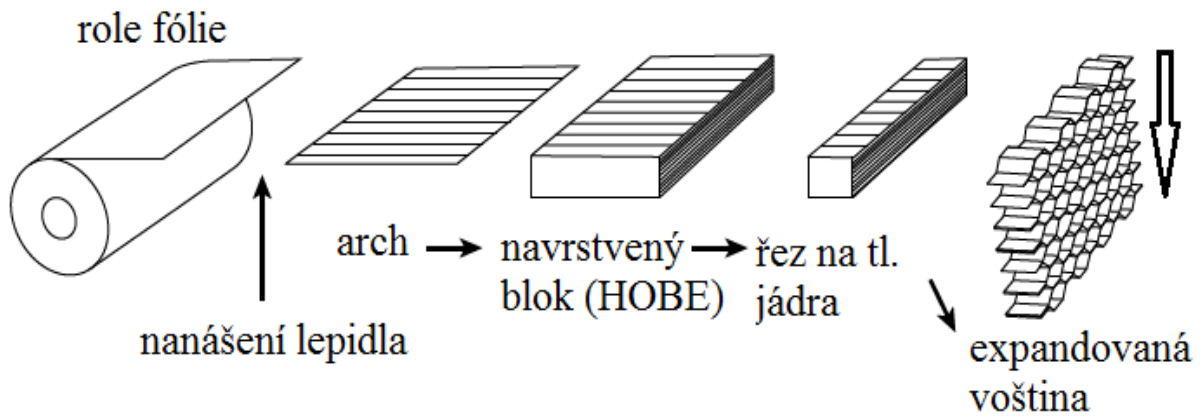
- expanzní proces¹¹,
- tvarovací (zvlňovací, vrapovací) proces¹²

Expanzní proces (Expansion Process)

Expanzní výrobní proces je na Obr. 2.13. Proces začíná stohováním archů narezaných z role. Na každém archu je nanášeno v příslušné geometrii a rozměru lepidlo v podobě pásků. Po nastohování příslušného počtu archů se slisováním a vytvrzením vytvoří blok (HOBE®). Po vytvrzení se blok rozřeže na požadovanou tloušťku jádra t_c [mm] a v dalším stroji se mechanicky expanduje (roztáhne). Expandovaná voština se pak ořeže na požadovaný rozměr (L_c [m] a W_c [m]).

¹¹Expansion Process, HOBE® - Honeycomb for expansion

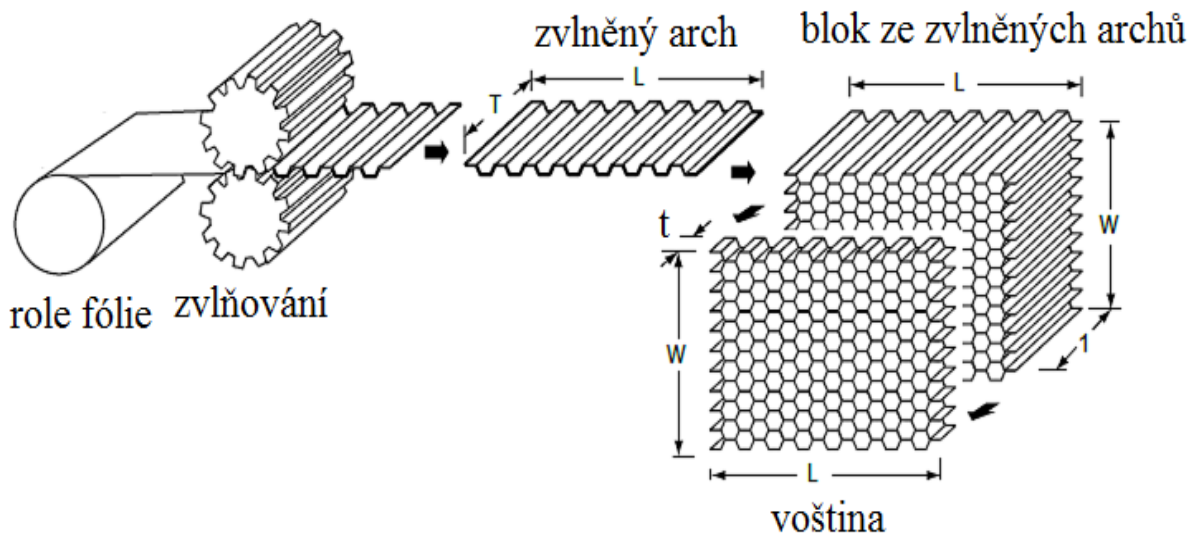
¹²Corrugated process



Obr. 2.13 Expanzní proces při výrobě voštiny [9]

Tvarovací proces (Corrugated Process)

Tvarovací výrobní proces je na Obr. 2.14. Tento proces se používá pro výrobu voštin s vyšší hustotou. Mezi tvarovacími válci je fólie natvarována do tvaru buněk. Následně je nanášeno lepidlo na vyšší plochu vlny a je vytvořen blok. Po vytvrzení lepidla se blok nařeže na požadované rozměry (t_c , W_c a L_c).



Obr. 2.14 Tvarovací proces při výrobě voštiny [9]

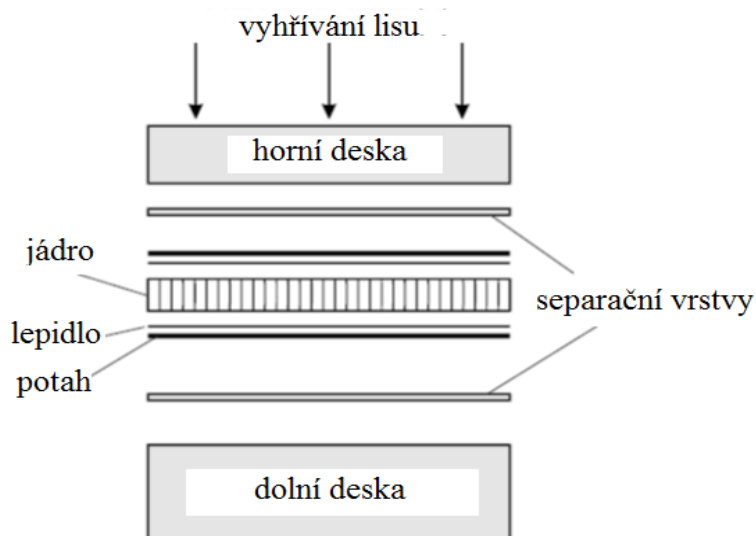
2.4.2 Výroba PSP

Základním principem výroby PSP je překrytí obou stran voštinového plátu potahy, které se při vytvrzení částečně roztaví a slepí s voštinou. Pokud není potah lepkavý, 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 (bagu),
- lisování ve formě.

Rovinné lisování za tepla (Heated Press)

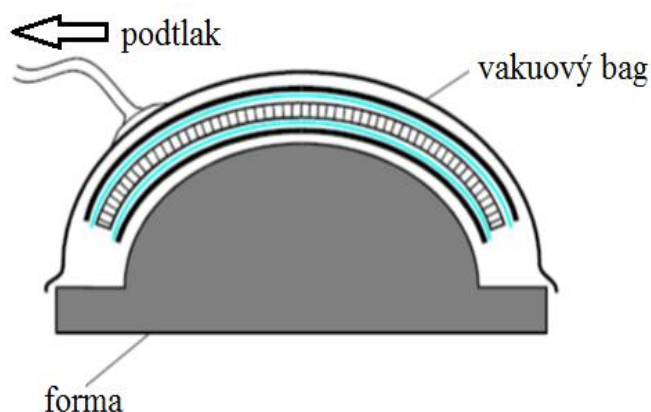
Na Obr. 2.15 je rovinné lisování za tepla, které je vhodné pro výrobu PSP s kovovými potahy nebo s potahy z prepregu. Vrstvy lepidla je nutno použít jen u kovových potahů. V této práci byla použita tato technologie pro výrobu vzorků.



Obr. 2.15 Rovinné lisování za tepla [10]

Lisování s využitím vakuové fólie (Vacuum Bag Processing)

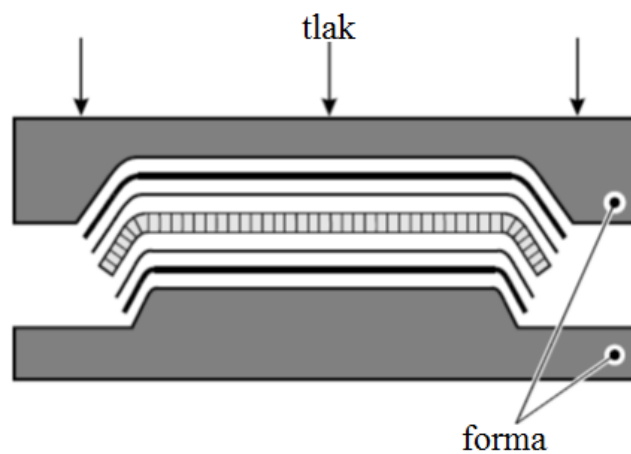
Na Obr. 2.16 je schéma lisování s využitím vakuové fólie (bágu). Tato metoda je vhodná pro výrobu zakřivených nebo tvarově složitých panelů, kdy jsou potahy z prepregu. Ve většině případů se pro vytvrzení využívá autokláv.



Obr. 2.16 Lisování s využitím vakuové fólie [10]

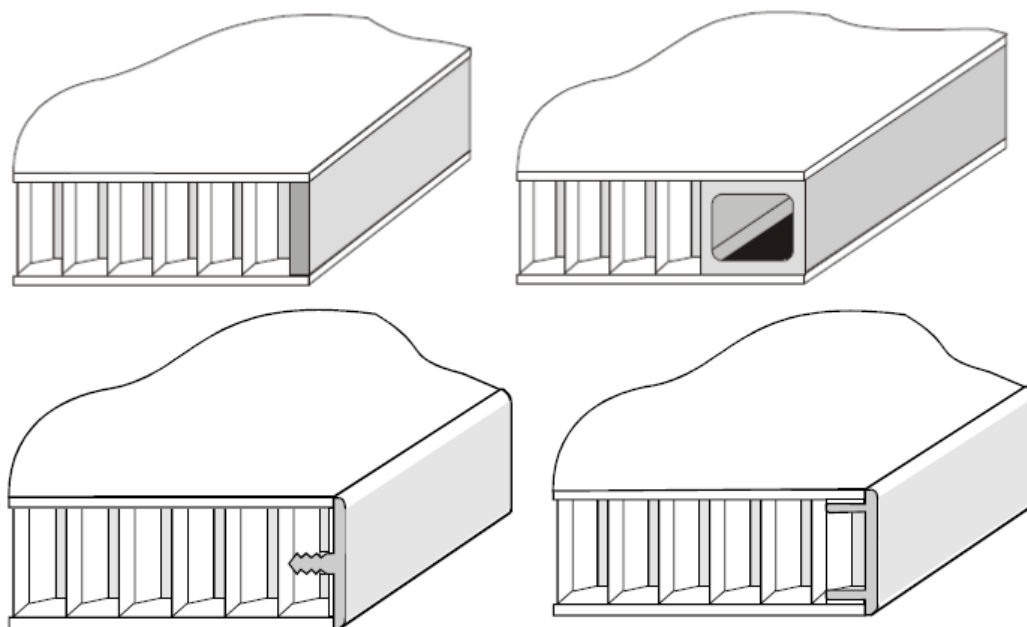
Lisování ve formě (Matched Mould Processing)

Na Obr. 2.17 je schéma lisování ve formě. Tato metoda je nejvhodnější pro proces vytvrzování součástí, kde je hlavním požadavkem dosažení úzké rozměrové tolerance a jakosti povrchové úpravy. Forma může být vyhřívána.



Obr. 2.17 Lisování ve formě [10]

Každý panel musí být na jeho okrajích vhodně zakončen. Možností je velmi mnoho a dva jednoduché příklady jsou uvedeny na Obr. 2.18.



Obr. 2.18 Příklady ukončení okrajů PSP [10]

3. TEORETICKÝ RÁMEC

Vývoj nového výrobku je kolektivní prací týmu projektantů, konstruktérů, výpočtářů, zkušebníků, technologů a dalších pracovníků. Výsledek jejich práce musí splňovat celou řadu požadavků. Hlavním požadavkem je řádné plnění požadované funkce výrobku po předepsanou dobu života. Problematikou životnosti kompozitních konstrukcí se zabývá tato práce.

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 (malé množství provedených zkoumání). 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 (autogeneus, self-generated heating, teplotní vodivost, tlumení) a toto zatížení může přesáhnout zatížení způsobené prostým cyklováním. Mezi hlavní faktory ovlivňující životnost patří zatížení, teplota, stárnutí, ultrafialové záření, atd. Z toho vyplývá, že životnost kompozitních konstrukcí je multioborová problematika.

Dalším faktorem, který ovlivňuje životnost PKM, je stárnutí. Stárnutí PKM zahrnuje změnu jeho fyzikálně-mechanických vlastností v průběhu času. Změna vlastností nastává v důsledku fyzikálně-chemických procesů aktivovaných vlivem vnějšího prostředí. Nejpresnějším 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 (predikce) životnosti, kdy se životnost studovaného kompozitu vypočte z individuálních faktorů nebo krátkodobých testů. Otázky předpovědi životnosti PKM a PSP v různých provozních podmínkách jsou naléhavým vědeckým úkolem.

Výzkum životnosti nebo únavy materiálu je historicky spojen se vznikem a rozvojem železniční dopravy. Pojem „únavy materiálu“ definoval v roce 1843 Angličan W. J. M. Rankin. Systematickým výzkumem únavy se začal zabývat německý železniční inženýr A. Wöhler, který zformuloval např. tyto empirické závěry [1], platné i pro PKM a PSP:

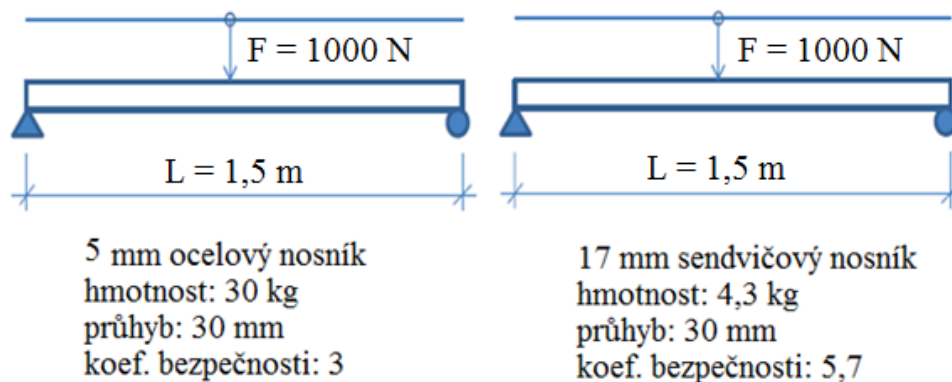
- pro lom součásti, který vzniká v důsledku opakovaného zatížení, je rozhodující počet změn zatížení a nikoli doba provozu,
- poškození materiálu závisí na rozdílu maximálního a minimálního napětí v nebezpečném místě,
- výsledky zkoušek lze znázornit křivkami v souřadnicích napětí – počet cyklů (Wöhlerova křivka),
- z experimentálních výsledků lze stanovit takové mezní napětí, pod nímž k únavovým lomům již nedochází,
- geometrické vruby snižují únavovou pevnost o hodnotu závislou na tvaru vrubu a druhu materiálu.

3.1 Mechanické vlastnosti nosníku z PSP

PSP se oproti ostatním konstrukčním materiálům vyznačují velmi nízkou hmotností a mají dostatečnou smykovou a vzpěrnou tuhost. V Tab. 3.1 je přehled měrných hmotností (hustot) některých materiálů. Rozdíl v mechanických vlastnostech ocelového nosníku a nosníku ze sendvičového materiálu dokumentuje Obr. 3.1, převzatý z [11]. Při stejném zatížení je hmotnost sendvičového nosníku skoro 7 krát nižší, než ocelového a koeficient bezpečnosti asi 2x větší.

Tab. 3.1 Srovnání měrných hmotností (hustoty) různých materiálů

Materiál	Hustota ρ [kg.m ⁻³]
Olovo	11340
Nerezavějící ocel	7950
Titan	4500
Hliníková slitina	2680
Voštinový materiál	0,024 – 0,280



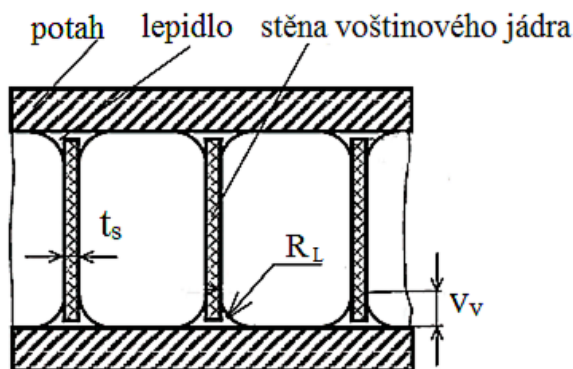
Obr. 3.1 Vlastnosti nosníků z oceli a sendviče [11]

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. Styčná plocha mezi potahem a jádrem je totiž velmi malá a je vyplněna lepidlem, Obr. 3.2. Tato vrstva lepidla musí zaručit přenos napětí z jednoho potahu skrz jádro na druhý. Z hlediska hmotnosti panelu musí být množství lepidla co nejmenší. Pevnost spoje závisí na velikosti rádiusu lepidla R_L [mm] nebo na velikosti „vyzlínání“ lepidla na stěnu jádra v_v [mm]. S rostoucí odolností lepidla proti porušení roste odolnost celého PSP proti dela-

minaci. Odolnost lepidla a tedy i rádiusu je možné řídit tuhostí použitého lepidla a také kontrolou množství objemu pryskyřice a vytvrzovacích parametrů. Standardizovaná zkušební metoda určená ke zjištění odolnosti proti odlepování potahu od jádra se nazývá: Zkouška odlupu vrstev pomocí navíjecího bubnu (Climbing Drum Peel Test¹³). Problém soudržnosti vrstev se projevuje jak u statického, tak cyklického namáhání.



Obr. 3.2 Řez spojení potahu a jádra

3.2 Statické zatěžování nosníku z PSP v ohybu

Dle [12] z představy o zachování rovinnosti průřezů prutu při ohybu plyne pro poměrnou deformaci vlákna vzdáleného o y od neutrální plochy vztah dle rovnice (3.1), což je deformační podmínka:

$$\varepsilon(y, z) = \frac{1}{r_p} \cdot y \quad (3.1)$$

kde: r_p je poloměr zakřivení neutrální plochy ve vyšetřovaném místě.

Ohybový moment v průřezu je vyvažován normálovými napětími a platí rovnice rovnováhy (3.2):

$$M = \int_{(s)} dN \cdot y = \int_{(s)} \sigma(y) y \cdot dS \quad (3.2)$$

Pro závislost normálových napětí na deformaci platí v lineárně elastické oblasti namáhání Hookův zákon dle rovnice (3.3):

$$\sigma(y) = E(y) \cdot \varepsilon(y) \quad (3.3)$$

Dosazením rovnice (3.1) a rovnice (3.3) do rovnice (3.2) dostaneme pro obecný případ nehomogenního průřezu rovnici (3.4):

¹³ ASTM D1781

$$\frac{1}{r} = \frac{M}{\int_{(s)} E(y)y^2 \cdot dS} = \frac{M}{K_o} \quad (3.4)$$

kde: K_o je tuhost složeného prutu v ohybu [MPa].

Pro případ vrstvených průřezů pro tuhost platí rovnice (3.5):

$$K_o = \sum_{i=1}^n E_i \cdot J_i \quad (3.5)$$

kde: J_i je kvadratický moment i -té části průřezu [mm^4].

Pro redukovaný výpočtový průřez lze tuhost v ohybu psát rovnicí (3.6):

$$K_o = E_f \sum_{i=1}^n \frac{E_i}{E_f} \cdot J_i \quad (3.6)$$

kde: K_o je tuhost [MPa],

E_f - materiál s nejvyšší hodnotou E (modul pružnosti potahu) [MPa].

Pro ohybovou tuhost sendvičového průřezu, kdy modul E_f potahu je o mnoho větší, jak modul jádra E_c , vyplývá z rovnice (3.6) rovnice (3.7):

$$K_o = E_f \frac{b \cdot h^2 \cdot t_f}{2} \quad (3.7)$$

Celkový průhyb nosníku lze vypočítat z rovnice (3.8):

$$y = y_M + y_T = \frac{F \cdot L^3}{48 \cdot K_o} + \frac{F \cdot L}{4 \cdot G_c \cdot b \cdot t_c} \quad (3.8)$$

Pro nosník na dvou podporách, zatížený uprostřed osamělou silou F [N], („tříbodový ohyb“¹⁴) viz Obr. 5.1 platí, že celkové napětí v ohybu se rovná součtu ohybového napětí v potahu σ_f [MPa] a smykového napětí v jádře τ_c [MPa], přičemž smykové napětí nabývá o mnoho menších hodnot, jak ohybové [13]. Ohybové napětí lze vypočítat dle rovnice (3.9) a smykové napětí dle rovnice (3.10):

$$\sigma_f = \frac{F_{B,i} \cdot L \cdot h}{4 \cdot b \cdot t_f \cdot d^2} \quad (3.9)$$

¹⁴ Tříbodový ohyb v uvozovkách je uveden pro to, že se ve skutečnosti o tento druh ohybu nejedná, jde o zjednodušení.

$$\tau_c = \frac{F_{B,i} \cdot L}{2 \cdot b \cdot d^2} \quad (3.10)$$

kde: σ_f je ohybové napětí [MPa],

τ_c - smykovénapětí [MPa],

$F_{b,i}$ - zatěžující síla [N],

L - vzdálenost podpěr [mm],

h - výška vzorku [mm],

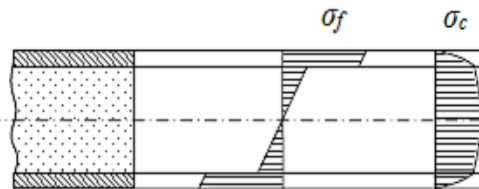
b - šířka vzorku [mm],

t_f - tloušťka potahu [mm],

t_c - tloušťka jádra [mm],

d - se vypočte: $d = t_f + t_c$.

Chování a vlastnosti PKM (laminátů) a sendvičů s pěnovými jádry při statickém zatěžování v ohybu je již dobře prozkoumané. Statická zkouška v ohybu je normalizovaná, viz [102] a lze využít i norem [103] a [104]. Průběhy výše popsaných napětí jsou na Obr. 3.3 (někteří autoři označují obojí napětí σ). Na Obr. 3.4 je schéma ohybu sendvičového nosníku s pěnovým jádrem s vyznačením zatížení v potazích a jádru. Problematika ohybu PSP není zcela objasněná. Je to dáno zejm. rozdíly v materiálu jádra (pěna, voština). Podrobný rozbor této problematiky není úkolem této práce. 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.



Obr. 3.3 Průběhy napětí u sendvičového nosníku namáhaného ohybem [15]

Další možností určení průhybu sendvičového nosníku zatíženého na ohyb je energetický přístup s využitím Castiglianiho teorému [14], rovnice (3.11). Energetický přístup je také popsán v [15].

$$W = \frac{1}{2} \int \frac{M^2}{E \cdot I} dx + \frac{1}{2} \int \frac{k}{G \cdot S} T^2 dx \quad (3.11)$$

kde: W je elastická energie [J],

M - ohybový moment [N . m],

E - modul pružnosti v potahu [MPa],

G - modul pružnosti ve smyku v jádru [MPa],

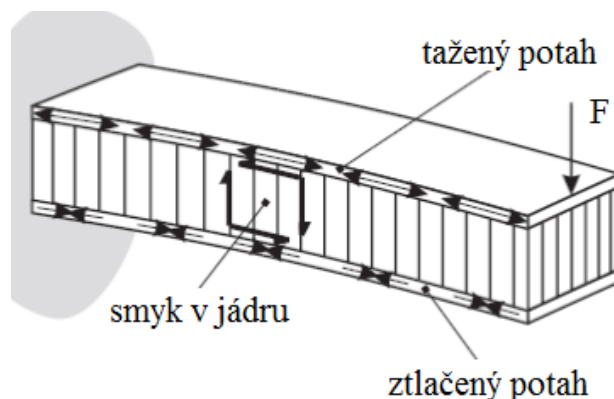
T - napětí ve smyku [MPa],

I - kvadratický moment [m⁴],

S - plocha průřezu [m²].

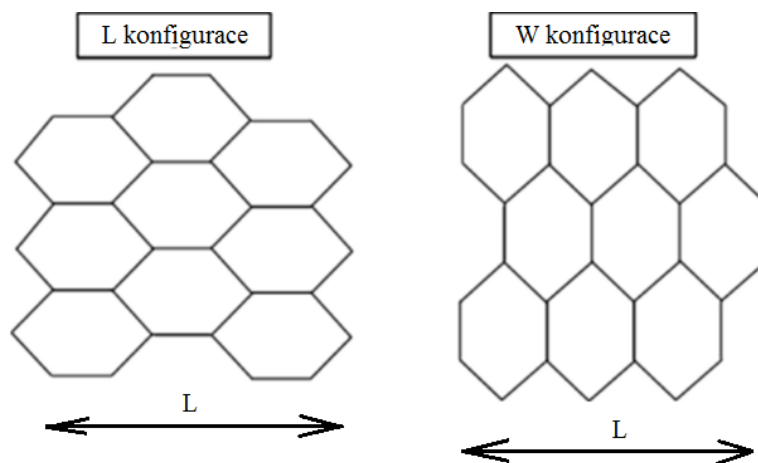
Průhyb nosníku se určí dle rovnice (3.12):

$$u = \frac{\partial W}{\partial F} \quad (3.12)$$



Obr. 3.4 Napětí v ohnutém nosníku PSP [10]

Při použití voštinového jádra je upřednostňováno, aby podélný směr voštiny L byl totožný s osou x (vzdálenost L mezi podpěrami). V tomto směru mají voštiny nejvyšší smykovou tuhost a pevnost a také životnost. Při tomto upořádání častěji praskne, než se odlepí potah. Na Obr. 3.5 jsou znázorněny obě konfigurace.



Obr. 3.5 Konfigurace voštinového jádra [26]

V podkapitole 5.1 je uvedeno, že jednou ze zvolených metod zpracování je statická zkouška „tříbodovým ohybem“. Jak vyplývá z výše uvedeného, v přesném pojetí se nejedná o čistý ohyb. Ten by byl u čtyřbodové ohybové zkoušky a to ještě jen pro pěnové jádro. Problematika u voštinového jádra je komplikovaná tzv. indentací (lokální zatížení).

3.3 Životnost konstrukcí z PSP

Reálné konstrukce jsou obvykle v provozu zatěžovány kmitavými zatíženími, která mají složitý časový průběh. U kompozitních konstrukcí, na rozdíl např. od točivých strojů, se jedná prakticky vždy o náhodné (stochastické) zatížení. Pro vyhodnocování zatížení existuje mnoho metod a výsledky zkoumání je nutno vždy statisticky zpracovat s využitím pravděpodobnostního přístupu zpracování.

Křivku, která popisuje je statisticky vyhodnocené experimenty únavového zatěžování nazýváme Wöhlerova křivka (S-N), Obr. 3.6. Tato křivka zobrazuje závislost amplitudy napětí σ_a na počtu cyklů N a většinou bývá zobrazena v ($\log\sigma$ - $\log N$) souřadnicích a pak se křivka změní na přímku, jejíž šikmou část lze popsat rovnicí (3.13):

$$\log N + b \log \sigma_a = \log c \quad (3.13)$$

kde: σ_a je amplituda napětí [MPa],

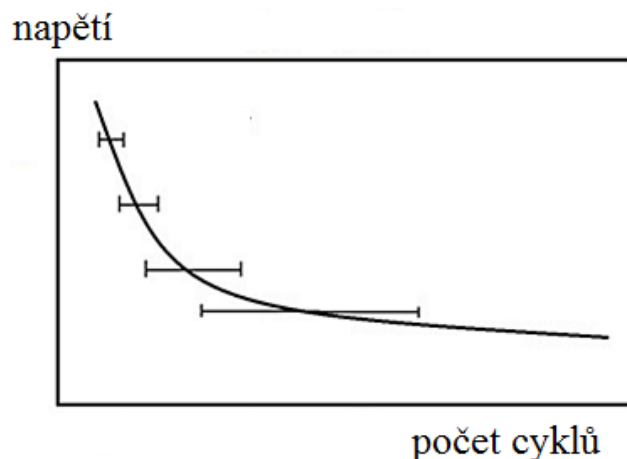
N - počet kmitů [-],

b, c – konstanty [-].

Po exponencializaci (odlogaritmování) má rovnice (3.13) tvar dle rovnice (3.14):

$$N \cdot \sigma_a^2 = c \quad (3.14)$$

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). Pokud není napětí σ_a symetrické (střídavé), pak je nutno připojit informaci o nesouměrnosti cyklu (viz též CLD diagram, v této práci nepoužito).



Obr. 3.6 Teoretická Wöhlerova (S-N) křivka

Teoretickou Wöhlerovu křivku (Obr. 3.6) lze rozdělit na oblast nízkocyklové (do 10^5 cyklů) a vysokocyklové únavy (od 10^6 cyklů do lomu). Od určité hodno-

ty počtu cyklů, kdy je Wöhlerova křivka rovnoběžná s osou x se jedná o mez únavy σ_{muc} nebo-li o neomezenou životnost.

V letectví je problematika počtu zkušebních cyklů dána leteckými předpisy, které byly vytvořeny na základě výsledků dlouhodobých zkoušek a provozu letadel. Prvotní problematikou pro stanovení počtu zkušebních cyklů a velikosti zatěžovacích hladin je zjištění spekter zatížení pro konkrétní konstrukci. U pozemních dopravních prostředků je problematika zatěžování rozpracována do příslušných předpisů u železničních vozidel. U silničních vozidel jde především o interní informace, navenk nezveřejňované v podobě obecných předpisů. V [1] je uveden příklad doporučeného počtu zkušebních cyklů pro rámy a nosníky: 10^6 a pro sklápěcí mechanismy: $5 \cdot 10^4$ cyklů.

Při dostatečném množství vzorků (od 20 kusů) se pro statistické rozdělení životů vzorků nejčastěji volí normální, logaritmicko-normální nebo Weibullovo rozdělení. Pro získání křivky se využije regresní křivka proložená průměrnými, lépe mediánovými hodnotami nebo odhady střední hodnoty. Vodorovné úsečky na Obr. 3.6 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:

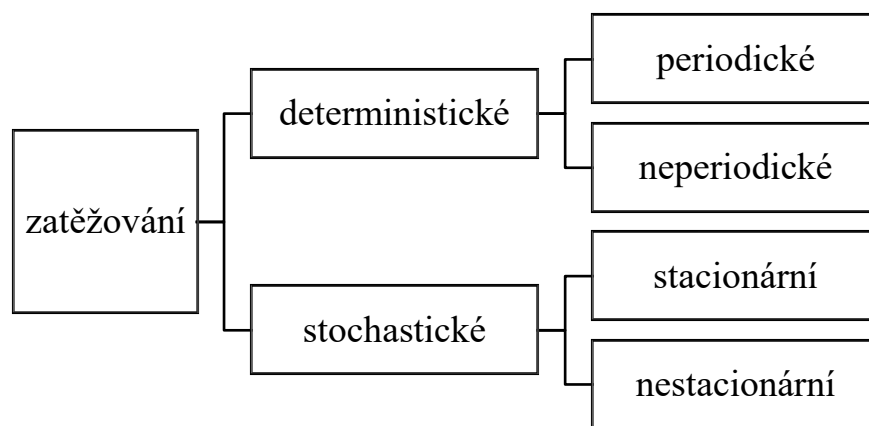
- podle zatěžujících podmínek (měkké zatěžování, tvrdé zatěžování, teplota, vibrace),
- podle pracovních podmínek a prostředí (normální podmínky, vakuum, zvýšené-snížené teploty, atd.),
- podle zkušebních objektů (standardní vzorky, nestandardní vzorky, konstrukční části, celé zařízení).

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. 3.7.

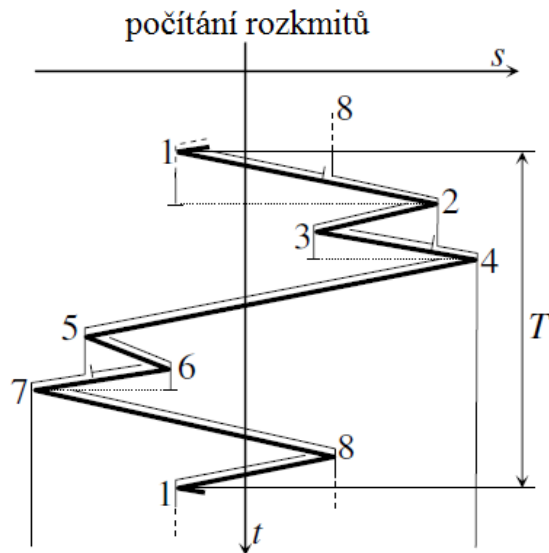


Obr. 3.7 Rozdělení proměnlivého zatěžování

Kmitavé procesy obsahují složku deterministickou (systematikou) a stochastickou (náhodnou). Deterministická složka může být periodická (sinusové kmity s konstantní amplitudou - harmonická) nebo neperiodická. Pokud se podaří deterministickou složku filtrací vyloučit, pak zbude čistě náhodný proces, jehož jednotlivé realizace jsou sice rozdílného průběhu, ale všechny se vyznačují společnými statistickými charakteristikami. Dle [1] je proces stacionární, pokud jsou jeho statistické charakteristiky v celém rozsahu měřené realizace stále a nezávislé na čase. Proces je ergodický, když je hustota pravděpodobnosti přes soubor jeho realizací v jednom časovém okamžiku rovna hustotě pravděpodobnosti podél zvolené realizace za zvolený a dostatečně dlouhý časový interval. Většinu stochastických procesů inženýrské praxe lze popsat ergodickými stochastickými procesy.

Zpracování náhodného zatěžování

V reálném čase naměřené průběhy signálů (např. z tenzometrických snímačů) se pomocí analogově-digitálního převodníku digitalizují, zpracují a vypočítá se náhradní systém zatížení s účinkem dostatečně blízkým skutečnému provoznímu zatížení. Pro vyhodnocení záznamu existují různé metody, např. metody korelační analýzy a metody analýzy lokálních extrémů procesů (např. dekompozice metodami následných rozkmitů). Nejznámější a nejpoužívanější metodou lokálních extrémů je dekompozice metodou stékajícího deště (Obr. 3.8) používaná u kovových materiálů (simuluje chování kovu v oblasti plastického namáhání). Autory metody jsou Matsuishi a Endo a byla akceptována jako standard v mnoha zemích (USA, Rusko, aj.).



Obr. 3.8 Schéma metody stékajícího deště

Principem metody je sčítání četností na daných úsecích na sebou rozložených „střech“ po kterých „stéká déšť“ (Obr. 3.8). Výsledkem je jednoparametrické roztrídění rozkmitů.

U dopravních prostředků je rozsah provozních podmínek velmi velký. Na provozní podmínky mají vliv faktory prostředí (např. vozovky), klimatu (teplota, vlhkost, zimní údržba) a faktory pracovního procesu (vliv vozidla a člověka). Každý z těchto vlivů vytváří určité statistické rozdělení četností svého výskytu. Pro praktické zkoumání se vytváří pravděpodobnostní model provozu.

V současnosti existují dva hlavní přístupy pro návržení zkušebního namáhání v průběhu experimentů z hlediska únavového poškození:

- měkké zatěžování,
- tvrdé zatěžování.

Tvrdé zatěžování

Tvrdé zatěžování, kdy je řízená poměrná deformace, představují závislost mezi počtem kmitů do poruchy N a amplitudou poměrné deformace ε v $\log - \log$ souřadnicích pro symetricky střídavé deformace. Křivky jsou základem pro výpočet životnosti při nízkocyklovém namáhání. Tvrdé zatěžování se používá např. při experimentech souvisejících např. s tlakovými nádobami.

Měkké zatěžování

U měkkého zatěžování je řízena zatěžovací síla (amplituda napětí σ_a [MPa], která je konstantní). Představitelky těchto křivek životnosti jsou Wöhlerovy únavové křivky. Zkouší se na různých hladinách amplitudy napětí – tzv. hladinové zkoušky. Součástí zkoumání bývá určení vlivu středního napětí σ_m [MPa].

Měkké zatěžování se např. používá při experimentech na součástech dopravních prostředků.

Klasifikace zátěžných cyklů

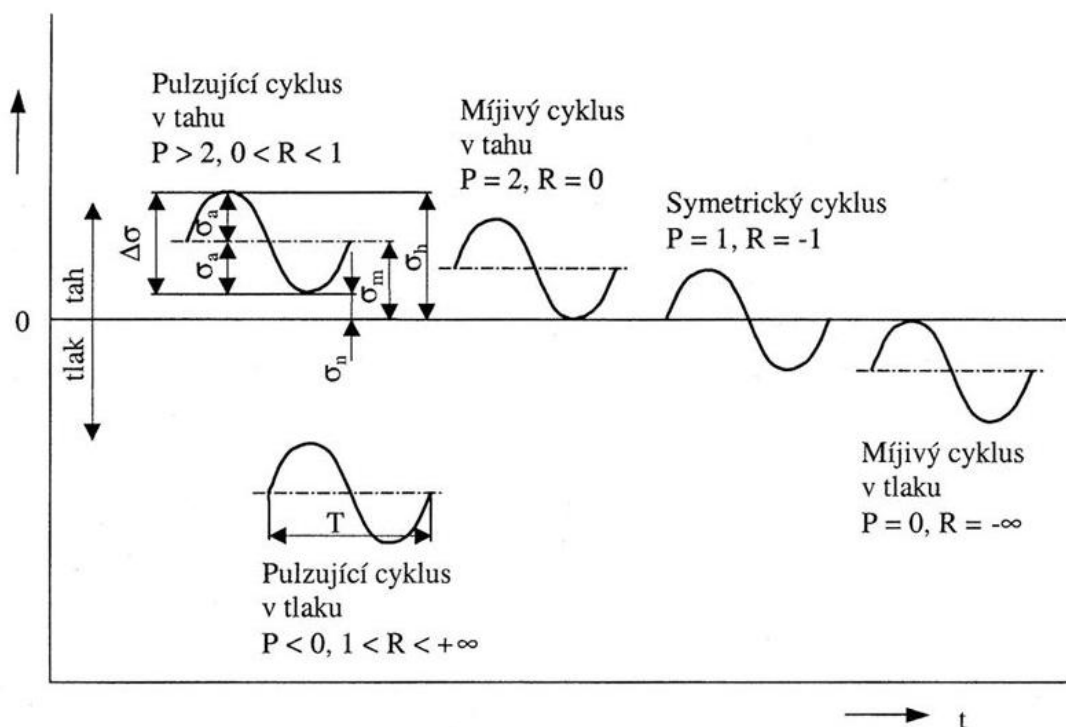
Rozdělení zátěžných cyklů je na Obr. 3.9, který znázorňuje velikost středního napětí σ_m , amplitudy σ_a a koeficientu (ne)souměrnosti R (rovnice (3.18)) pro různé typy cyklického zatížení. Amplitudový součinitel P_a se určí dle rovnice (3.15):

$$P_a = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_a} \quad (3.15)$$

kde: P_a je amplitudový součinitel [-],

σ_{max} - horní napětí cyklu [MPa],

σ_a - amplituda napětí [MPa].

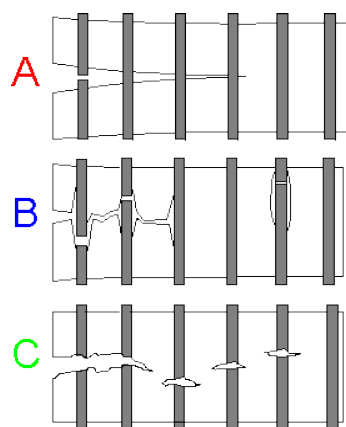


Obr. 3.9 Rozdělení zátěžných cyklů [41]

3.3.2 Únavové vlastnosti PKM

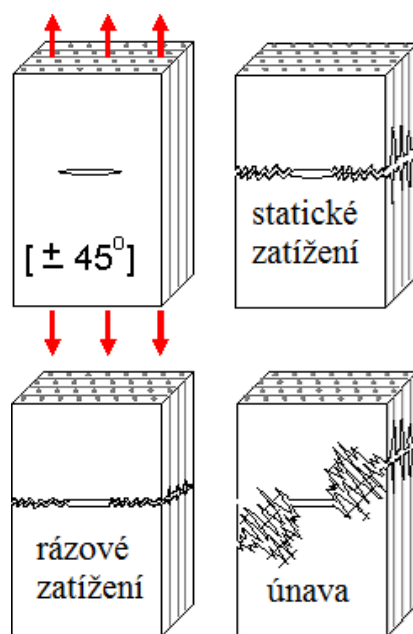
Kompozitní materiály vykazují vysokou odolnost proti prasklinám (lomu - lomovou houževnatost). Na Obr. 3.10 jsou znázorněny mechanické vlastnosti komponentů z KM a jejich vazeb určující lomovou houževnatost KM:

- A - pevnost v tahu matrice,
- B - pevnost vazby,
- C - pevnost v tahu vláken.



Obr. 3.10 Lomová houževnatost PKM [42]

Druh poškození vzorku z PKM je závislý na způsobu zatěžování. Vzorek poškozený při únavové zkoušce má mnoho trhlin a extrahovaných vláken. Vzorek poškozený při dynamické rázové zkoušce má mikropoškození menší, než u únavové zkoušky, Obr. 3.11.

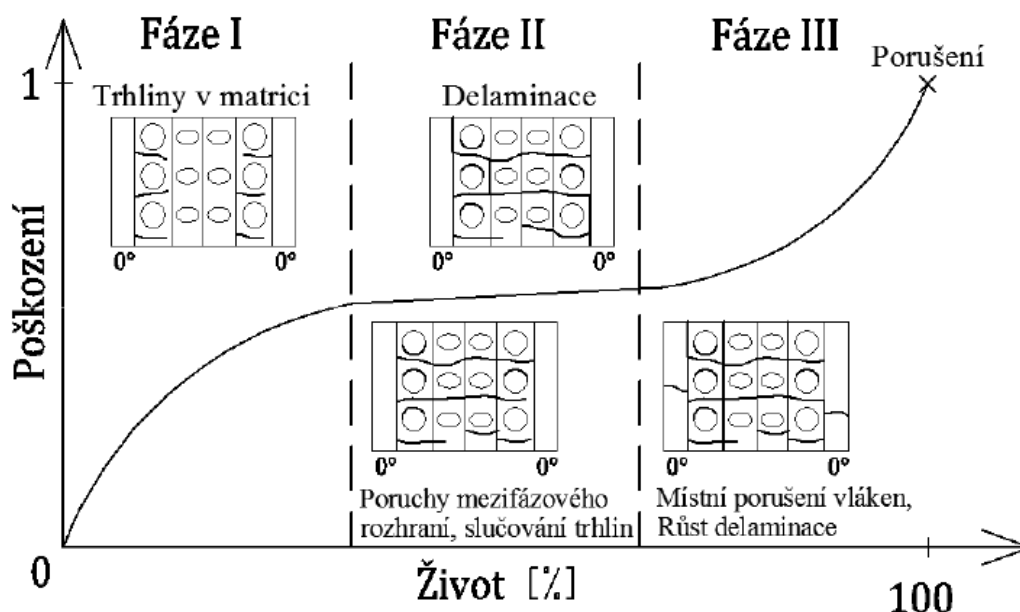


Obr. 3.11 Poškození PKM u rázové a únavové zkoušky [42]

Únavové poškozování laminátů (z PKM) je složitější, než u kovových materiálů. Je to dáno tím, že lamináty (i PSP) jsou vrstvené materiály a mají anizotropní vlastnosti. Únavové poškozování PKM se projevuje v těchto módech poškození, znázorněných na Obr. 3.12:

- praskliny v matrici,
- přetržení vláken výztuže,
- poruchy mezifázového rozhraní (odlepování vlákna od matrice, debonding),

- vláknové přemostění (fibre bridging),
- příčné praskání vrstev,
- delaminace (separace jednotlivých vrstev).



Obr. 3.12 Rozvoj módů poškození během života PKM [28]

Křivka v grafu znázorňuje kumulativní poškození. Z obrázku vyplývá, že lze popsat tři typické fáze poškození:

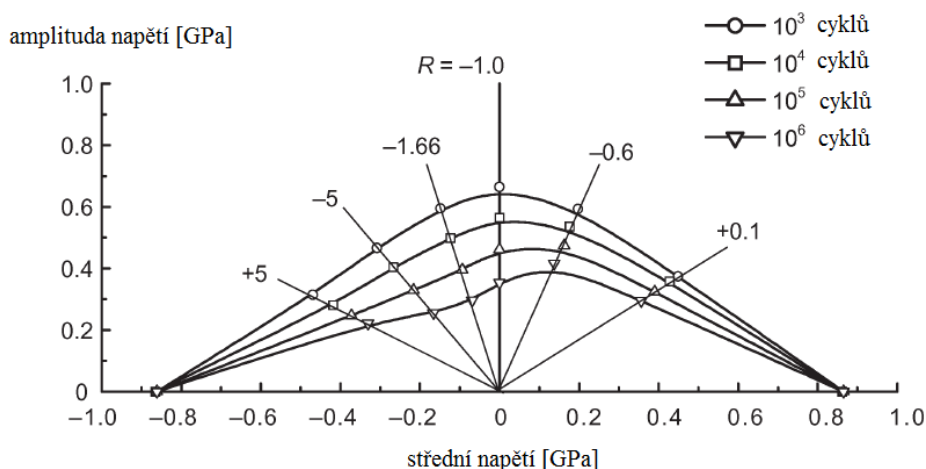
- Fáze I – nastává velmi brzy po několika počtech cyklů, jedná se o inicializaci trhlinek,
- Fáze II – nárůst množství trhlinek, vznik porušení mezifázového rozhraní, počátek delaminace,
- Fáze III – nárůst delaminace, rozsáhlé porušování vláken a konečné poškození.

Únavový proces PKM ovlivňuje:

- použitý materiál,
- tvar součásti,
- technologie výroby (volba vhodné technologie, dodržení technologických podmínek, u PSP podmínky slepení potahu a jádra),
- provozní podmínky.
- okolní prostředí – teplota, vlhkost, impakty,
- forma výztuže – tkaniny,
- vliv koncentrátorů napětí,
- způsob řízení cyklického zatěžování – měkké nebo tvrdé,
- vliv střední složky napětí.

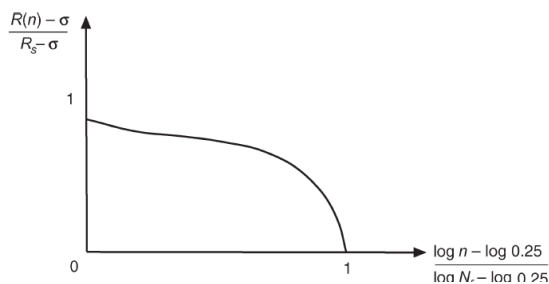
Vliv středního napětí u PKM lze znázornit pomocí CLD diagramu, což je obdobou Haigova diagramu pro kovy. Diagramy CLD jsou lineární nebo nelineární interpolační schémata vycházející z experimentálně získané S-N křivky pro

střední namáhání σ_m a amplitudu napětí σ_a . Zobrazují se jako linie spojující všechny body, což odpovídá určité únavě. Příklad CLD diagramu je na Obr. 3.13. V této práci není vliv středního napětí vyšetřován.



Obr. 3.13 CLD diagram závislosti amplitudy a středního napětí [43]

Při únavovém zatěžování PKM dochází vlivem rozvíjejícího se poškození k poklesu normované tuhosti. Na Obr. 3.14 je znázorněno, že na začátku únavového procesu dochází k poklesu tuhosti, v následné fázi je pokles tuhosti postupný. Zde většina poškození probíhá v krajních, nejvíce namáhaných vrstvách kompozitu. Po určitém počtu cyklů dochází k nestabilnímu porušení krajní vrstvy. Důsledkem toho tuhost skokově poklesne. Následný pokles tuhosti je pak dán složitým procesem kombinace postupného poškozování vnitřních vrstev ve spojení s delaminací krajní vrstvy. Proces pokračuje do celkového poškození.



Obr. 3.14 Závislost tuhosti na počtu cyklů [43]

3.3.3 Únavové vlastnosti PSP

PSP mají specifické vlastnosti s hlediska únavové životnosti. Sendvič je konstruován tak, aby se v provozu promítly výhodné vlastnosti každé složky sendviče, tj. potahů, voštinového jádra a případně lepidla. 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. Zkušební metodika únavových zkoušek

musí vždy obsahovat statistický přístup k hodnocení výsledků zkoušek. Na základě statistického vyhodnocení lze učinit určité zobecnění.

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.

Problematika únavového zatěžování PSP není zcela prozkoumána a nejsou vyvozeny všeobecně platné závěry (např. o vzniku a šíření poškození panelů a konstrukcí, o životnosti, atd.). Na rozdíl od kovových materiálů, kde jsou v České republice platné hned dvě normy [105] a [106] pro únavové zkoušky kovů, neexistuje specializovaná norma, která by popisovala zkoušení a statistické vyhodnocení únavy PSP. V zahraničí existuje pouze norma [107] platná pro kompozitní materiály (lamináty) a vojenská norma [108].

Existuje poměrně malý počet odborných a vědeckých publikací zabývajících se problematikou životnosti PSP. V základní knize o sendvičových konstrukcích [16] jsou uvedeny pouze statické testy a chybí testování životnosti. Únavové zkoušky kompozitních konstrukcí jsou popsány v [17], avšak jde jen o lamináty. Existuje jen omezené množství vědeckých článků zabývajících se únavovými zkouškami PSP [18 - 27].

V článku [18] je uvedena S-N křivka pro sendvič s jádrem z PVC. Souřadnice jsou v $\log - \log$ a finální rovnice, popisující přímky, má tvar dle rovnice (3.16):

$$\log \Delta\sigma = -\frac{1}{m} \log N + C^* \quad (3.16)$$

kde: $1/m$ je sklon přímky v \log - \log souřadnicích,

$C^* = (\log C)/m$ je materiálová konstanta,

$\Delta\sigma$ - rozdíl mezi max. a min. napětím daným rovnicí (3.17):

$$\Delta\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min} = (1 - R) \sigma_{max} \quad (3.17)$$

kde: $\Delta\sigma$ je rozkmit napětí [MPa],

R - součinitel asymetrie cyklu, vypočtený dle rovnice (3.18):

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_m} \quad (3.18)$$

kde: σ_{min} je dolní napětí cyklu [MPa],

σ_{max} - horní napětí cyklu [MPa].

Autoři dále uvádí možnost popsat S-N křivku také s využitím dvouparametrického Weibullova rozdělení. V článku je také uvedena možnost využití infračervené termografie pro nedestruktivní diagnostiku kompozitních materiálů.

V [19] se popisují tři fáze únavového selhávání PSP:

- začátek inicializace trhliny, způsobené povrchovými poškozeními v průběhu výroby nebo při manipulaci,
- šíření trhlín pokračuje v růstu v důsledku kontinuálního zatěžování,
- selhání v okamžiku, když část PSP, která nebyla ovlivněna trhlinou, již nemůže přenést napětí.

Autoři provedli FEA simulaci únavového zatěžování vzorku z PSP (potah skelný laminát, jádro hliníková voština, zatížení 1 kN) v programu ANSYS Workbench a následně experiment na stroji Instron. Výsledek experimentu potvrdil takřka úplnou shodnost simulované S-N křivky s S-N křivkou získanou z experimentu.

V [20] je popis experimentu zaměřeného na analýzu únavového zatěžování voštinového jádra s využitím „Food-Cart Roller Test“. Stejně jako v předchozím článku, S-N křivky jsou sestrojeny do přibližně 10^6 cyklů.

Velmi podobný tématu této disertační práce je experiment uveřejněný v [21]. Potahy byly vyrobeny z matrice s uhlíkovými vlákny (CYCOM, 3 vrstvy, hustota: 1650 kg.m^{-2} , 33 % pryskyřice). Jádra byla voštinová z hliníkové slitiny (hustota: 50 kg.m^{-2} , rozměr jádra 4,8 mm, tloušťka stěny 0,025 mm). Rozměr vzorků: 210 x 45 x 10,4 mm. Statická zkouška v ohybu byla provedena metodou čtyřbodového zatěžování. Průměrná síla při porušení byla 425 N. Všechny vzorky byly poškozeny tak, že došlo k odlepení potahu od jádra. Únavové zkoušky byly prováděny do 10^6 cyklů. Jednotlivé hladiny zatěžování vycházely ze statických testů v ohybu. Součinitel nesouměrnosti cyklu byl $R = 0,1$, frekvence zatěžování $f = 10 \text{ Hz}$. K vyhodnocení bylo použito Weibullovo rozdělení dle rovnice (3.19):

$$M_{f,(50\%)}(N) = M_{fD,(50\%)} + (M_{s,(50\%)} - M_{fD,(50\%)}) \cdot e^{-[(\log N)/a]^b} \quad (3.19)$$

kde jsou odečteny všechny hodnoty ohybového momentu při 50% pravděpodobnosti selhání. Výsledkem experimentů bylo potvrzení platnosti rovnice (3.19) a nevhodnosti využití Burmanova a Zenkertova modelu.

Velmi rozsáhlá práce zabývající PSP ve stavbě letadel je v [22]. Autor této disertační práce řešil stejnou tematiku, jako tato disertační práce a také navíc:

- životnost PSP: stanovil S-N křivky panelů s voštinovým jádrem, pro různé R ,
- zabýval se Palmgren-Minerovým modelem,
- řešil problematiku konfigurace voštinového jádra (S-N křivky pro L a W konfiguraci),

- zabýval se FEM voštinového jádra,
- statickým zatížením insertů v PSP,
- problematiku spojování panelů.

3.3.4 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. Zalévací hmota je odolná proti únavovému poškození v případě, že došlo k správnému slepení s jádrem i potahem. Voština může být výrazně namáhána jen normálovým zatížením k rovině potahu. Ohyb nebo krut insertu je třeba vyloučit vhodnou konstrukcí. 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.

Při únavovém návrhu insertního spojení je nutno uvažovat vliv teploty (viz také možný vznik autogeneus u zalévací hmoty).

Spolehlivostí insertů v sendvičových kompozitových panelech se zabývá [23]. Autor konstatuje, že lokální napěťové koncentrace, způsobené inserty mohou způsobit selhání konstrukce. Je zřejmé, že nejistota v mechanických vlastnostech základních materiálů musí být řešena již při návrhu a optimalizaci insertů montovaných do sendvičových panelů. V práci je analyzována spolehlivost nevytržení insertu z panelu (nikoliv životnost). Autor použil metodu Monte Carlo pro analýzu spolehlivosti (FORM) a konstatoval, že metoda Monte Carlo je velmi účinnou technikou pro analýzu spolehlivosti. Problematika životnosti insertů v PSP je podrobně popsána v [101].

3.3.5 Mezní stav PSP

Termín mezní stav (MS) je definován v podkapitole 1.2 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,

3.3.6 Metody stanovení životnosti a dimenzování na únavu

V inženýrské praxi je třeba stanovit spolehlivou únavovou pevnost a požadovanou životnost. V praxi se jedná o úlohu dimenzování dynamicky namáhaných součástí a konstrukcí. V praxi se používá těchto pět metodik dimenzování:

- na trvalou pevnost (neomezenou životnost),
- na časovou pevnost: konstrukce s bezpečným životem (safe life),
- konstrukce bezpečné při poruše (fail safe),
- damage tolerance (konstrukce s přípustným poškozením),
- pomalé šíření trhlin.

Konstrukce na trvalou pevnost

Jedná se o namáhání součástí s velmi vysokým počtem kmitů zatížení, že je třeba je navrhnout tak, aby jejich namáhání bylo nižší než jejich mez únavy. Stanovuje se napětěový součinitel bezpečnosti součásti vůči mezi únavy.

Konstrukce s bezpečným životem (Safe-life)

Konstrukce musí být posouzena s ohledem na schopnost vydržet opakovaná zatížení proměnné velikosti předpokládané během celého únavového života a to bez zjištěných trhlin.

Konstrukce bezpečná při poruše (Fail-safe)

Znamená, že konstrukce je navrhována tak, aby katastrofické selhání nebylo pravděpodobné ani po vzniku únavové poruchy nebo při zřejmém selhání jednoho důležitého nosného členu.

Konstrukce s přípustným poškozením (Damage tolerance, používáno v leteckém průmyslu)

Konstrukce jako celek je posuzována při vážném poškození únavou, korozí, nebo provozním poškozením, ke kterému může dojít v průběhu provozního života letounu, s ohledem na schopnost zbytku konstrukce přenést významné provozní zatížení bez poruchy nebo bez značných provozních deformací po dobu do zjištění takového poškození.

Konstrukce s pomalým šířením trhlin (Slow crack growth)

Materiálové a konstrukční opatření nemohou v provozu způsobit rychlé šíření trhliny nebo jejich vzájemné spojování, takže rozvoj trhliny mezi dvěma kontrolními prohlídkami nemůže způsobit poruchu.

3.4 Modelování a predikce únavové životnosti

Při navrhování součástí na časovou pevnost je nutno znát dvě skupiny vstupních dat:

- spektrum zatížení,
- únavové křivky materiálu.

Jsou-li známy statistické údaje obou typů vstupních dat, lze určit pravděpodobnost vzniku poruchy na konci bezpečného života součásti. V případě, že jsou data neúplná, lze použít metody doplňující chybějící údaje. Existuje celá řada hypotéz kumulace únavového poškození.

3.4.1 Palmgren-Minerova (P-M) hypotéza

Jedná se o jednu z nejstarších teorií kumulace zatížení, která byla odvozena v roce 1924 Palmgrenem a týkala se tehdy kuličkových ložisek. Jedná se o teorii založenou na předpokladu rovnoměrného lineárního nárůstu poškození. Podle této teorie dojde k poruše součásti tehdy, když parametr P-M pravidla D dosáhne hodnoty dle rovnice (3.20):

$$D = \sum_{i=1}^m \frac{n_i}{N_i} \quad (3.20)$$

kde: D je parametr P-M pravidla ($D = 1$),

m - počet různých úrovní hladin zatížení,

n_i - počet zatěžovacích cyklů na hladině i ,

N_i - počet cyklů do poruchy na hladině i (určí se s S-N křivky).

3.4.2 Další metody predikce životnosti PKM

V oblasti PKM je vhodnější využívat jiné teorie, např. metody založené na zbytkové tuhosti a pevnosti. Např. v [28] se uvádí, že Talreja vyvinul kontinuální model poškození tuhosti lokálních ploch. Další modely, používané pro PKM a založené na pevnosti pochází z prací Halpina a spol., byly rozpracovány Yang a Du a upraveny Reifsniderem. Jedná se o modely, které jsou považovány za dobrý alternativní model předpovědi života podle pravidla Palmgren-Miner. Dnes jsou tyto modely zapracovány do FEA (FEM) metod předpovědi zahájení delaminace. Dalšími autory, zabývajícími se poklesem tuhosti kompozitních materiálů při cyklickém zatěžování jsou např. Van Paepegem a Degrieck, kteří vyvinuli model poklesu tuhosti pro inicializaci i šíření poškození. Subramanian a spol. se zabývali únavovou odezvou laminátů v tahu s ohledem na dlouhodobé chování rozhraní vlákno-matrice.

V [29] je uveden analytický model pro predikci počtu cyklů do poškození PKM s výztuží ze skelných vláken, který byl vyvinut Hwangem a Hanem v roce 1986. Model popisuje rovnice 3.21:

$$N = [B(1 - r)]^{\frac{1}{c}} \quad (3.21)$$

kde: N je počet cyklů do porušení

$$B = 10,33, C = 0,14012, r = \sigma_{max}/\sigma_U$$

σ_U - maximální napětí v tahu

r - použitá napěťová hladina.

Autor provedl analytický výpočet dle rovnice (3.21) pro osm hladin zatížení ($R = 0,24$) a následné experimentální ověření analyticky získaných výsledků. Autor konstatoval, že Hwangův a Hanuv model je velmi užitečný pro předpověď počtu cyklů do poškození kompozitu.

Další predikční metody jsou založené na principu mechaniky kontinua, které byly vyvinuty na základě poznatků o creepu u kovových materiálů převedených do problematiky PKM. Talreja publikoval vektorovou charakteristiku mikrotrhlin v kompozitech. Tím dal termodynamický rámec vyjádření vztahu tuhosti a poškození pomocí vnitřních proměnných. Pro tyto metody je nutno experimentálně určit materiálové charakteristiky PKM s využitím klasické laminátové teorie. Další modely, použitelné pro předpověď životnosti konstrukčních prvků z polymerních kompozitů použitých v konstrukcích letadel jsou uvedeny v [30]. Jedná se o modely Trunina, Sendeckého, Kassapoglua a Mandella. Využitím neuronových sítí v predikci životnosti kompozitních materiálů se zabývá [31].

3.5 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). Vlákný 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°C.

3.6 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.

3.6.1 Hodnocení výsledků únavových zkoušek dle normy

Výsledky únavových zkoušek je možno vyhodnotit dle [106]. Norma uvádí, že měření je nutno statisticky vyhodnotit pro každou hladinu napětí zvlášť nebo pro více úrovní napětí naráz. Je možno předpokládat, že soubory výsledků zkoušek mají logaritmus počtu cyklů dle normálního rozdělení. Pro každou

hladinu je nutno vypočíst aritmetický průměr počtu naměřených cyklů \bar{x} , určit medián naměřených cyklů \tilde{x} , vypočíst směrodatnou odchylku naměřených cyklů σ a variační koeficient V_x . Dále je třeba dle rovnice (3.22) vypočíst výběrový průměr, jako nejlepší odhad střední hodnoty základního souboru E dle rovnice:

$$\hat{\mu} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \quad (3.21)$$

kde: $\hat{\mu}$ je výběrový průměr,

X_i - i -tá hodnota pozorovaného zkušební souboru (v \log_{10}),

n - počet datových souborů.

Značka „ $\hat{\mu}$ “ znamená, že se jedná o odhad vycházející ze zkušební souboru. Výběrová směrodatná odchylka se vypočte z rovnice (3.22):

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \hat{\mu})^2}{n - 1}} \quad (3.22)$$

kde: σ je výběrová směrodatná odchylka,

X_i - i -tá hodnota pozorovaného zkušební souboru (v \log_{10}),

$\hat{\mu}$ - výběrový průměr.

Medián životnosti se vypočte dle rovnice (3.23):

$$\hat{N}_{(P;1-\alpha;v)} = 10^{\hat{x}_{(P;1-\alpha)}} \quad (3.23)$$

kde: $\hat{N}_{(P;1-\alpha;v)}$ je medián životnosti v počtech cyklů při pravděpodobnosti porušení P (spolehlivost predikce) v %,

$1 - \alpha$ - konfidenční hladina spolehlivosti,

v - počet stupňů volnosti.

Odhad počtu cyklů nejkratší životnosti, který přežije 95% všech vzorků se vypočte z rovnice (3.24):

$$\hat{N}_0 = 10^{\hat{\mu} - l_s \cdot \sigma} \quad (3.24)$$

kde: \hat{N}_0 je nejkratší životnost v počtu cyklů,

$l_s(1,645)$ - konstanta určená z tabulek v [105] pro přežití $x\%$ všech vzorků.

Dolní mez únavové životnosti pro $x\%$ pravděpodobnost porušení na konfidenční hladině $x\%$, kdy je jednostranná toleranční mez normálního rozdělení $k_{(P;1-\alpha;v)}$ (viz tabulka B1 v [106]), vypočte se z rovnice (3.25):

$$\hat{x}_{(P;1-\alpha)} = \hat{\mu} - k_{(P;1-\alpha;v)} * \sigma \quad (3.25)$$

kde: $\hat{x}_{(P;1-\alpha)}$ je dolní mez únavové životnosti v počtech cyklů,

$k_{(P;1-\alpha;v)}$ - jednostranná toleranční mez normálního rozdělení.

Spojením vypočtených hodnot se získá Wöhlerova křivka (S-N křivka), která představuje x % (např. 95%) mez přežití. K vyrovnání S-N křivky se použije dle [32] regresní nelineární metoda nejmenších čtverců. Při pilotních zkoumáních, při kterých byl proveden omezený počet zkoušek, bylo zjištěno, že uvedený postup nevede ke správným výsledkům. V této práci bylo použito malé množství vzorků, proto byl použit následně popsany postup.

3.6.2 Hornův postup

Statistická analýza jednorozměrných dat [33]

Důvodem statistické analýzy jednorozměrných dat je:

- charakterizovat výběrové rozdělení,
- odhad jeho parametrů,
- popřípadě tvorba pravděpodobnostních modelů.

Použití výběrových charakteristik se vztahuje k rozdělení základního souboru, ze kterého výběr pochází. Pro popsání výběru se vyčíslují základní charakteristiky, jsou-li v datech předpokládáné i odlehle hodnoty, využívá se robustních odhadů a to hlavně kvantilové odhady. Zda se naleznou jiné jako normální rozdělení, používají se maximálně věrohodné odhady jeho parametrů.

Statistické pojmy u analýzy malých výběrů

Interval spolehlivosti střední hodnoty:

- vypočte se intervalový odhad parametru μ (polohy či rozptylu),
- je-li tato hodnota μ_0 parametru μ v intervalu, tak se nezamítá $H_0: \mu = \mu_0$
- je-li μ_0 mimo interval, H_0 se zamítá.

Nebo-li statistická jistota s jakou bude „pravda“ ležet v dolních a horních mezích je rovna $1 - \alpha$.

Hladina významnosti

Je parametr, který pokrývá interval se zvolenou statistickou jistotou (pravděpodobností); $P = (1 - \alpha)$; nesoucí název koeficient spolehlivosti (konfidenční koeficient, statistická jistota). Parametr α je většinou roven 0.95 nebo 0.99.

Spodní a horní mez

Tvoří meze tzv. konfidenčního intervalu, ve kterém se nachází neznámý parametr μ .

Medián - \tilde{x}

Je 50 % kvantil (Q2), který rozděluje soubor na dvě poloviny. Pro Hornův postup důležitý, jelikož nepracuje s průměry, ale s mediány.

Integer – (int)

Obsahuje celá čísla se znaménkem v rozsahu (-2 147 483 648 - 2 147 483 647).

Analýza malých výběrů [33]

Malé výběry jsou ty, které obsahují 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**. V této práci jsou z výše uvedených důvodů na každé hladině naměřeny jen čtyři hodnoty počty cyklů do MS.

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 (3.26) a (3.27):

$$H = \frac{\left(\text{int} \left(\frac{(n+1)}{2} \right) \right)}{2} \quad (3.26)$$

$$H = \frac{\left(\text{int} \left(\frac{(n+1)}{2} \right) + 1 \right)}{2} \quad (3.27)$$

dle toho se určuje, které číslo vyjde celé a dolní pivot je potom (3.28):

$$x_D = x_{(H)} \quad (3.28)$$

a horní pivot (3.30):

$$x_H = x_{(n+1-H)} \quad (3.30)$$

- Jinak řečeno maximální a minimální hodnota, ze které se dále vyhodnocují následující parametry.
- Odhadem parametru polohy je pivotová polosuma (3.29):

$$P_L = \frac{(x_D + x_H)}{2} \quad (3.29)$$

- Odhadem parametru rozptýlení je pivotové rozpětí (3.30):

$$R_L = x_H - x_D \quad (3.30)$$

Náhodná veličina T_L , kterou můžeme použít k testování má přibližně symetrické rozdělení (3.31):

$$T_L = \frac{P_L}{R_L} = \frac{x_D + x_H}{2(x_H - x_D)} \quad (3.31)$$

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

Tabulka Hornových kvantilů je v příloze č. 1. Po použití Hornova postupu se již neprovádí následné statistické testování (např. hypotéz).

3.7 Základy spolehlivosti konstrukcí

Pojem spolehlivosti již byl definován v podkapitole 1.2. Spolehlivost je pojem, který prošel složitým historickým vývojem a který je používán v nejrůznějších souvislostech. V této práci bude spolehlivost chápána v souladu s [2] jako určitá vlastnost zkoumaných objektů (konstrukcí) a kterou s využitím analýz, prognóz, výpočtů, modelování a zkoušek lze ovlivňovat. Spolehlivost výrobku je chápána jako nedílná součást celkového souhrnu znaků, které ovlivňují schopnost uspokojovat stanovené potřeby uživatele. Tato schopnost se souhrnně nazývá jakost. Jakost zahrnuje celou řadu dalších vlastností objektu, jako je: technická funkčnost, ekologičnost, bezpečnost, ekonomičnost, estetičnost, aj. Spolehlivosti má být věnována systematická pozornost ve všech etapách života výrobku (koncepce a stanovení požadavků, návrh a vývoj, výroba, instalace, provoz a údržba, vypořádání).

Při technické analýze spolehlivosti se sledují především časové intervaly, v nichž výrobek pracuje. Za vadu se považuje jakýkoliv nesouhlas výrobku s technickou dokumentací v podobě provozuschopnosti. Sledují se doby do poruchy, doby mezi poruchami. Při měření životnosti se rozlišuje mezi součtem všech dob provozu od začátku provozu do okamžiku vzniku mezního stavu (popsaného v technických podmínkách) vyžadujícího konečné vyřazení (technický život) a mezi kalendářní dobou jako součtem všech dob provozů a prostojů do konečného vyřazení (doba používání). Další sledovanou veličinou je počet poruch (během dané doby provozu). Cílem hodnocení úrovně spolehlivosti je zjištění ukazatelů spolehlivosti (např. medián t_{50} , který udává dobu provozu, které dosáhlo 50% členů velkého výběru).

Zkoušky spolehlivosti jsou buď laboratorní nebo provozní. Jsou zkoušky:

- zkrácené (cenzurované), kdy se ukončují dříve, než dojde k poruše,
- zrychlené, kdy se např. zvětší zatížení, které zkrátí dobu zkoušky,
- trvanlivosti, ověření spodní hranice způsobilosti výrobku zachovat si provozuschopnost,
- bezporuchovosti (životnosti) do dosažení MS.

3.8 Vady PSP

Vady v kompozitních materiálech mohou vzniknout ve výrobě nebo v provozu. Výrobní vady zahrnují např. rozlepení nebo neslepené plochy, oblasti s velkým množstvím pryskyřice, vzduchové bubliny, tepelné poškození, impakty (pád), aj. Příčinou těchto vad bývá nesprávné vytvrzování, obrábění (broušení), nesprávná laminace, znečištění, aj. Poruchy v provozu mohou vzniknout z důvodu poškození nárazem, únavou materiálu, místním přetížením konstrukce, erozí, vlivem provozního okolí (vlhkost, teplota).

Mezi nejčastější vady kompozitů patří delaminace a rozlepení konstrukce. Při delaminaci dojde k vzduchovému rozhraní mezi vrstvami v laminátu. Příčinou může být tvorba matricových trhlin vzniklých po nárazu. K rozlepení může dojít díky malé adhezi mezi dvěma prvky. Kritičnost vzniku delaminace nebo rozlepení závisí na rozměrech, druhu zatížení, přítomnosti koncentrátorů napětí, blízkosti okrajů součásti, tvaru součásti, atd.

3.8.1 Vady PKM

Vady v kompozitních materiálech je možné rozdělit:

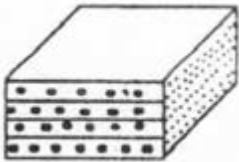
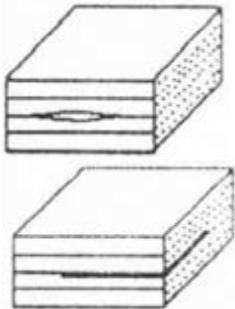
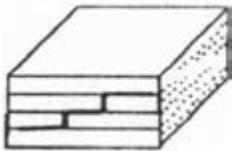
- podle lokalizace na vady: - vnitřní,
 - povrchové (vnitřní vady mohou vystupovat na povrch součásti),
- podle doby, kdy vznikly: - vady vzniklé při výrobě součásti,
 - vady z provozu součástky.

Nejvýznamnější vady PKM, která mají vliv na životnost:

- 1) Dutiny: Prostor s uzavřeným vzduchem uvnitř materiálu. Může vzniknout při výrobě vlivem vnesení vzduchu při smíchání pryskyřice a tvrdidla nebo nedostatečným slisováním laminátu. Jedná se buď o drobné vady s pravidelným takřka kulovitým tvarem ($\phi = (10 - 100) \mu\text{m}$) nebo rozsáhlé vady s rozměry až několik mm.
- 2) Delaminace: Místní porušení soudržnosti mezi jednotlivými vrstvami. Delaminace je způsobená nadměrným napětím v matrici PKM.
- 3) Trhliny: Místní porušení soudržnosti materiálu. Trhlina mívá různou orientaci k rozhraní výztuže a bývá k výztuži často kolmo orientovaná nebo probíhá samotnou vrstvou. Může dosahovat délky i několik mm. Trhlina bývá způsobená následkem tepelných pnutí při vytvrzování nebo při namáhání z provozu.
- 4) Místa bez pojiva: Tento typ vady vzniká ve výrobě, kde dochází k přesycení suché výztuže pojivem z jiných vrstev. Může být způsobená kontaminací pojiva separační látkou nebo špatně navrženými tlakovými poměry.
- 5) Konstrukční vady: Jsou to např. špatně navržené detaily konstrukcí, které mohou mít vliv na vznik napěťových špiček.

V Tab. 3.2 jsou uvedeny vybrané druhy vad PKM.

Tab. 3.2 Vady kompozitů (laminátů) [44]

Druh vady	Schéma	Kvantitativní a kvalitativní ukazatele	Příčiny vzniku vady
Nerovnoměrnost ve složení laminátu		Hodnoty objemového obsahu matrice, vláken	Porušení podmínek ukládání, nedodržení režimu tvarování
Delaminace		Forma a rozměry, hloubka výskytu	Uvolňování antiadhezivních maziv, nedostatečný obsah pojiva, vysoký obsah prchavých prvků, porušení způsobu tváření: vysoká teplota, vysoká rychlost ochlazování,
Prasklina		Ovlivněné vrstvy a směr trhliny, umístění trhliny na straně	Porušení režimu tvarování, nepřípustné mechanické zatížení při odstraňování dílů z formy, při přepravě, obrábění, nárazy

3.8.2 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

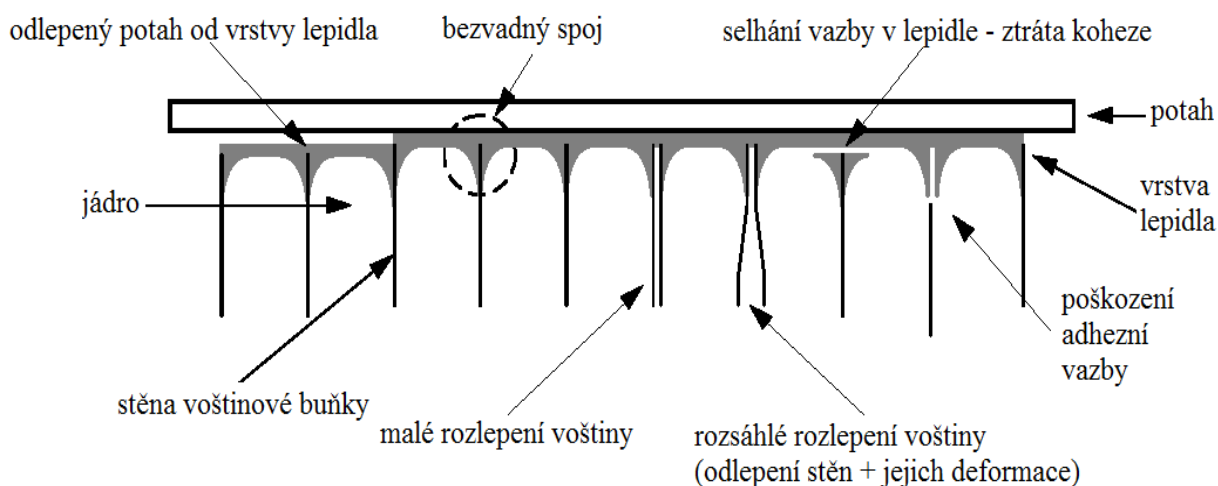
Ztráta adheze představuje selhání vazby (lepeného spoje) mezi lepidlem a lepeným materiálem. Příčinami ztráty adheze mohou být:

- 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:

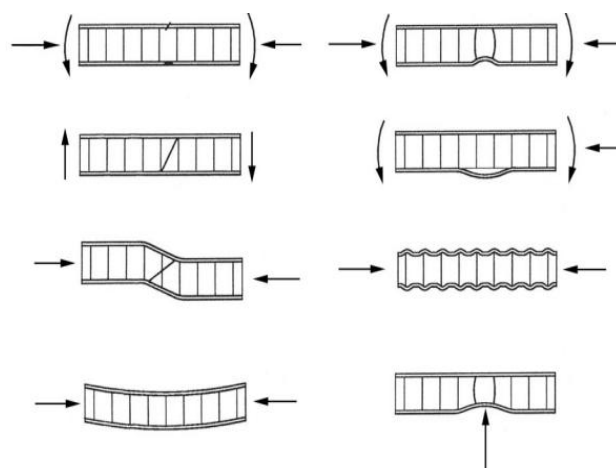
- špatně vytvrzené lepidlo,
- vlhkost nebo jiné nečistoty přítomné v lepidle,
- vyšší než předpokládané zatížení PSP.

Na Obr. 3.15 jsou zobrazeny druhy selhání adhezivní a kohezní vazby.

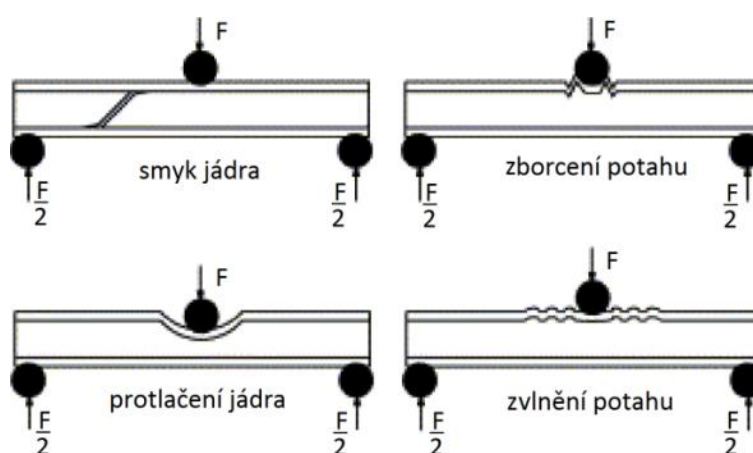


Obr. 3.15 Druhy selhání adhezivní vazby pro PSP [45]

Na Obr. 3.16 jsou znázorněny různé druhy poškození PSP při různých směrech působícího zatížení. Na dalším Obr. 3.17 jsou vady, které mohou vzniknout při „tříbodovém ohybu“. Klasifikace vad PSP je [46] a klasifikace vad PSP způsobených při jejich výrobě je v [47].



Obr. 3.16 Poškození PSP při různých směrech zatížení [10]



Obr. 3.17 Poškození sendviče vzniklé při tříbodovém ohybu¹⁵ [18]

3.9 Nedestruktivní testování kompozitů a PSP

Metod destruktivního testování PKM a PSP je velké množství a jsou převážně standardizované. Pro PSP jsou to např. normy ASTM C 297, C 364, C 273 a D 7249. Po destruktivním testování již nemůže být vzorek nebo celá konstrukce dále použita. To je hlavní nevýhoda destruktivního testování. Proto provést jakoukoliv destruktivní zkoušku na letounu, resp. jeho součásti, která ještě nemá být dle opravárenské dokumentace vyměněna, není z ekonomického pohledu možné. Proto byla vyvinuta celá řada metod nedestruktivního testování.

3.9.1 Používané metody NDT

Metody nedestruktivní diagnostiky PKM a PSP

Z velkého množství nedestruktivních metod, lze uvést např.:

- vizuálně-optické metody,
- zvukové metody (např. Tap Test metoda (kladívko)),

¹⁵ Protlačení jádra = indentace

- vířivé proudy,
- ultrazvuk (asi nejrozšířenější a nejznámější, např. ultrazvuková spektroskopie),
- elektromagnetické (mikro)vlny,
- počítačová rtg. tomografie,
- laser-ultrazvuková defektoskopie,
- laserová vibrometrie,
- laserová shearografie (1. místo, viz dále: hodnocení NDT metod),
- infračervená termografie (2. místo), ultrazvuková IR termografie.

V [34] je provedena analýza vhodnosti uvedených NDT metod pro testování PKM. Nejlepších výsledků lze dosáhnout počítačovou tomografií. Jedná se však o velmi drahou metodu využitelnou zatím pouze v laboratorních podmínkách (proto mimo pořadí). První místo v hodnocení metod NDT zaujala laserová shearografie. Druhou nejvhodnější NDT metodou pro testování PKM je dle [34] aktivní infračervená termografie. Jedná se o metodu řádově levnější než je počítačová tomografie, využitelnou v provozních podmínkách dopravní techniky (i v leteckém provozu). Příklad testování kompozitní konstrukce je v [35].

3.9.2 Infračervená termografie

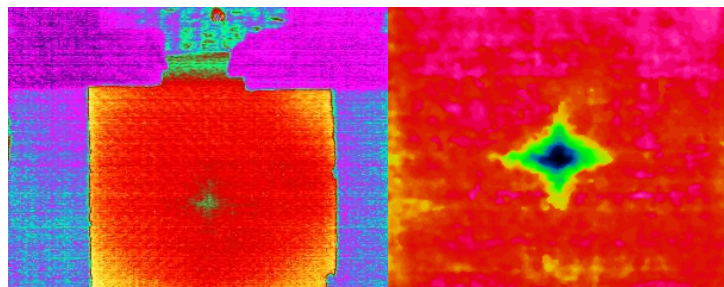
Infra-červená (IR - Infra Red) termografie je analytická technika založená na detekci záření objektů v IR spektru vlnových délek. Takto v souladu se zákonem vyzařování absolutně černého tělesa září všechna tělesa, jejichž teplota je vyšší než absolutní nula. Zařízení, které detekuje a skládá 2D obraz IR záření se obecně nazývá termografická kamera (termokamera). Výsledkem záznamu termokamery je obraz odpovídající intenzitě tepelného vyzařování snímaného objektu. Tento záznam se nazývá termogram. Intenzita tepelného záření objektů přitom přímo souvisí s jejich teplotou. Termogram je proto obrazem rozložení povrchové teploty tělesa a IR termografie se nejčastěji využívá k bezkontaktnímu měření prostorového a časového rozložení teplotních polí. Termografie je pasivní nebo aktivní. Pokud se při měření uměle neovlivňuje teplota součásti a měří se její přirozená teplota nebo přirozeně vzniklé teplotní kontrasty, jedná se o pasivní termografii. Při aktivní termografii se teplota součásti ovlivňuje vnějším zdrojem (bleskové světlo, zdroj teplého vzduchu).

3.9.3 Aktivní infračervená termografie

Teplotní vodivosti materiálu je vlastnost charakterizující vedení tepla. Tato vlastnost popisuje, jak rychle materiál reaguje na změny teploty. Podle hodnoty součinitele teplotní vodivosti lze usuzovat na rychlost změny teploty v určitém místě materiálu v důsledku změny jeho povrchové teploty

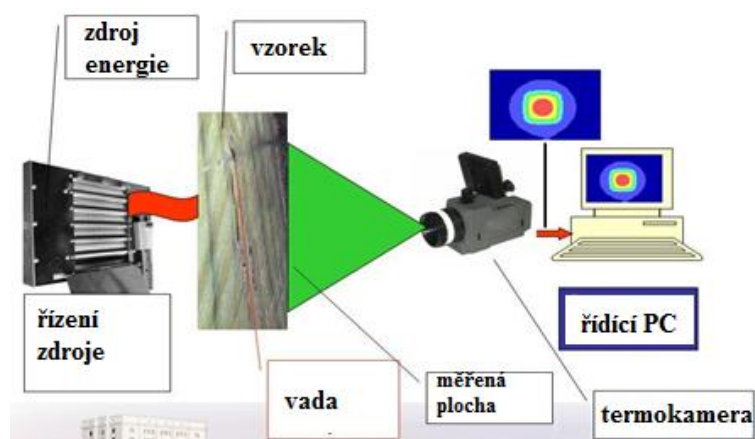
Na měřeném objektu je uměle aplikováno vybuzení externím zdrojem (např. studiovým fotobleskem), který způsobí vznik teplotních kontrastů spojených s materiálovými nehomogenitami nebo výskytem vad v materiálu [36].

Pracoviště pro aktivní infračervenou termografii se skládá z měřeného vzorku, zdroje světla se zdrojem energie s řídicí jednotkou a z termokamery. To vše řídí a vyhodnocuje počítač. Na Obr. 3.18 vlevo je snímek z termokamery (termogram) a vpravo výsledné pole teplotní vodivosti, zpracované vyhodnocovacím počítačem s využitím Fourierovy transformace.



Obr. 3.18 Termogram (vlevo) a výsledné teplotní pole (vpravo)

Na Obr. 3.19 je znázorněno pracoviště pro aktivní infračervenou termografii. Toto pracoviště se skládá z měřeného vzorku, zdroje světla (blesková halogenová nebo LED lampa) se zdrojem a řídicí jednotkou světla, termokamery a řídicího a vyhodnocovacího počítače.



Obr. 3.19 Pracoviště pro aktivní IRNDT

Princip měření

Fyzikálním základem termografie je Plankův zákon tepelného záření, který popisuje spektrální šíření energetické svítivosti tělesa ($r(\lambda, T)$). Termokamera snímá infračervené záření z povrchu snímaného vzorku a toto záření transformuje na viditelný obraz. Přenos tepla radiací se nachází v teoretickém rozsahu vlnových délek $(0,75 - 1000) \mu m$, v praxi $(3 - 14) \mu m$. Termokamera teplotu povrchu neměří, ale na základě intenzity infračerveného záření teplotu vypočítává. Snímky pořízené termokamerou lze dále zpracovat v různých programech (Matlab, ThermoFit Pro). Při ohřevu vzorku se využívá Diakův impuls a Parkerovou metodou se vyhodnocuje pořízený termogram. Parkerovou metodou se zjišťuje teplotní vodivost (thermal diffusivity) a dle rovnice (3.32):

$$a = \frac{\lambda}{C \cdot \rho} \quad (3.32)$$

kde: a je teplotní vodivost [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$],
 λ - tepelná vodivost [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$],
 C - tepelná kapacita [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$],
 ρ - hustota [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$].

3.10 Shrnutí poznatků ze současného stavu řešené problematiky

Sendvičové konstrukce jsou materiálem, který vznikl na základě poznatků o přírodě. Jedná se o více jak 100 let starý materiál, který však ve stavbě pozemních dopravních prostředků nachází uplatnění až v současné době. Ve stavbě letadel se PSP používají již od 60-tých let, avšak podobně jako u pozemních dopravních prostředků, široké použití na primární letecké konstrukce nastalo až v současnosti.

Sendviče postupně nahrazují klasické materiály. Využívá se přitom výhodných vlastností sendvičů, z nichž nejvýznamnější je měrná hmotnost, která je několikrát nižší, jak u oceli. Sendviče jsou vždy minimálně třívrstvou konstrukcí, což na jedné straně způsobuje jejich výhodné vlastnosti, na druhé straně komplikuje jejich zkoumání jak při statických experimentech, tak zejména při únavových zkouškách. Proto také životnostní zkoušky PSP nejsou standardizovány a pořád probíhá výzkum jejich únavového chování. Z literatury je známo jen málo poznatků o únavovém chování PSP a ještě méně o únavovém chování insertů v sendvičových panelech.

Výsledky životnostních zkoušek PSP, stejně jako např. u kovů, musí být statisticky zpracovány. Použitá statistická metoda závisí na počtu vzorků, kdy u malých výběrů je nutno přistoupit k jiným metodám, než které používá klasická matematická statistika. Jednou z metod je Hornův postup. Hornův postup nepředpokládá následné statistické testování.

Výsledkem statistického zpracování vysokocyklového měkkého zatěžování je Wöhlerova křivka, známá již z únavy kovů. Pro predikci únavové životnosti lze využít i některých metod známých z problematiky predikce životnosti u kovů, ale s ohledem na zcela rozdílné vlastnosti PSP od kovů.

Problematika vad PSP vzniklých při cyklickém zatěžování je velmi obšírná a doposud není např. standardizované rozdělení vad. Příčiny vzniku vad lze hledat již v samotné výrobě v podobě nedodržení technologie výroby (lepení a lisování). Existuje velké množství metod, kterými lze vady v PKM a PSP identifikovat. Optimální metodou se jeví metoda aktivní infračervené termografie.

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. Na únavovou životnost má velký vliv dodržení výrobní technologie a zejména provedení a pevnost lepeného spoje potah - jádro. Dále bude zkoumána obecně platná hypotéza o velkém rozptylu naměřených dat (cyklů) na nízké hladině zatěžování, oproti rozptylu dat na vysoké hladině zatěžování.

Základem bude experimentální práce spočívající v životnostních zkouškách velmi jednoduchých konstrukcí z PSP o přibližně stejné statické únosnosti (pevnosti), ale předpokládané různé životnosti (viz inspirace) a konstrukcí s vložitelným insertem do sendvičových panelů se stejnou strukturou, jako vzorky bez insertu. 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.

Konečným výstupem pro technickou praxi bude doporučení pro používání levné metody pro zkoumání životnosti PSP, kdy navržená metoda umožní získat relevantní výsledky výzkumu založeném na malém počtu vzorků (malý výběr). Tyto výsledky pak mohou být zpřesněny jen např. na určité části Wöhlerovy

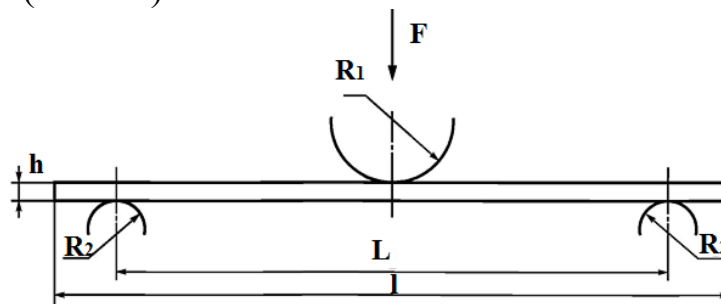
křivky s využitím standardních zkušebních cyklovacích strojů. Předpokládané praktické využití výsledků práce je v oblasti konstrukce pozemních dopravních prostředků, zejm. silničních a železničních vozidel.

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 dodrženy¹⁶. 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 $f_{B,i}$ (viz Tab. 7.1). Jedná se o lineární závislost, Obr. 7.1. Pro výpočet napětí ve vzorku při jeho porušení je v normách [103] a [104] uvedena rovnice (5.1), která však nerespektuje vrstvenou strukturu PSP. Pro výpočet napětí na jednotlivých hladinách byla použita rovnice (3.9) a zanedbán vliv smyku dle rovnice (3.10).

$$\sigma_{fb} = \frac{3 \cdot F_B \cdot L}{2 \cdot b \cdot h^2} \quad (5.1)$$

kde: σ_{fb} je napětí ve vzorku při jeho porušení [MPa],

F_B - velikost zatěžující síly při porušení vzorku [N],

L - vzdálenost podpěr zkušebního přípravku [mm],

b - šířka vzorku [mm],

h - výška vzorku [mm].

5.2 Únavová zkouška

Podle kapitoly 3 a s ohledem na možnosti testovacího stroje¹⁷ byl v této práci použit pro vzorky bez insertu koeficient nesouměrnosti $R = 0$ (míjivý ohyb) a vzorky byly prohýbány až na σ_{max} - horní napětí cyklu. Pro vzorky s insertem

¹⁶Nutno brát v úvahu poznatky z podkapitoly 3.2.

¹⁷Stroj má zatím omezené možnosti upnutí vzorku.

byl použit koeficient nesouměrnosti $R = 1$ (souměrně střídavý ohyb) a vzorky byly namáhány amplitudou danou v mm. Vzorky s jádrem z hliníkové slity a prepregovým potahem s výztuží (bAISV) ze skelných vláken byly cyklovány měkkým zatěžováním v hladinách dle tabulky Tab. 7. Ostatní materiálové kombinace byly zatěžovány na stejnou deformaci, jako byla u vzorků bAISV.

V [37] je doporučeno provádět únavovou zkoušku na minimálně třech hladinách napětí a odzkoušet na každé hladině minimálně pět vzorků. Na nízkých hladinách napětí lze očekávat velké množství cyklů, které může přesáhnout 10^7 cyklů (teoreticky nekonečný počet cyklů). Proto je nutno stanovit počet cyklů, při kterých dojde k ukončení zkoušky na nízké hladině. V odstavci 3.3.3 bylo uvedeno, že autoři článků ukončovali své experimenty kolem 10^6 cyklů. V této práci je zkouška vzorku ukončena při dosažení 10^6 cyklů. Stanoveny byly čtyři hladiny zatěžování A, B, C a D (Tab. 7.3) po čtyřech vzorcích na každé hladině.

5.3 Statistická analýza dat

Statistická analýza naměřených dat je provedena pomocí výpočetní techniky dle postupu v Tab. 5.1. Testování dat neprovedeno – kuriózní data.

Tab. 5.1 Postup zpracování dat

P.č.	Popis	Použitý SW
1	Zadání naměřených dat do SW.	QC.Expert ¹⁸
2	Zpracování dat SW – celková statistická analýza.	QC.Expert
3	Výběr potřebných dat pouze pro Hornovu analýzu malých výběrů pro další zpracování.	
4	Přenos vybraných dat dalšího SW.	Minitab
5	Zpracování dat do formy grafů – Wöhlerových křivek	Minitab
6	Interpretace výsledných dat	

5.4 Infračervená termografie

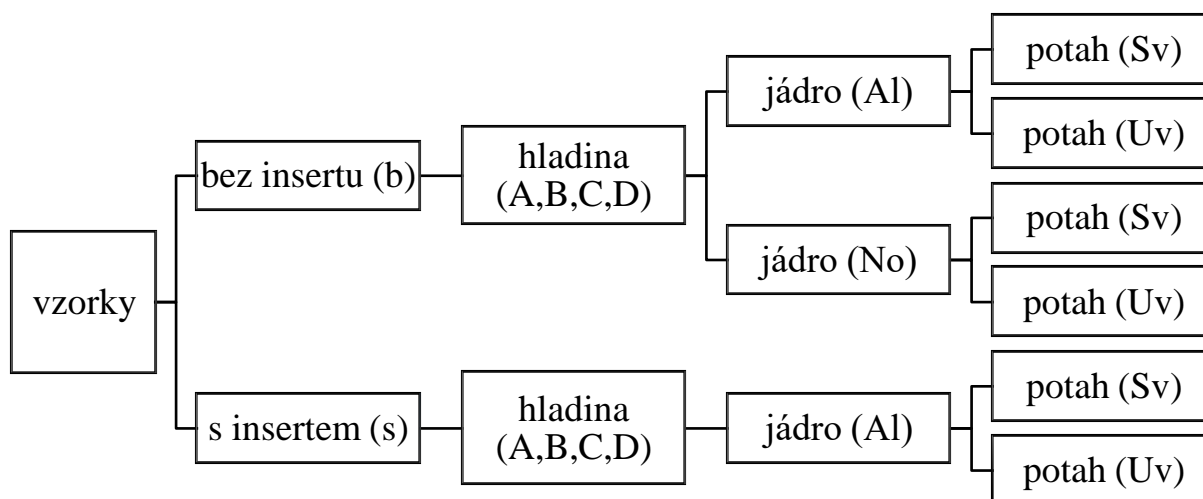
Použitá metoda pro aktivní infračervenou termografii je uvedena v odstavci 3.9.3. Při pasivní IRNDT byla simulována detekce vody v PSP. Voda byla do sendviče vpravena injekční jehlou přes připravené otvory. Byly zaplněny buňky do tvaru kříže. Následně byly vzorky umístěny do mrazícího boxu, kde voda zmrzla. Následující den ihned po vyjmutí vzorku bylo provedena pasivní IRNDT.

¹⁸QC.Expert je obchodní značka TriloByte Statistical Software, s.r.o., výrobce software pro statistickou analýzu

6. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

6.1 Použité materiály a výrobní technologie

Pro experimentální část této disertační práce bylo vyrobeno celkem 102 kusů vzorků z PSP. Z toho počtu bylo 5 vzorků pro statickou zkoušku tříbodovým ohybem¹⁹, 64 kusů bez insertu pro únavovou zkoušku a 32 kusů pro únavovou zkoušku s insertem. Pro orientaci v třídění vzorků slouží Obr. 6.1. Pro statickou i únavové zkoušky byly vyrobeny stejné vzorky.



Obr. 6.1 Rozdělení vzorků

Příklad označení vzorku: bAAISv - rozkódování vysvětluje Tab. 6.1.

Tab. 6.1 Kódování vzorků

Pozice			
1.	2.	3.	4.
B	A	Al	Sv
bez insertu	1. hladina (35%)	jádro z hliníkové slitiny	potah s výztuží ze skleněných vláken

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 kg.m^{-3} . Jmenovité rozměry: velikost buňky $6,4 \text{ mm}$ a výška buňky $7,0 \text{ mm}$ (skutečný rozměr $t_c = 6,6 \text{ mm}$).

¹⁹ Jeden vzorek pro statickou zkoušku na vytržení insertu

- 2) Pro jádro označené No byl použit nomex od firmy Schutz composites, obchodní označení: Cormaster C2-6,4-64. Hustota: 64 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 g.m^{-2} a vazba kepr 2/2. Podíl výztuže byl 59%.
- 2) Na potah označený Uv byl použit prepreg, obchodní označení: IMP503Z/GG204 T. Hustota uhlíkové tkaniny byla 204 g.m^{-2} a vazba kepr 2/2. Podíl výztuže 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 střihu (např. v hliníku, mosazi, termoplastech). Rozměr byl vnitřní závit: $4,0 \text{ mm}$, velký průměr $6,5 \text{ mm}$ a délka $8,0 \text{ mm}$, Obr. 6.2.



Obr. 6.2 Použitá závitová vložka²⁰ (insert)

6.1.4 Výroba vzorků

Rovinné lisování za tepla

Spojení prepregových vrstev s voštinou probíhalo u pilotních vzorků v etážovém lisu (Obr. 6.3). Lisování probíhalo při teplotě 120°C . Před lisováním probíhal náběh na teplotu v délce 1 hodiny. Po lisování probíhalo chladnutí na dílenskou teplotu, také v délce 1 hodiny. Separaci mezi deskami lisu a prepregem tvořil teplu odolný papír. Z velké vylisované desky byly na formátovací pile nařezány vzorky o rozměrech $l = 200 \text{ mm}$, $b = 45 \text{ mm}$ a $h = 9 \text{ mm}$. Nebylo dosaženo přijatelných výsledků²¹, proto byl použit školní laboratorní lis.

²⁰ Od dodavatele: Kipp, označení: K0978

²¹ Nedošlo k rovnoměrnému slepení potahu s jádrem po celé jeho ploše.



Obr. 6.3 Lis použitý při výrobě sendvičové desky pro výrobu pilotních vzorků

Pro výrobu vzorků určených pro tuto práci byl použit školní laboratorní vulkanizační lis (Obr. 6.4) s technickými parametry dle Tab. 6.2.



Obr. 6.4 Laboratorní vulkanizační lis

Tab. 6.2 Technické parametry laboratorního vulkanizačního lisu

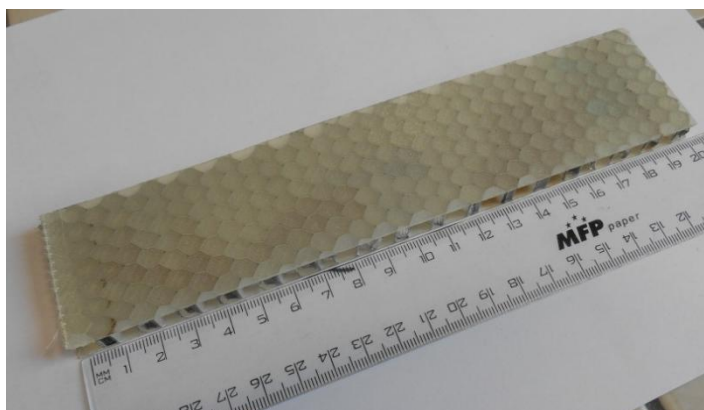
Rozměry desek [mm]	250 x 250
Příkon [W]	2400
Max. teplota [°C]	200
Svírací síla [t]	5

Před lisováním byly připraveny voštinové desky rozměru (210 x 210) mm. Prepreg vyjmutý z mrazicího boxu byl vytemperován na laboratorní teplotu a také nastříhán na rozměr (210 x 210) 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°C. Před lisováním neprobíhal náběh na pracovní teplotu. Po lisování probíhalo chladnutí vylisované sendvičové desky na laboratorní teplotu mimo lis, Obr.

6.5. Z vylisované sendvičové desky byly na kotoučové pile nařezány vzorky o rozměrech $l = 200 \text{ mm}$, $b = 45 \text{ mm}$ a $h = 7,6 \text{ mm}$ (Obr. 6.6). Tloušťka potahu ze skelného prepregu 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].



Obr. 6.5 Vylisovaná deska vyjmutá z laboratorního lisu (bAlUv)



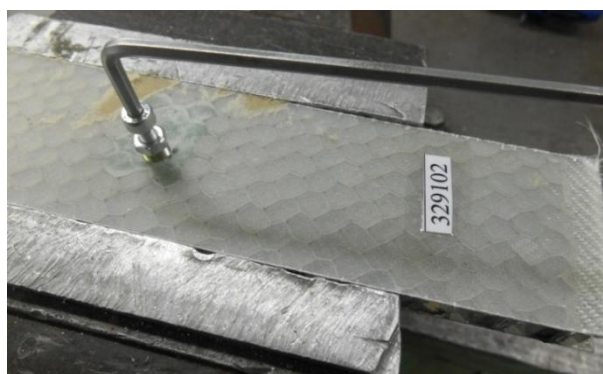
Obr. 6.6 Vzorek s jádrem z hliníkové slitiny a potahem ze skelnou výztuží

Výroba sendvičových panelů s inserty proběhla obdobně. Jen lisování bylo rozděleno na dva kroky z důvodu zalití zalévací hmoty, Obr. 6.7. 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 voštiny²², (Obr. 6.7). Inserty byly s pomocí šroubu ručně zařezány do připravených otvorů v zalévací hmotě (Obr. 6.8).

²² Nepravidelný tvar odstraněné části voštiny



Obr. 6.7 PSP bez jednoho potahu se zalitou zalévací hmotou (sAlUv)



Obr. 6.8 Montáž insertu (sAlUv)

6.2 Experimentální zařízení a vybavení

6.2.1 Statická zkouška třibodovým ohybem

Zkouška třibodovým ohybem byla provedena s využitím [102, 103 a 104]. 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

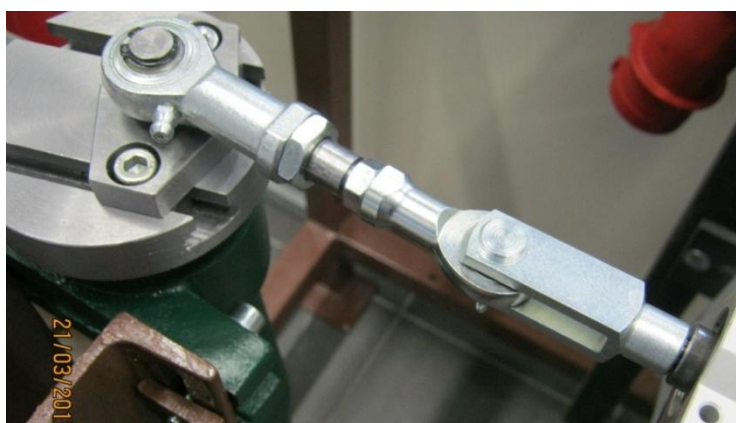
Únavová zkouška byla provedena na zkušebním zařízení vlastního konstrukčního návrhu a výroby²³ (Obr. 6.9). Jedná se klasický klikový mechanismus s pístnicí poháněný přes převody elektromotorem s říditelnými otáčkami. Zařízení je bez možnosti měření zatěžující síly $F_{max,i}$. Změnou polohy ojnice lze 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 užitečného vzoru ČR č. 31443.

²³ Bylo využito již nepoužívané zařízení původně určené pro jiný druh zkoušek.



Obr. 6.9 Zkušební zařízení pro únavovou zkoušku

Na Obr. 6.10 je detail klikové hřídele s regulačními prvky. Pro přesné nastavení se používá digitální číselníkový úchylkoměr, Obr. 6.11.



Obr. 6.10 Detail klikové hřídele s regulačními prvky



Obr. 6.11 Nastavení průhybu s pomocí číselníkového úchylkoměru

Napětí na hladinách bylo vypočteno dle rovnice (3.9). Zatěžující síly $F_{b,i}$ byly určeny jako procenta ze zatěžující síly při porušení vzorku u statické zkoušky „tříbodovým ohybem“ (F_B). Dle Tab. 7.3 to bylo 80%, 65%, 50% a 35% z aritmetického průměru síly $F_B = 891 \text{ N}$. Jedná se o lineární závislost, viz Obr. 7.1. Přes nemožnost řídit zatěžovací sílu, bylo použito měkkého zatěžování. Průběh zatěžování pro vzorky bez insertu pro každou hladinu byl cyklický, sinusový a míjivý (dolní napětí $\sigma_{min} = 0 \text{ MPa}$, koeficient nesouměrnosti cyklu $R = 0$) a pro vzorky s insertem cyklický, sinusový a střídavý (koeficient nesouměrnosti cyklu $R = -1$). Amplituda byla nastavována na uvedené hladiny změnou konfigurace zkušebního zařízení. Byla měřena doba do úplného porušení vzorku a následně vypočítán počet cyklů.

6.2.3 Experimentální zařízení a vybavení pro IRNDT

Veškeré experimenty s aktivní infračervenou termografií byly provedeny v rámci stáže v laboratoři prof. Vavilova na Tomské polytechnické univerzitě ve městě Tomsk v Ruské federaci. Bylo použito toto zařízení:

- termokamera FLIR model A300-series²⁴, výr. čís.: 48012357,
- osvětlení: profesionální halogenový blesk Hensel EH Pro 6000²⁵,
- zdroj (generátor): Hensel TRIA 6000S²⁶,
- vyhodnocovací SW: vlastní SW vytvořený na TPU²⁷.



Obr. 6.12 Termokamera Flir A300-series

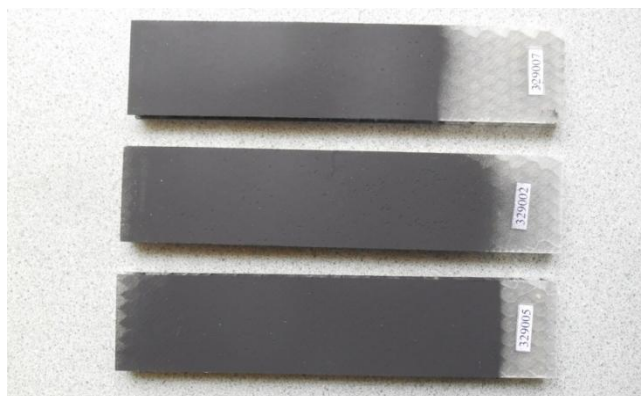
Vzorky byly s ohledem na emisivitu nastříkány černou barvou, Obr. 6.13. Celkové uspořádání pracoviště vychází z Obr. 3.19 a je na Obr. 6.14.

²⁴ http://www.flircameras.com/flir_a300_series

²⁵ <https://katalog.hensel.eu/en/blitzkopf-eh-pro-6000.html>

²⁶ <https://katalog.hensel.eu/en/blitzgenerator-tria-6000-s.html>

²⁷ Autor Nesteruk D.A., tpu.ru



Obr. 6.13 Vzorky pro aktivní infračervenou termografii²⁸



Obr. 6.14 Celkové uspořádání pracoviště pro aktivní IRNDT

S použitím kamery Fluke TiS45²⁹ (Obr. 6.15) byla provedena jednoduchá zkouška pasivní IRNDT.



Obr. 6.15 Termokamera Fluke TiS45³⁰

²⁸ Použity z pilotní série vzorků

²⁹ Vlastnictví kamery: ÚVI

³⁰ www.aabtools.com

7. VÝSLEDKY

V průběhu experimentů byly získány následující výsledky měření. Do těchto výsledků jsou částečně zahrnuty i výsledky pilotních měření.

7.1 Výsledky statické zkoušky tříbodovým ohybem

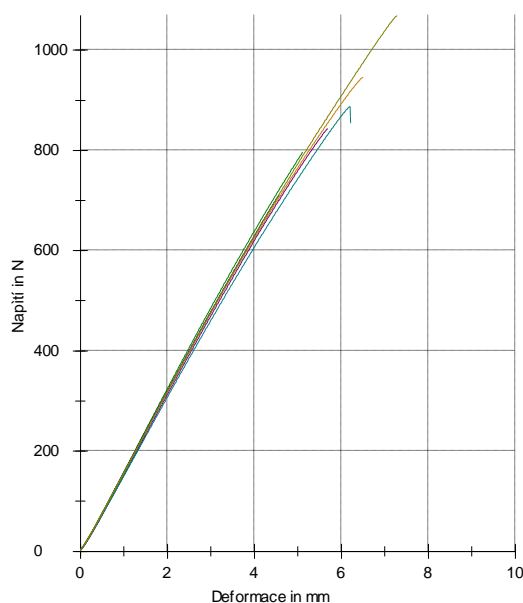
7.1.1 Vzorky bezinsertu

Výsledky statické zkoušky „tříbodovým ohybem“ pěti vzorků (bAlSv) jsou uvedeny v Tab. 7.1. Směrodatná odchylka splňuje Sillenovo pravidlo (odhad parametru by měl být větší než trojnásobek jeho směrodatné odchylky).

Tab. 7.1 Výsledky statické zkoušky tříbodovým ohybem

	Číslo vzorku					Aritmetický průměr \bar{x} [-]	Směrodatná odchylka s [-]
	1	2	3	4	5		
Síla při porušení $F_{B,i}$ [N]	712	946	843	887	1068	891	117,2
Průhyb při porušení $f_{B,i}$ [mm]	4,6	6,5	5,7	6,2	7,3	6,1	0,9
Napětí při porušení σ_{FB} [MPa]	Vypočteno dle rovnice (3.9):					269	

Na Obr. 7.1 je graf závislosti síly $F_{B,i}$ [N] na průhybu $f_{B,i}$ [mm]. Závislost je vzata jako lineární.



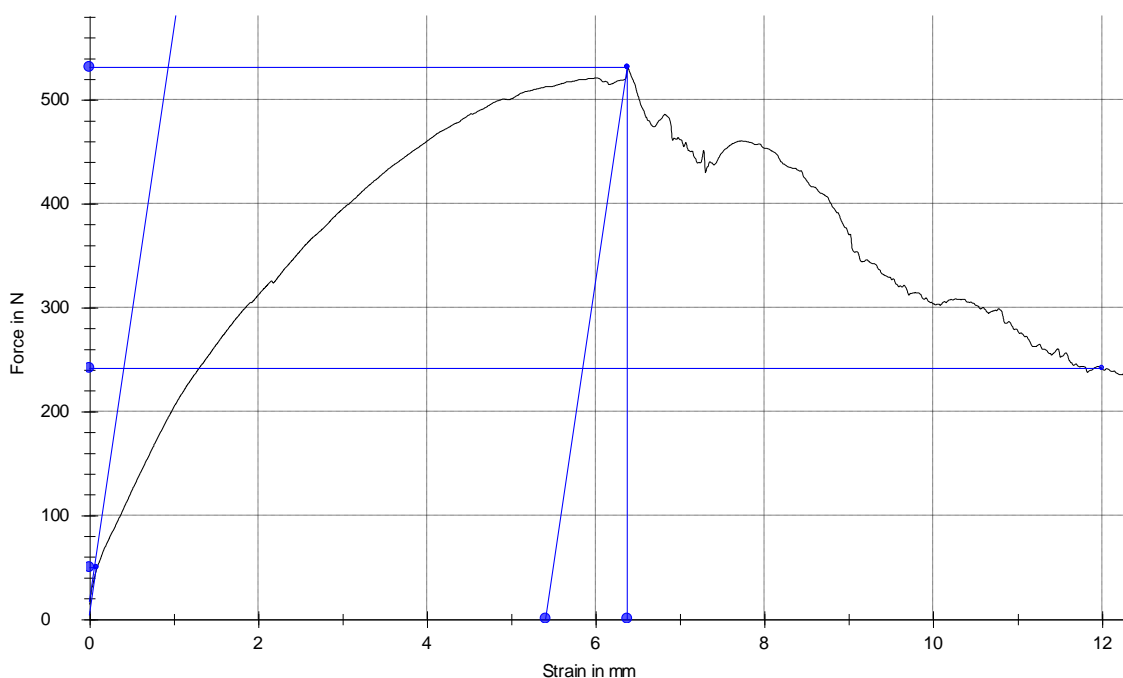
Obr. 7.1 Diagram statické zkoušky tříbodovým ohybem nosníku bez insertu

7.1.2 Vzorky s insertem – vytržení insertu

Při statické zkoušce na vytržení insertu byl použit jeden vzorek. Došlo k porušení sendviče, vlastní insert nebyl vytržen. Naměřené hodnoty jsou v Tab. 7.2, pracovní diagram statické zkoušky na vytržení insertu je na Obr. 7.2.

Tab. 7.2 Naměřené hodnoty při statické zkoušce vytržení insertu

Síla při porušení $F_{B,i}$ [N]	531
Průhyb při porušení $f_{B,i}$ [mm]	6,4



Obr. 7.2 Diagram statické zkoušky tříbodovým ohybem nosníku s insertem

7.2 Výsledky únavových zkoušek

7.2.1 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 (3.9). Tyto hladiny jsou uvedeny v Tab. 7.3. Síly $F_{max,i}$ [N] byly vypočítány jako procenta z 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. 7.5) a dle odstavce 3.6.2 počítačem vypočtené statistické charakteristiky jsou v Tab. 7.6.

Tab. 7.3 Stanovení zatěžovacích hladin

Označení hladiny	% z $F_{B,i}$ [%]	Síla $F_{max,i}$ [N]	Průhyb $f_{max,i}$ [mm]	Horní napětí $\sigma_{max,i}$ [MPa]	Amplituda napětí $\sigma_{a,i}$ [MPa]
A	35	312	2,1	94	47
B	50	446	3,0	134	67
C	65	579	4,0	175	88
D	80	713	4,9	215	108

V Tab. 7.4 jsou uvedeny některé výsledky pilotních únavových zkoušek statisticky zpracovaných dle odstavce 3.6.1. Tyto výsledky jsou uvedeny jen pro dokumentování nevhodnosti zpracování malého výběru dle metody z odstavce 3.6.1. Viz rozdíly mezi hodnotami nejkratší životnosti (např. 106 cyklů) a dolní mezí únavové životnosti (např. 46 cyklů); z tohoto přibližně 50 % rozdílu plyne, že byl použit malý počet vzorků pro to, aby výsledky zkoušek mohly být zpracovány dle příslušné normy [106].

Tab. 7.4 Pilotní výsledky únavové zkoušky a statistické charakteristiky

	Hladina č.1 $\sigma_{max,1} =$ 201 [MPa]	Hladina č. 2 $\sigma_{max,2} =$ 148 [MPa]	Hladina č.3 $\sigma_{max,3} =$ 121 [MPa]
	Počty naměřených cyklů N_i [-]		
Počty naměřených cyklů N_i [-]	158	32712	1055090
	197	28274	1418403
	283	31082	1453173
	116	26708	1036366
	189	34429	923536
Aritmetický průměr počtu naměřených cyklů \bar{x} [-]	189	30642	1177314
Medián naměř. cyklů \tilde{x} [-]	189	31082	1055090
Medián životnosti $\hat{N}_{(10)}$ [-]	181	30509	1157910
Nejkratší životnost \hat{N}_0 [-]	106	25704	829688
Dolní mez únavové životnosti $\hat{x}_{(10)}$ [-]	46	19702	494196

Tab. 7.5 Naměřené počty cyklů u vzorků bez insertů

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

Tab. 7.6 Statistické zpracování dat z QC. Expertu

	bAAISv (35%)	bAAIUv (35%)	bBAISv (50%)	bBAIUv (50%)	bCAISv (65%)	bCAIUv (65%)	bDAISv (80%)	bDAIUv (80%)
Střední hodnota	854460	1006740	71910	1979,5	4610,5	95,5	1598,5	18
Spodní mez (5%)	676038,6	997349,4	48433,5	1040,995	1333,225	35,005	612,265	14,67
Horní mez (95%)	1032881,4	1016130,6	95386,5	2918,005	7887,775	155,995	2584,735	21,33
Spodní mez (2.5%)	617207,76	994253,04	40692,6	731,542	252,61	15,058	287,074	13,572
Horní mez (97.5%)	1091712,24	1019226,96	103127,4	3227,458	8968,39	175,942	2909,926	22,428
Pivotové rozpětí	321480	16920	42300	1691	5905	109	1777	6
	bANoSv (35%)	bANoUv (35%)	bBNoSv (50%)	bBNoUv (50%)	bCNoSv (65%)	bCNoUv (65%)	bDNoSv (80%)	bDNoUv (80%)
Střední hodnota	782550	420989	29609,5	64854	426	2032	278	65
Spodní mez (5%)	524308,5	310534,01	9269,305	61717,14	216,21	1282,75	242,48	56,12
Horní mez (95%)	1040791,5	531443,99	49949,695	67990,86	635,79	2781,25	313,52	73,88
Spodní mez (2.5%)	439158,6	274113,716	2562,538	60682,824	147,036	1035,7	230,768	53,192
Horní mez (97.5%)	1125941,4	567864,284	56656,462	69025,176	704,964	3028,3	325,232	76,808
Pivotové rozpětí	465300	199018	36649	5652	378	1350	64	16

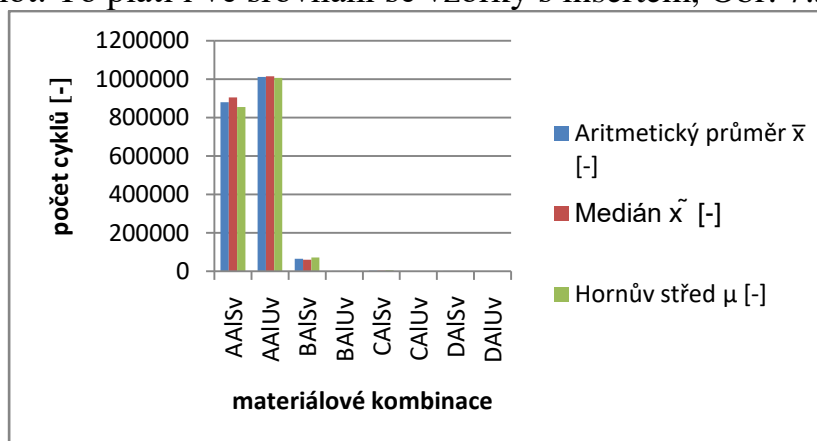
Na základě čtyř hodnot pro každou hladinu je dle Hornova postupu bylo zjištěno, že pro hladinu A (35%, bAAISv) neznámá střední hodnota μ , jejíž odhad byl určen na 854460 cyklů s pravděpodobností $1 - \alpha = 0,90$ leží v intervalu (676039 – 1032881) cyklů nebo s pravděpodobností $1 - \alpha = 0,95$ leží v intervalu (617208 – 1091712) cyklů. Dále bylo určeno pivotové rozpětí na hodnotu 321480 cyklů. Pravděpodobnost $1 - \alpha = 0,95$ pro vzorky bez insertu není v této práci zpracována. Pro hladiny B, C a D podobně.

Porovnání statistických hodnot je v Tab. 7.7.

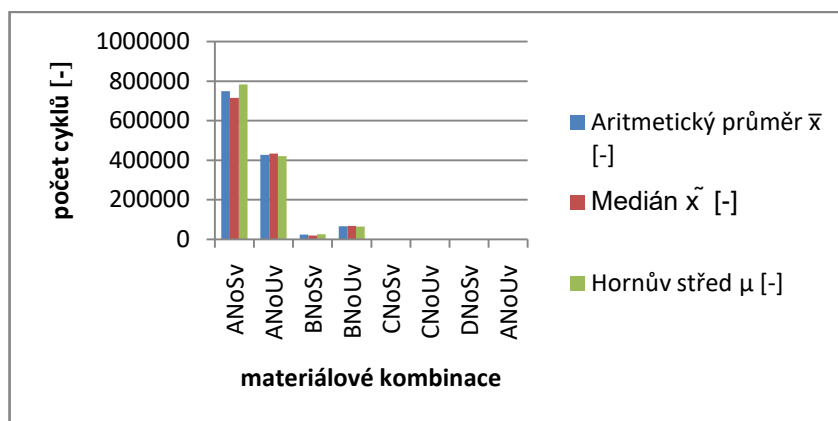
Tab. 7.7 Porovnání statistických hodnot z naměřených počtů cyklů

Jádro		Al		No	
Potah		Sv	Uv	Sv	Uv
A (35%)	Aritmetický průměr \bar{x} [-]	879840	1010970	748710	427532
	Medián \tilde{x} [-]	905220	1015200	714870	434074
	Hornův střed μ [-]	854460	1006740	782550	420989
B (50%)	Aritmetický průměr \bar{x} [-]	65565	1975	24251	66124
	Medián \tilde{x} [-]	59220	1971	18894	67394
	Hornův střed μ [-]	71910	1980	29610	64854
C (65%)	Aritmetický průměr \bar{x} [-]	4035	92	427	1837
	Medián \tilde{x} [-]	3460	88	428	1641
	Hornův střed μ [-]	4611	96	426	2032
D (80%)	Aritmetický průměr \bar{x} [-]	1390	17	293	65
	Medián \tilde{x} [-]	1181	17	308	66
	Hornův střed μ [-]	1599	18	278	65

Grafické porovnání statistických hodnot z naměřených počtů cyklů u vzorků s jádrem z hliníkové slitiny je na Obr. 7.3. Grafické porovnání statistických hodnot z naměřených počtů cyklů u vzorků s nomexovým jádrem je na Obr. 7.4. Z uvedeného porovnání vyplývá, že neexistuje pravidelnost v uspořádání statistických hodnot. To platí i ve srovnání se vzorky s insertem, Obr. 7.5.



Obr. 7.3 Grafické porovnání statistických hodnot u vzorků s Al jádrem



Obr. 7.4 Grafické porovnání statistických hodnot u vzorků s No jádrem

7.2.2 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. 7.8. Podle popisu zkušebního zařízení z odstavce 6.2.2 byly změřeny počty cyklů N_i (Tab. 7.8) a dle odstavce 3.6.2 počítačem vypočtené statistické charakteristiky jsou v Tab. 7.9.

Tab. 7.8 Naměřené počty cyklů u vzorků s inserty

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

Tab. 7.9 Statistické zpracování dat z QC. Expertu

	sAAISv (35%)	sAAIUv (35%)	sBAISv (50%)	sBAIUv (50%)	sCAISv (65%)	sCAIUv (65%)	sDAISv (80%)	sDAIUv (80%)
Střední hodnota	6467,5	3806,5	4078	3358	1686	2401,5	180,5	51
Spodní mez (5%)	4922,935	3017,845	2987,98	2709,76	815,76	2245,545	100,025	25,47
Horní mez (95%)	8012,065	4595,155	5168,02	4006,24	2556,24	2557,455	260,975	76,53
Spodní mez (2,5%)	4413,646	2757,802	2628,568	2496,016	528,816	2194,122	73,49	17,052
Horní mez (97,5%)	8521,354	4855,198	5527,432	4219,984	2843,184	2608,878	287,51	84,948
Pivotové rozpětí	2783	1421	1964	1168	1568	281	145	46

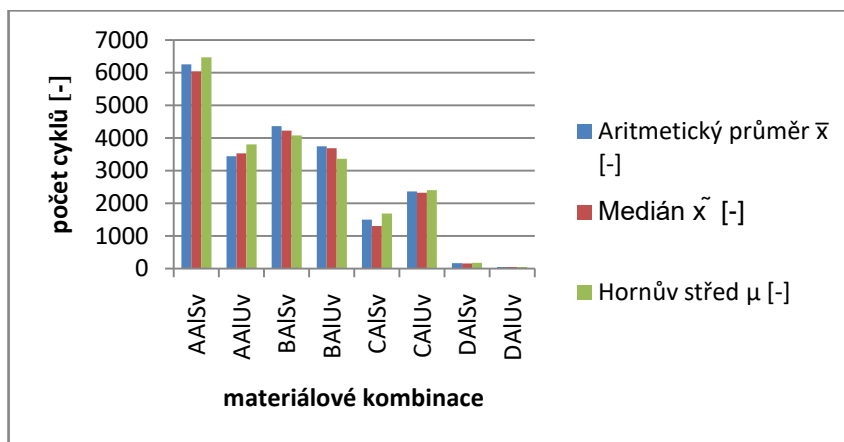
Na základě čtyř hodnot pro každou hladinu je dle Hornova postupu bylo zjištěno, že pro hladinu A (35%, sAAISv) neznámá střední hodnota μ , jejíž odhad byl určen na 6468 cyklů s pravděpodobností $1 - \alpha = 0,9$ leží v intervalu (4923 – 8014) cyklů nebo s pravděpodobností $1 - \alpha = 0,95$ leží v intervalu (4414 – 8521) cyklů. Dále bylo určeno pivotové rozpětí na hodnotu 2783 cyklů. Pro hladiny B, C a D podobně.

Porovnání statistických hodnot je v Tab. 7.10.

Tab. 7.10 Porovnání statistických hodnot z naměřených počtů cyklů

Potah		SV	Uv
A (a =1,8 mm)	Aritmetický průměr \bar{x} [-]	6251	3443
	Medián \tilde{x} [-]	6035	3528
	Hornův střed μ [-]	6468	3807
B (a =2,5 mm)	Aritmetický průměr \bar{x} [-]	4366	3744
	Medián \tilde{x} [-]	4222	3682
	Hornův střed μ [-]	4078	3358
C (a = 3,0 mm)	Aritmetický průměr \bar{x} [-]	1497	2365
	Medián \tilde{x} [-]	1307	2328
	Hornův střed μ [-]	1686	2402
D (a = 3,4 mm)	Aritmetický průměr \bar{x} [-]	166	51
	Medián \tilde{x} [-]	152	50
	Hornův střed μ [-]	181	51

Grafické porovnání statistických hodnot z naměřených počtů cyklů je na Obr. 7.5. Z uvedeného porovnání vyplývá, že neexistuje pravidelnost v uspořádání statistických hodnot. To platí i ve srovnání se vzorky bez insertu Obr. 7.3 a Obr. 7.4.



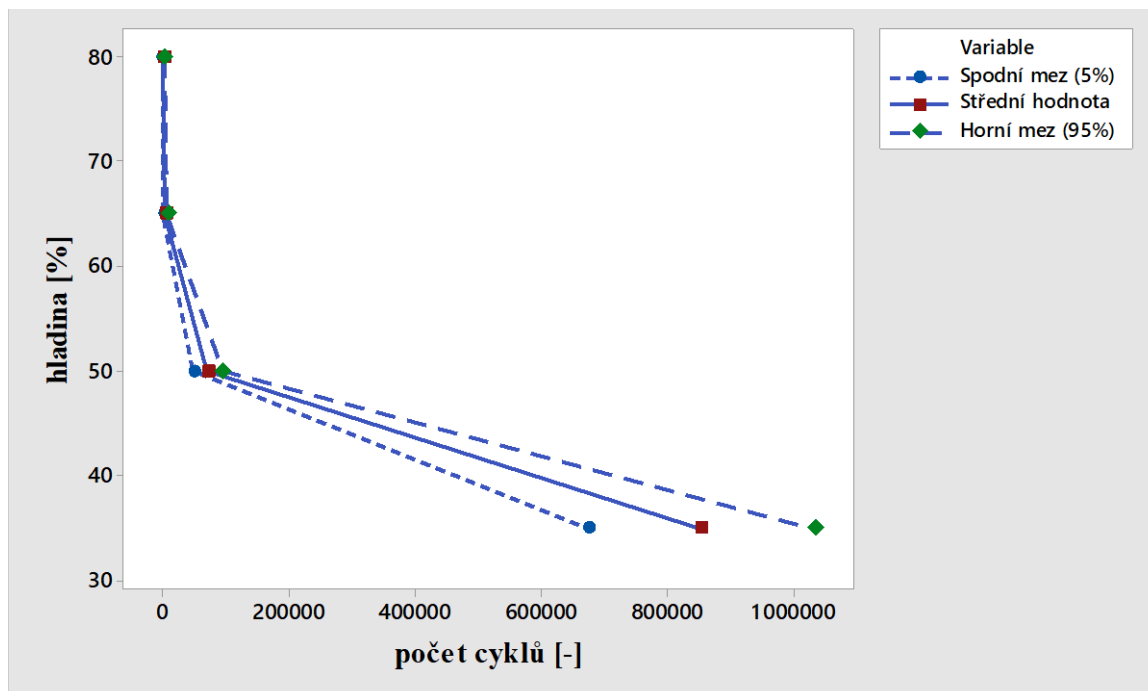
Obr. 7.5 Grafické porovnání statistických hodnot (s insertem)

7.3 S-N (Wöhlerovy) křivky

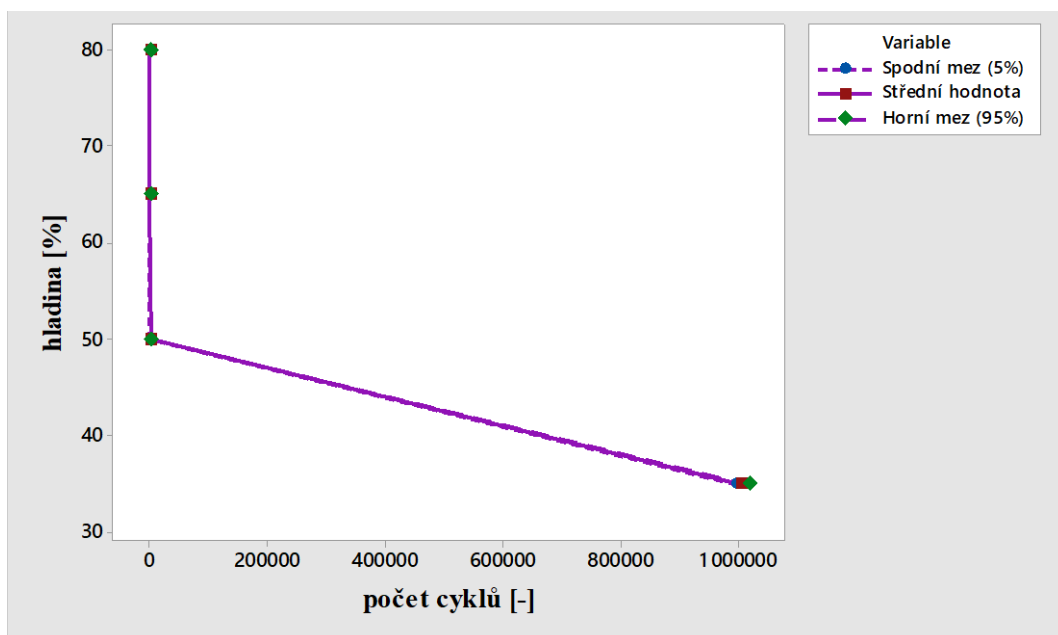
Na následujících obrázcích (Obr. 7.6 – Obr. 7.15) jsou znázorněny Wöhlerovy křivky. Jedná se o spojnice jednotlivých bodů – naměřených hodnot z Tab. 7.6 (vzorky bez insertu) a Tab. 7.9 (vzorky s insertem).

7.3.1 Vzorky bez insertu

Jádro z hliníkové slitiny:

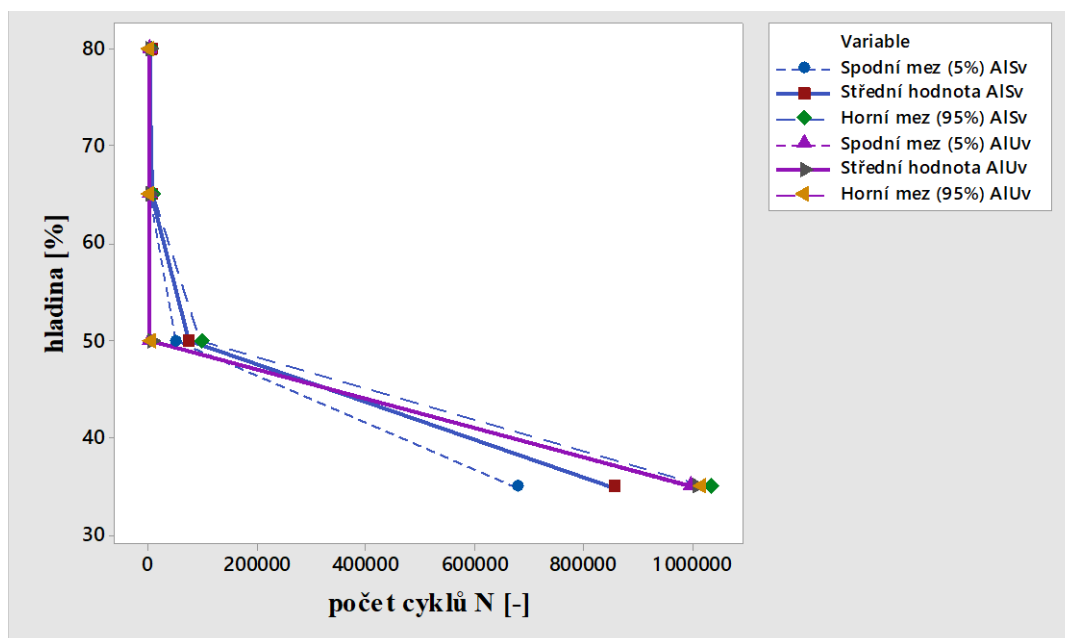


Obr. 7.6 Wöhlerova křivka bAISv



Obr. 7.7 Wöhlerova křivka bAlUv

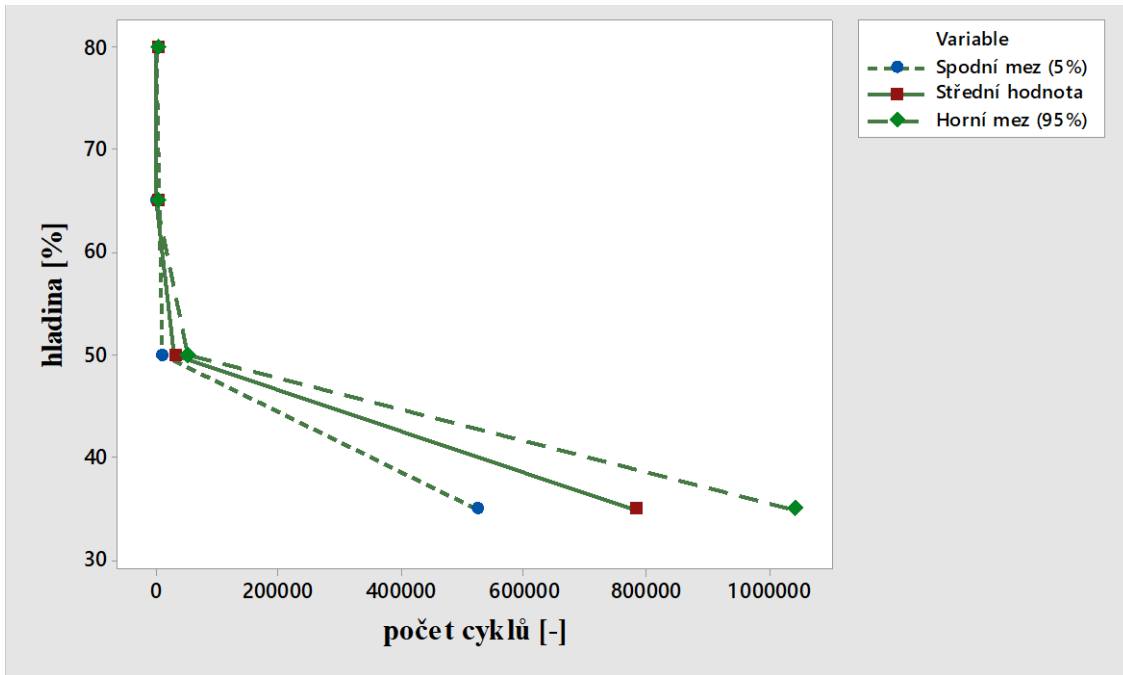
Na Obr. 7.8 jsou pro porovnání sloučeny obě předchozí Wöhlerovy křivky do jednoho obrázku. Z Obr. 7.8 je patrné, že všechny hodnoty počtu cyklů pro materiálovou kombinaci AlUv na hladině B (50 %) jsou nižší, než hodnoty pro kombinaci bAlSv. Pro hladinu A (35 %) a kombinaci AlUv je dolní mez počtu cyklů (997349) nižší, než horní mez počtu cyklů (1032881) pro kombinaci AlSv³¹.



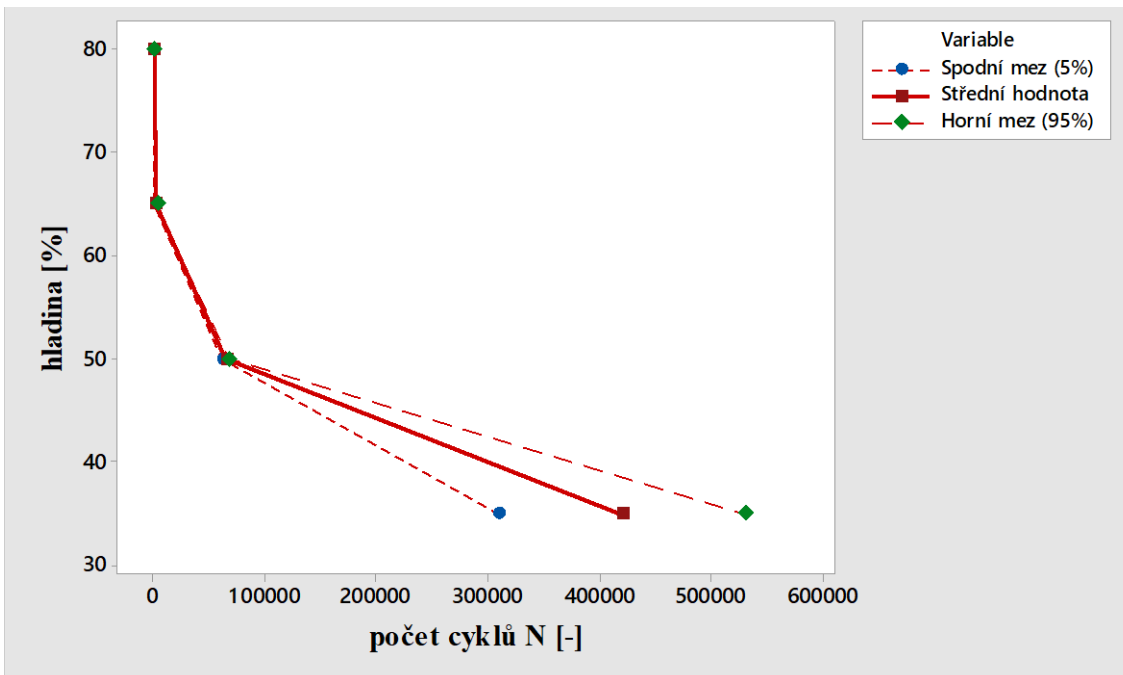
Obr. 7.8 Wöhlerovy křivky bAlSv+bAlUv

³¹Z hlediska statistického – významnosti rozdílu naměřených hodnot, se jedná se o zanedbatelné překrytí.

Jádro z nomexu:



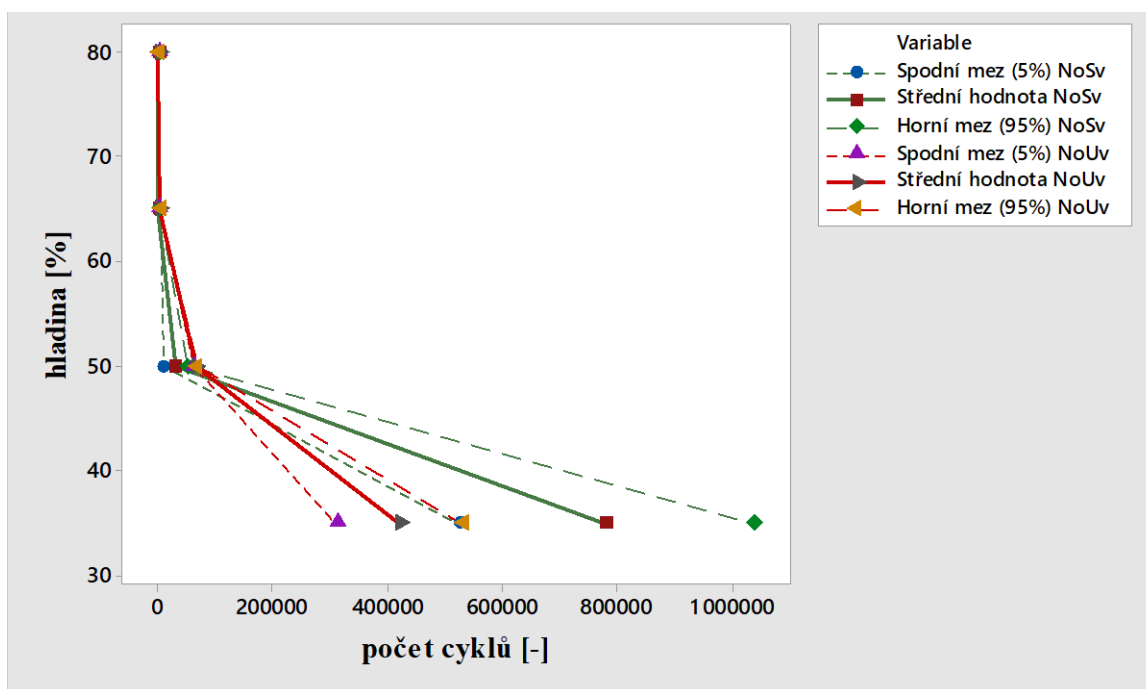
Obr. 7.9 Wöhlerova křivka bNoSv



Obr. 7.10 Wöhlerova křivka bNoUv

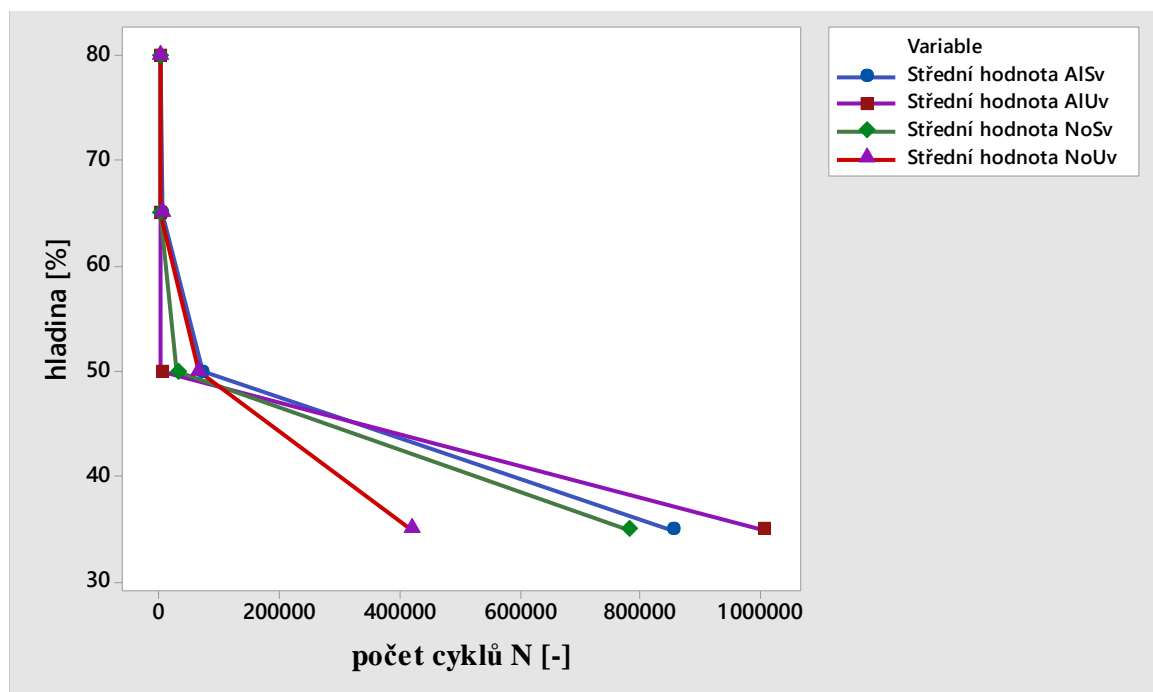
Na Obr. 7.11 jsou pro porovnání sloučeny obě předchozí Wöhlerovy křivky do jednoho obrázku. Z Obr. 7.11 je patrné, že všechny hodnoty počtu cyklů pro materiálovou kombinaci NoUv na hladině B (50 %) jsou nižší, než hodnoty pro kombinaci bAlSv. Pro hladinu A (35 %) a kombinaci NoSv je dolní mez počtu

cyklů (524309) nižší, než horní mez počtu cyklů (531444) pro kombinaci NoUv³².



Obr. 7.11 Wöhlerova křivka bNoSv+bNoUv

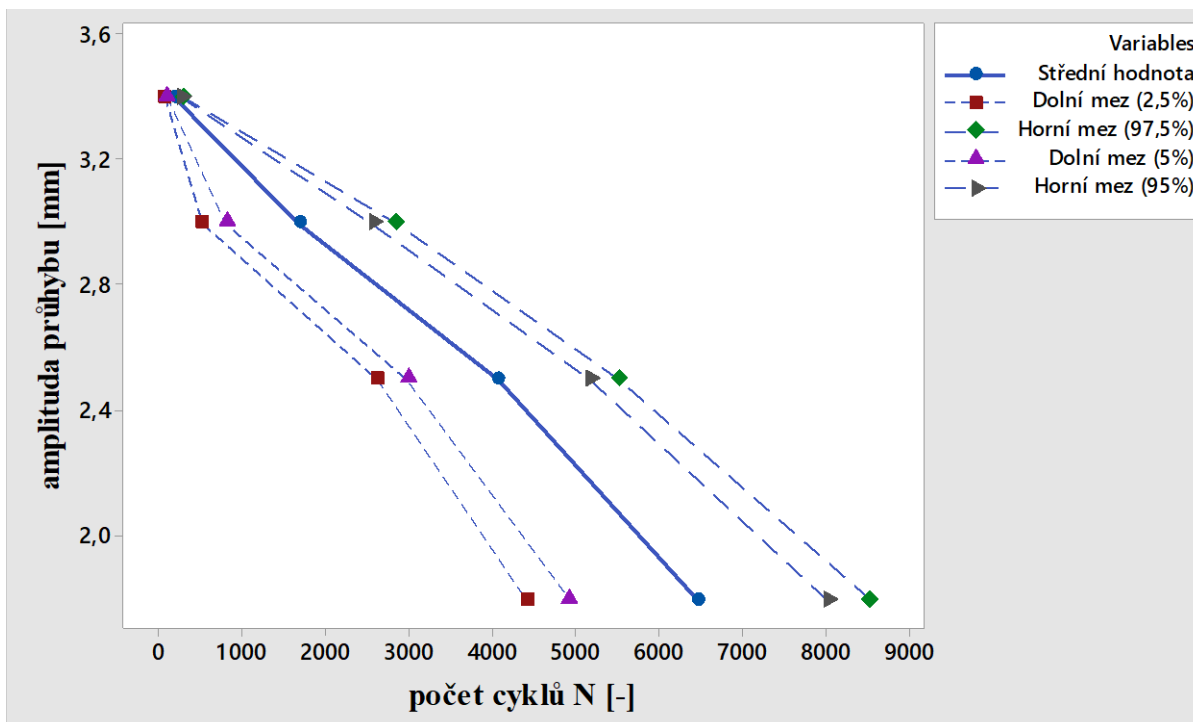
Na Obr. 7.12 jsou pro porovnání zobrazeny Hornovy střední hodnoty všech materiálových kombinací. Pro zjednodušení nejsou uvedeny meze.



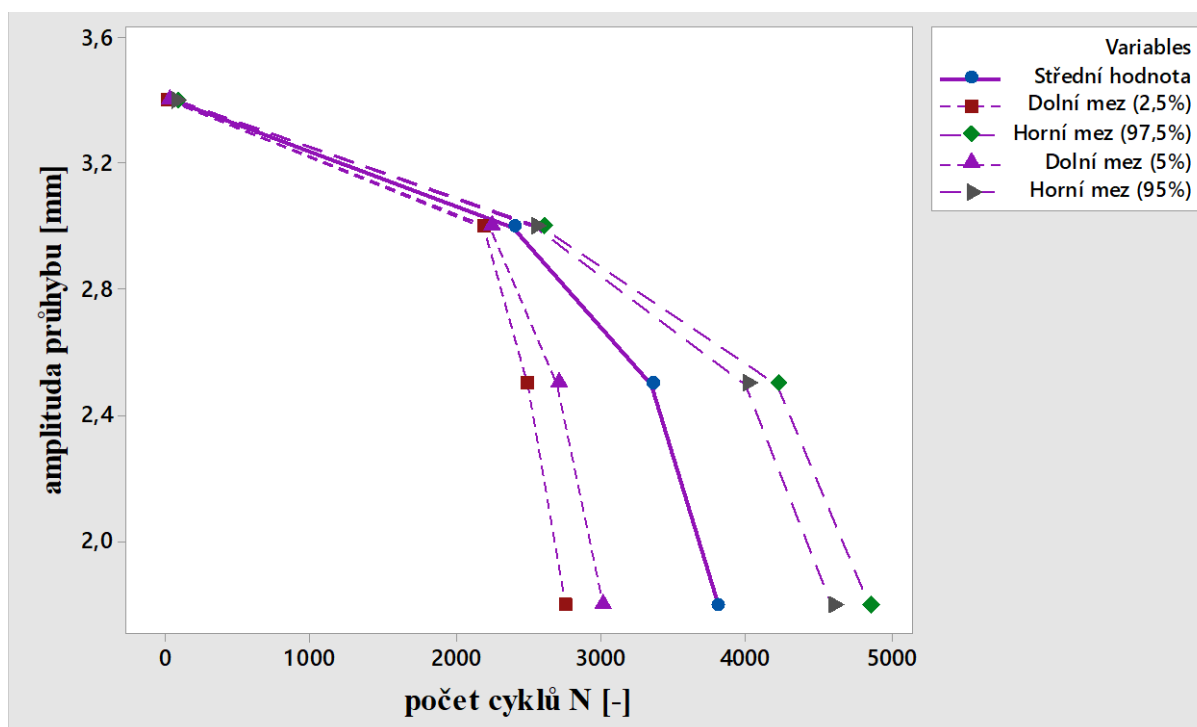
Obr. 7.12 Porovnání Hornových středních hodnot všech vzorků bez insertu

³² Platí poznámka pod čarou číslo 29. Zde jsou materiálové kombinace zaměněné.

7.3.2 Vzorky s insertem

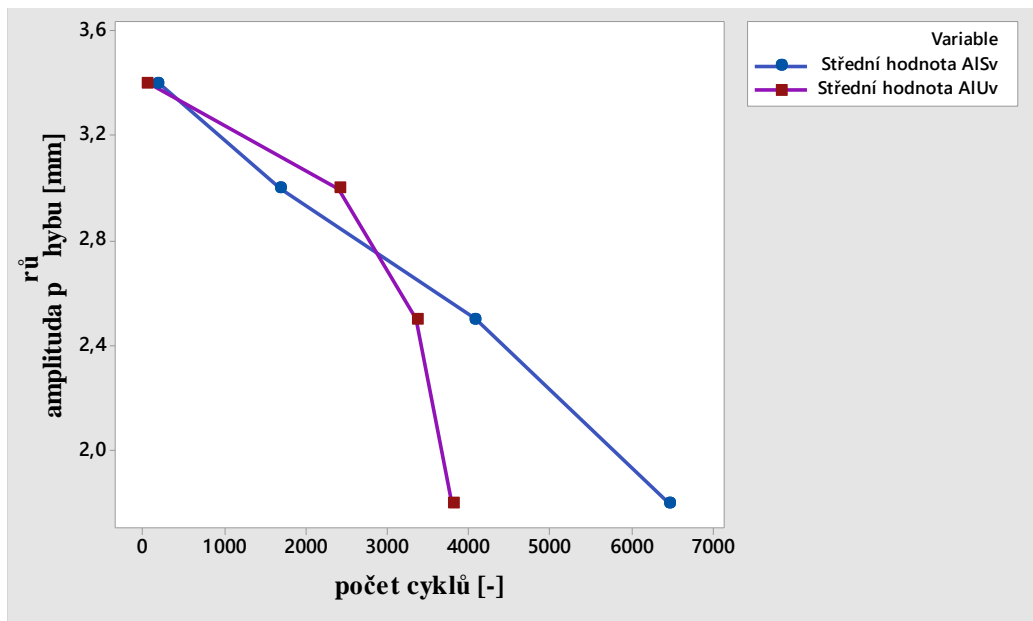


Obr. 7.13 Wöhlerova křivka sAlSv



Obr. 7.14 Wöhlerova křivka sAlUv

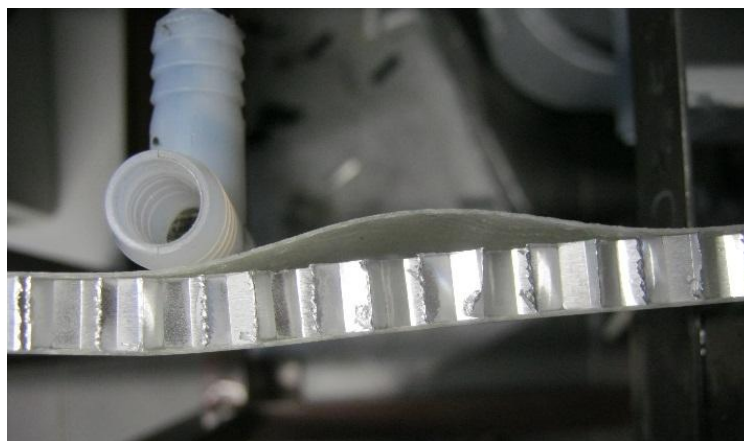
Na Obr. 7.15 jsou pro porovnání zobrazeny Hornovy střední hodnoty obou materiálových kombinací. Pro zjednodušení nejsou uvedeny meze.



Obr. 7.15 Porovnání Hornových středních hodnot vzorků s insertem sAl-Sv+sAlUv

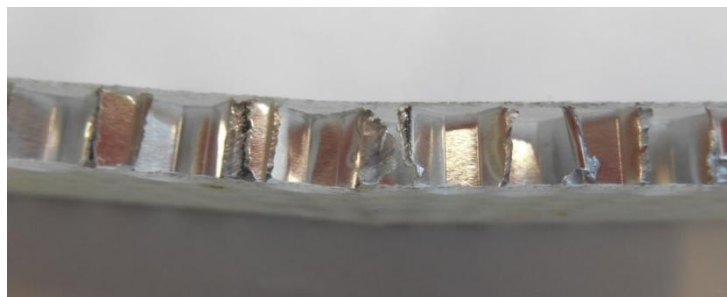
7.4 Poškození nosníků z PSP po únavových zkouškách

7.4.1 Poškození pilotních vzorků



Obr. 7.16 Pilotní vzorek - odlepený potah od jádra (bAlSv)

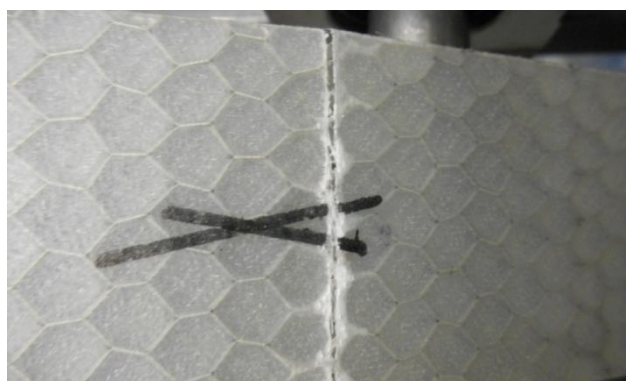
7.4.2 Vzorky bez insertu



Obr. 7.17 Trvalé prohnutí vzorku (bAlSv)



Obr. 7.18 Prasklina potahu po hranicích voštinových buněk (bAlSv)



Obr. 7.19 Přímá prasklina potahu (bAlSv)-(93% vzorků)

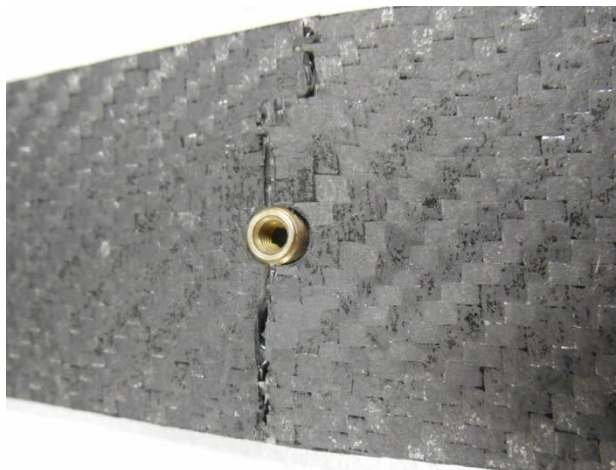


Obr. 7.20 Roztřepená, zdvojená prasklina (bNoSv)

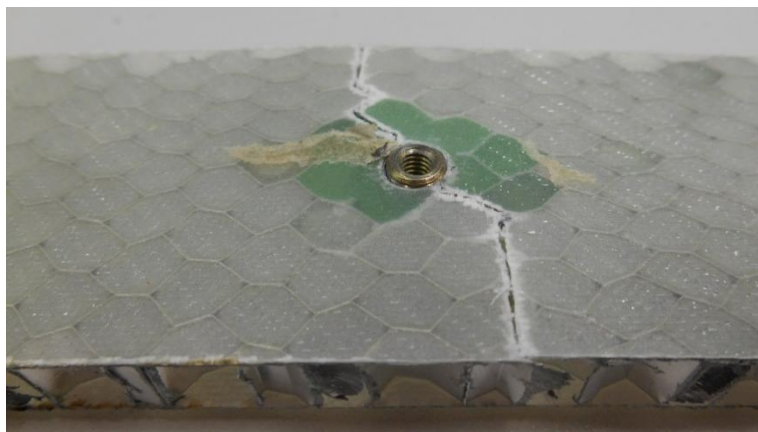


Obr. 7.21 Dlouhá prasklina jádra (smyk jádra), z počátku rovnoběžná s potahem (bNoUv)

7.4.3 Vzorky s insertem



Obr. 7.22 Prasklina potahu tečující insert (sAlUv)



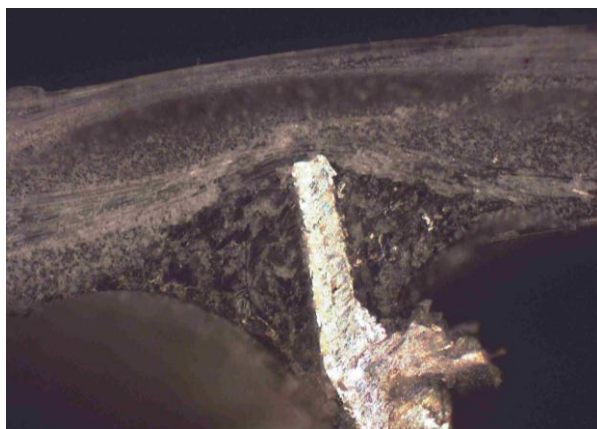
Obr. 7.23 Zalomená prasklina jdoucí „středem“ insertu (sAlSv)-(58% vzorků)



Obr. 7.24 Rozsáhlá deformace jádra a odlepení obou potahů (sAlSv)-(14% vzorků)

7.4.4 Spoj voština – potah

Na Obr. 7.25 je makrosnímek spoje stěny voštiny s potahem pořízený na mikroskopu Laica DMI 3000 m se zvětšením 50x. Jedná se o správně provedený lepený spoj voština potah.

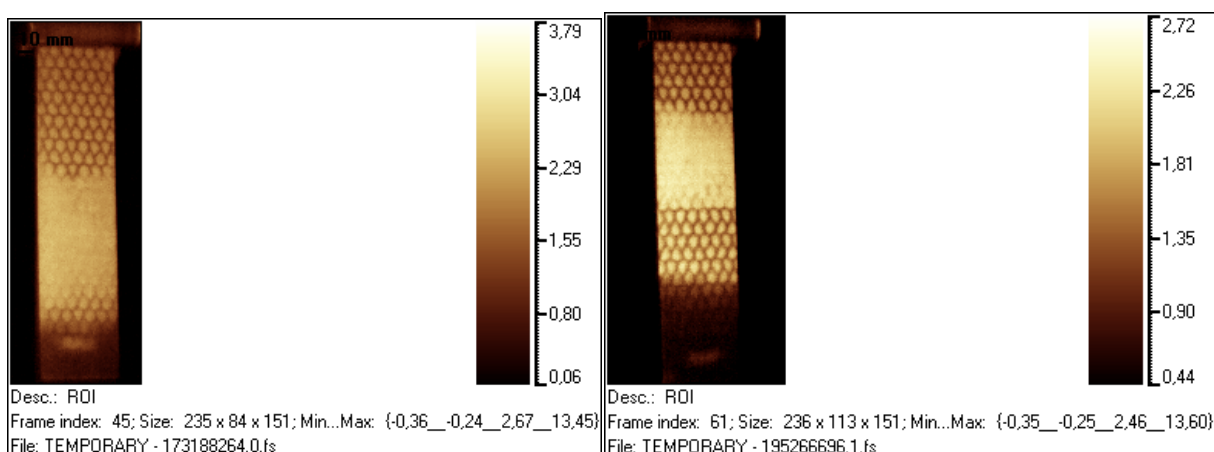


Obr. 7.25 Detail spoje stěny jádra a potahu a vyzlínaného lepidla (bAlUv), zvětšení 50x

7.5 IRNDT

7.5.1 Aktivní IRNDT

Pro aktivní IRNDT byly využity pilotní vzorky. Na Obr. 7.26 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.

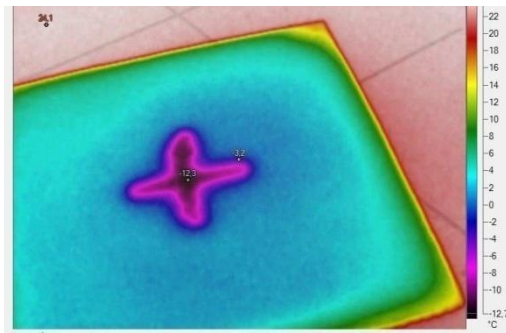


Obr. 7.26 Pilotní vzorky testované aktivní IRNDT

7.5.2 Pasivní IRNDT

Pro pasivní IRNDT byly využity vzorky z jiné práce³³. Na Obr. 7.27 voštinový sendvičový panelu kterého je detekována přítomnost vody (ledu), která je v buňkách rozmístěna do tvaru kříže.

³³ *Bakalářská práce vedená autorem této disertační práce.*



Obr. 7.27 Sendvičový panel se zmrzlou vodou ve voštinovém jádře³⁴

7.6 Rozbor výsledků experimentů

U pilotních vzorků (Tab. 7.4) vyplývá, 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). Z tab. 7.4 vyplývá, že 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 odstavce 3.6.1 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].

7.6.1 Vzorky bez insertu

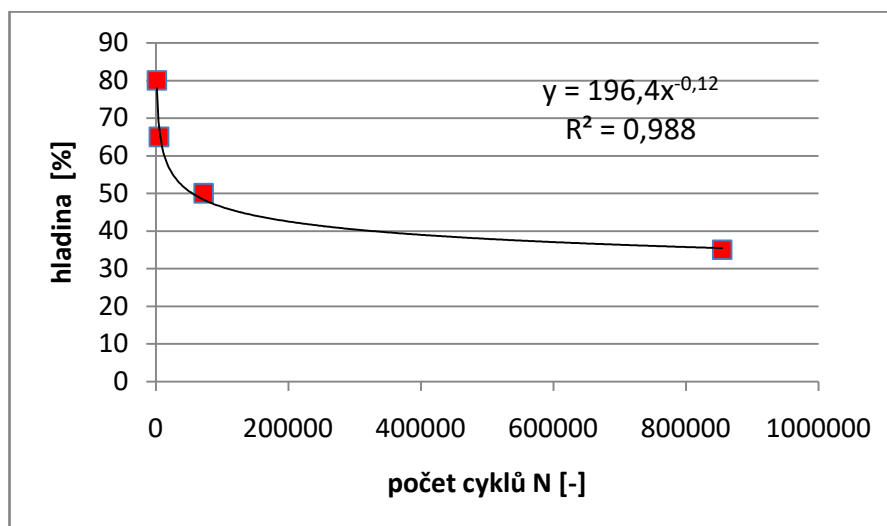
Tvar Wöhlerových křivek je u všech materiálových variant přibližně stejný. Jedná se o interpolační lomené (úsečkové) křivky. U všech křivek dochází na 50% hladině k prudkému zlomu. U všech křivek se zvětšuje rozdíl mezi horní a dolní mezí se snižující se hladinou zatížení. Tím se potvrzuje obecně platná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

Na Obr. 7.28 je upravená spojitá aproximační Wöhlerova křivka křivky z Obr. 7.6, která vznikla spojením Hornových středních hodnot a jednotlivých hladin napětí³⁵. 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):

³⁴ Rozměr vzorku 200 x 200 mm

³⁵ Reprezentativní S-N křivka zřejmě nejvhodnější materiálové varianty

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



Obr. 7.28 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 - AlUv (1006740³⁶)
2. Jádru z hliníkové slitiny s prepregovým potahem s výztuží ze skelných vláken - AlSv (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)

Z celkového pohledu na S-N křivky se však jeví nejvýhodnější varianta AlSv, Obr. 7.28 (ev. varianta NoSv).

7.6.2 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

³⁶ V závorce je uvedena Hornova střední hodnota pro hladinu A (35 %).

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.

7.6.3 Poškození vzorků po únavových zkouškách

Vzorky byly poškozeny v těchto základních druzích³⁷:

- prasknutí potahu (bez jeho rozsáhlejšího odlepení od jádra, u AlSv 93%),
- odlepení potahu od jádra ve velké ploše (u AlSv 7%),
- deformace jádra (od smykových sil i protlačením jádra (indentace) způsobené palcem cyklovacího stroje; převážně u nomexového jádra),
- ani v jednom případě se insert neuvolnil ze zalévací hmoty.

7.6.4 IRNDT

Aktivní i pasivní IRNDT poskytla zcela zřetelné zobrazení vad v PSP. Lze usuzovat, že grafické výstupy z IRNDT jsou srozumitelnější, než např. z ultrazvukových metod.

³⁷ Podrobnější kategorizace vad není úkolem této práce.

8. PŘÍNOS PRÁCE PRO VĚDU A PRAXI

8.1 Přínos pro vědu

Hlavní přínos této práce je rozšíření poznatků o únavovém chování polymerních kompozitních sendvičových panelů s voštinovými jádry. Vědecký přínos lze spatřovat v tom, že předchozí autoři na několika málo naměřených datech tvrdili, že jejich naměřená data mají normální rozdělení, tzn. že intervaly spolehlivosti pro aritmetický průměr byly počítány na základě směrodatných odchylek a kvantilů studentova rozdělení. Příkladem může být [26], kdy autor vyhodnotil naměřené soubory od 4 do 7 kusů vzorků nebo [22], kdy autor použil jen dva vzorky na dané hladině. Tuto metodiku je nutno podrobit kritice, kdy tento přístup považuji 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. Malým výběrem je dle Horna počet vzorků o četnosti (4 – 20) kusů. Lze tedy konstatovat, že aplikace této statistické metodiky pro vyhodnocení únavové životnosti vzorků z PSP jako funkci hladiny a počtu cyklů je mnohem exaktněji určeno, než popisuje současná literatura v tomto daném oboru.

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

Tato práce přehledně shrnuje celou problematiku o polymerních kompozitních sendvičových panelech s voštinovými jádry a může být tudíž podkladem pro studium této problematiky jak studenty, tak praktiky z příslušných oborů.

Použitá Hornova metoda vyhodnocení statistických dat nekonkuruje metodě popsané v normě [106]. 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).

8.3 Náměty pro další zkoumání

Tato práce může být podkladem pro další bádání v oblasti životnosti polymerních kompozitních sendvičových panelů s voštinovými jádry, které může spočívat v nalezení obecného vztahu mezi statickým zatěžováním nosníku z PSP v ohybu a dynamickým zatěžováním v ohybu, tak aby se dala odhadnout mez únavy (viz např. u ocelí s $R_m = (500 - 1500) \text{ MPa}$: $\sigma_{muc} = 0,36 R_m + 13$ pro tah-tlak). Další bádání by mohlo vést k nalezení obdobného vztahu mezi statickou pevností přilepení potahu k jádru a životnosti celého polymerního kompozitního sendvičového panelu s voštinovým jádrem. Přitom by bylo možné porovnat výsledky zkoušek odlupu vrstev pomocí navíjecího bubnu (Peel Torque per unit width) a únavových zkoušek. Široké spektrum bádání by mohlo souviset s podrobným studiem životnostní problematiky panelů s inserty.

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
- [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
- [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
- [11] *DIAB guide to core and sandwich* [online]. Laholm: DIAB group, 2012. Dostupné také z: 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 бумаж 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. 0.1 Tři spoje stejné statické pevnosti, ale rozdílné životnosti [1]	10
Obr. 1.1 Rozdělení spolehlivosti	12
Obr. 1.2 Rozdělení konstrukčních materiálů a kompozitů	13
Obr. 1.3 Polymerní kompozitní sendvičový panel s voštinovým jádrem	16
Obr. 2.1 Umístění sendvičových konstrukcí na křídle letadla [7].....	21
Obr. 2.2 Fotografie křídla s vysunutými aerodynamickými prvky z PSP	22
Obr. 2.3 Řez křídélkem sendvičové konstrukce.....	22
Obr. 2.4 Dveře automobilu z PSP	22
Obr. 2.5 Využití sendvičových konstrukcí ve stavbě autobusu	23
Obr. 2.6 Fasádní sendvičový panel.....	24
Obr. 2.7 Základní tvary voštinových jader [16]	24
Obr. 2.8 Vazby výztužných tkanin; zleva:plátnová, keprová a atlasová) [4]	26
Obr. 2.9 Různé druhy insertů v PSP [38]	27
Obr. 2.10 Řez insertem typu C (bez a s vnitřním závitem) [40]	27
Obr. 2.11 Postup montáže insertu typu B do PSP [39]	27
Obr. 2.12 Zatěžovací módy insertů (zleva: smyk, vytažení v ose, krut) [16]	28
Obr. 2.13 Expanzní proces při výrobě voštiny [9]	29
Obr. 2.14 Tvarovací proces při výrobě voštiny [9]	29
Obr. 2.15 Rovinné lisování za tepla [10].....	30
Obr. 2.16 Lisování s využitím vakuové fólie [10]	30
Obr. 2.17 Lisování ve formě [10].....	31
Obr. 2.18 Příklady ukončení okrajů PSP [10]	31
Obr. 3.1 Vlastnosti nosníků z oceli a sendviče [11].....	33
Obr. 3.2 Řez spojení potahu a jádra	34
Obr. 3.3 Průběhy napětí u sendvičového nosníku namáhaného ohybem [15]	36
Obr. 3.4 Napětí v ohnutém nosníku PSP [10]	37
Obr. 3.5 Konfigurace voštinového jádra [26].....	37
Obr. 3.6 Teoretická Wöhlerova (S-N) křivka.....	38
Obr. 3.7 Rozdělení proměnlivého zatěžování	40
Obr. 3.8 Schéma metody stékajícího deště.....	41
Obr. 3.9 Rozdělení zátěžných cyklů [41]	42
Obr. 3.10 Lomová houževnatost PKM [42]	43
Obr. 3.11 Poškození PKM u rázové a únavové zkoušky [42].....	43
Obr. 3.12 Rozvoj módů poškození během života PKM [28].....	44
Obr. 3.13 CLD diagram závislosti amplitudy a středního napětí [43]	45

Obr. 3.14 Závislost tuhosti na počtu cyklů [43]	45
Obr. 3.15 Druhy selhání adhezivní vazby pro PSP [45].....	58
Obr. 3.16 Poškození PSP při různých směrech zatížení [10]	59
Obr. 3.17 Poškození sendviče vzniklé při tříbodovém ohybu [18]	59
Obr. 3.18 Termogram (vlevo) a výsledné teplotní pole (vpravo).....	61
Obr. 3.19 Pracoviště pro aktivní IRNDT	61
Obr. 5.1 Uspořádání statické zkoušky „tříbodovým ohybem“ [103]	65
Obr. 6.1 Rozdělení vzorků	67
Obr. 6.2 Použitá závitová vložka (insert).....	68
Obr. 6.3 Lis použitý při výrobě sendvičové desky pro výrobu pilotních vzorků	69
Obr. 6.4 Laboratorní vulkanizační lis	69
Obr. 6.5 Vylisovaná deska vyjmutá z laboratorního lisu (bAIUv)	70
Obr. 6.6 Vzorek s jádrem z hliník. slitiny a potahem ze skelnou výztuží	70
Obr. 6.7 PSP bez jednoho potahu se zalitou zalévací hmotou (sAIUv)	71
Obr. 6.8 Montáž insertu (sAIUv)	71
Obr. 6.9 Zkušební zařízení pro únavovou zkoušku	72
Obr. 6.10 Detail klikové hřídele s regulačními prvky	72
Obr. 6.11 Nastavení průhybu s pomocí číselníkového úchylkoměru.....	72
Obr. 6.12 Termokamera Flir A300-series.....	73
Obr. 6.13 Vzorky pro aktivní infračervenou termografii.....	74
Obr. 6.14 Celkové uspořádání pracoviště pro aktivní IRNDT	74
Obr. 6.15 Termokamera Fluke TiS45	74
Obr. 7.1 Diagram statické zkoušky tříbodovým ohybem nosníku bez insertu...	75
Obr. 7.2 Diagram statické zkoušky tříbodovým ohybem nosníku s insertem ...	76
Obr. 7.3 Grafické porovnání statistických hodnot u vzorků s Al jádrem	79
Obr. 7.4 Grafické porovnání statistických hodnot u vzorků s No jádrem	80
Obr. 7.5 Grafické porovnání statistických hodnot (s insertem).....	82
Obr. 7.6 Wöhlerova křivka bAISv	82
Obr. 7.7 Wöhlerova křivka bAIUv	83
Obr. 7.8 Wöhlerovy křivky bAISv+bAIUv	83
Obr. 7.9 Wöhlerova křivka bNoSv	84
Obr. 7.10 Wöhlerova křivka bNoUv.....	84
Obr. 7.11 Wöhlerova křivka bNoSv+bNoUv	85
Obr. 7.12 Porovnání Hornových středních hodnot všech vzorků bez insertu ...	85
Obr. 7.13 Wöhlerova křivka sAISv.....	86
Obr. 7.14 Wöhlerova křivka sAIUv	86
Obr. 7.15 Porovnání Hornových středních hodnot vzorků s insertem sAISv+sAIUv	87

Obr. 7.16 Pilotní vzorek - odlepený potah od jádra (bAlSv)	87
Obr. 7.17 Trvalé prohnutí vzorku (bAlSv).....	87
Obr. 7.18 Prasklina potahu po hranicích voštinových buněk (bAlSv).....	88
Obr. 7.19 Přímá prasklina potahu (bAlSv)-(93% vzorků)	88
Obr. 7.20 Roztřepená, zdvojená prasklina (bNoSv).....	88
Obr. 7.21 Dlouhá prasklina jádra (smyk jádra), z počátku rovnoběžná s potahem (bNoUv).....	88
Obr. 7.22 Prasklina potahu tečující insert (sAlUv)	89
Obr. 7.23 Zalomená prasklina jdoucí „středem“ insertu (sAlSv)-(58% vzorků)	89
Obr. 7.24 Rozsáhlá deformace jádra a odlepení obou potahů (sAlSv)-(14% vzorků).....	89
Obr. 7.25 Detail spoje stěny jádra a potahu a vyzlínaného lepidla (bAlUv), zvětšení 50x	90
Obr. 7.26 Pilotní vzorky testované aktivní IRNDT	90
Obr. 7.27 Sendvičový panel se zmrzlou vodou ve voštinovém jádře	91
Obr. 7.28 Upravená spojitá Wöhlerova křivka z obr. 7.6	92

Neoznačené obrázky (fotografie) – vlastní zpracování

SEZNAM TABULEK

Tab. 3.1 Srovnání měrných hmotností (hustoty) různých materiálů.....	33
Tab. 3.2 Vady kompozitů (laminátů) [44].....	57
Tab. 5.1 Postup zpracování dat.....	66
Tab. 6.1 Kódování vzorků	67
Tab. 6.2 Technické parametry laboratorního vulkanizačního lisu	69
Tab. 7.1 Výsledky statické zkoušky třibodovým ohybem	75
Tab. 7.2 Naměřené hodnoty při statické zkoušce vytržení insertu.....	76
Tab. 7.3 Stanovení zatěžovacích hladin	77
Tab. 7.4 Pilotní výsledky únavové zkoušky a statistické charakteristiky	77
Tab. 7.5 Naměřené počty cyklů u vzorků bez insertů	78
Tab. 7.6 Statistické zpracování dat z QC. Expertu.....	78
Tab. 7.7 Porovnání statistických hodnot z naměřených počtů cyklů.....	79
Tab. 7.8 Naměřené počty cyklů u vzorků s inserty	80
Tab. 7.9 Statistické zpracování dat z QC. Expertu.....	81
Tab. 7.10 Porovnání statistických hodnot z naměřených počtů cyklů.....	81

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbol	Rozměr	Význam symbolu
C	$[J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$	Tepelná kapacita
C^*	[-]	Materiálová konstanta
C, w	[-]	Parametry únavové křivky
D	[1]	Parametr Palmgren-Minerova pravidla
E	[-]	Základní soubor
$F_{B,i}$	[N]	Síla při porušení vzorku
$F_{max,i}$	[N]	Maximální síla při cyklickém zatěžování
H	[-]	Hloubka pívotu
K_o	[MPa]	Tuhost složeného prutu v ohybu
L	[mm]	Vzdálenost podpěr zkušebního přípravku
L_c	[m]	Rozeěr expandovaného voštinového jádra
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_a	[-]	Amplitudový součinitel
P_L	[-]	Pivotová polosuma
P_R	[-]	Pivotové rozpětí
R	[-]	Součinitel asymetrie cyklu
R_L	[mm]	Rádus vyzlínaného lepidla
R_m	[MPa]	Mez pevnosti
R^2	[-]	Hodnota spolehlivosti (stupeň těsnosti)
S	[MPa]	Smluvní napětí (lze nahradit např. σ_{max})
S_p	[m ²]	Plocha
T	[MPa]	Napětí ve smyku

T_L	[-]	Rozdělení rozdělené veličiny
X_i	[-]	i -tá hodnota pozorovaného zkušebního souboru (v \log_{10}),
V_x	[%]	Variační koeficient
W_c	[m]	Rozměr expandovaného voštinového jádra
a	[mm ² .s ⁻¹]	Teplotní vodivost (tepelná difuzivita)
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
$k_{(P,1-\alpha,v)}$	[-]	Jednostranná toleranční mez normálního rozdělení
l	[mm]	Délka vzorku
l_s	[-]	Statistická konstanta
m	[-]	Počet různých úrovní zatížení u P-M
n	[-]	Počet cyklů ve spektru zatížení (počet datových souborů)
n_i	[-]	Počet cyklů na hladině i
r	[-]	Použitá hladina (model Hwang a Han)
r_p	[mm]	Poloměr zakřivení neutrální plochy
s	[-]	Směrodatná odchylka
t	[s]	Čas
v	[-]	Počet stupňů volnosti
v_v	[mm]	Výška lepidla na stěně jádra („vyzlínání“ lepidla)
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
$1/m$	[-]	Sklon přímky v log-log souřadnicích
λ	[W. m ⁻¹ . K ⁻¹]	Tepelná vodivost
μ	[-]	Střední hodnota - Hornův střed (Hornův postup)
$\hat{\mu}$	[-]	Výběrový průměr
ρ	[kg.m ⁻³]	Hustota
σ	[-]	Výběrová směrodatná odchylka
$\sigma_{a,i}$	[MPa]	Amplituda napětí
σ_{fB}	[MPa]	Napětí při porušení
σ_f	[MPa]	Napětí v potahu (efektivní)
σ_m	[MPa]	Střední napětí kmitu
σ_{max}	[MPa]	Horní napětí
σ_{min}	[MPa]	Dolní napětí
σ_{muc}	[MPa]	Mez únavy při cyklickém namáhání
$\Delta\sigma$	[MPa]	Rozdíl mezi maximálním a minimálním napětím (rozkmit napětí)
τ_c	[MPa]	Napětí v jádře (lze i σ_c) (efektivní)

Zkratky

A,B,C,	Označení hladin
D	
Al	Jádro z hliníkové slitiny
CLD	Constant Life Diagram
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

PŘÍLOHY

Příloha č. 1 Tabulka Hornových kvantilů

<i>n</i>	$1 - \alpha =$	0.9	0.95	0.975	0.99	0.995
4		0.477	0.555	0.738	1.040	1.331
5		0.869	1.370	2.094	3.715	5.805
6		0.531	0.759	1.035	1.505	1.968
7		0.451	0.550	0.720	0.978	1.211
8		0.393	0.469	0.564	0.741	0.890
9		0.484	0.688	0.915	1.265	1.575
10		0.400	0.523	0.668	0.878	1.051
11		0.363	0.452	0.545	0.714	0.859
12		0.344	0.423	0.483	0.593	0.697
13		0.389	0.497	0.608	0.792	0.945
14		0.348	0.437	0.525	0.661	0.776
15		0.318	0.399	0.466	0.586	0.685
16		0.299	0.374	0.435	0.507	0.591
17		0.331	0.421	0.502	0.637	0.774
18		0.300	0.380	0.451	0.555	0.650
19		0.288	0.361	0.423	0.502	0.575
20		0.266	0.337	0.397	0.464	0.519

Příloha č. 2 Tabulky ze statistického zpracování výsledků

bAISv+bAIUv

Označení	Střední hodnota	Spodní mez (5%)	Horní mez (95%)	Označení	Střední hodnota	Spodní mez (5%)	Horní mez (95%)	Hladina
AIsv35	854460	676038,6	1032881,4	AIUv35	1006740	997349,4	1016130,6	35
AIsv50	71910	48433,5	95386,5	AIUv50	1979,5	1040,995	2918,005	50
AIsv65	4610,5	1333,225	7887,775	AIUv65	95,5	35,005	155,995	65
AIsv80	1598,5	612,265	2584,735	AIUv80	18	14,67	21,33	80

bNoSv+bNoUv

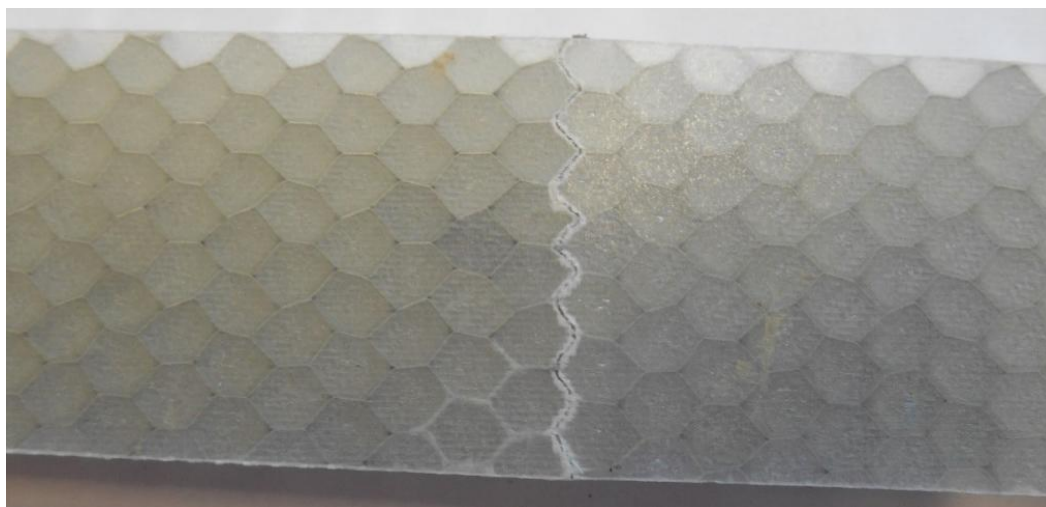
Označení	Střední hodnota	Spodní mez (5%)	Horní mez (95%)	Označení	Střední hodnota	Spodní mez (5%)	Horní mez (95%)	Hladina
NoSv35	782550	524308,5	1040791,5	NoUv35	420989	310534,01	531443,99	35
NoSv50	29609,5	9269,305	49949,695	NoUv50	64854	61717,14	67990,86	50
NoSv65	426	216,21	635,79	NoUv65	2032	1282,75	2781,25	65
NoSv80	278	242,48	313,52	NoUv80	65	56,12	73,88	80

Hornovy střední hodnoty (bAISv+bAIUv+bNoSv+bNoUv)

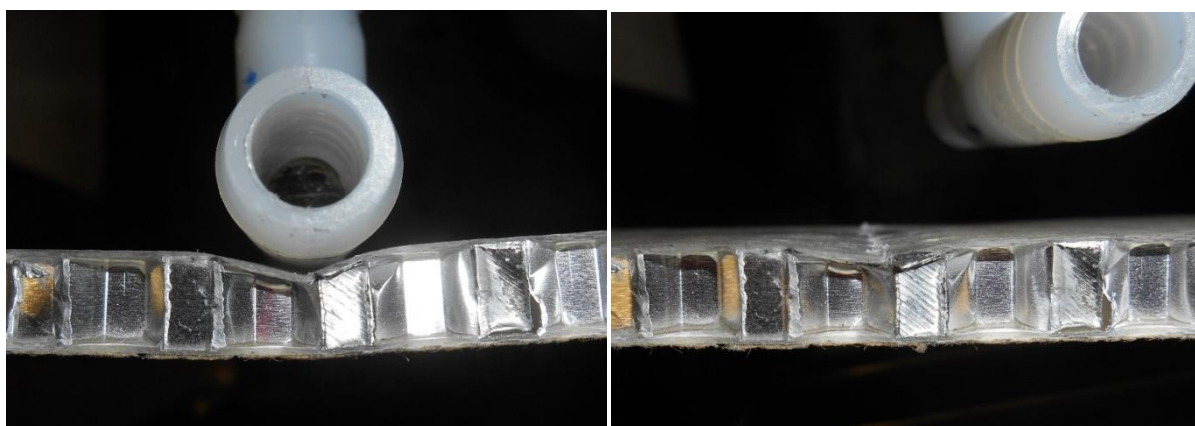
Označení	Střední hodnota	Spodní mez (5%)	Horní mez (95%)	Pivotové rozpětí
AIsv35	854460	676038,6	1032881,4	321480
AIUv35	1006740	997349,4	1016130,6	16920
AIsv50	71910	48433,5	95386,5	42300
AIUv50	1979,5	1040,995	2918,005	1691
AIsv65	4610,5	1333,225	7887,775	5905
AIUv65	95,5	35,005	155,995	109
AIsv80	1598,5	612,265	2584,735	1777
AIUv80	18	14,67	21,33	6
pokračování				
Označení	Střední hodnota	Spodní mez (5%)	Horní mez (95%)	Pivotové rozpětí
NoSv35	782550	524308,5	1040791,5	465300
NoUv35	420989	310534,01	531443,99	199018
NoSv50	29609,5	9269,305	49949,695	36649
NoUv50	64854	61717,14	67990,86	5652
NoSv65	426	216,21	635,79	378
NoUv65	2032	1282,75	2781,25	1350
NoSv80	278	242,48	313,52	64
NoUv80	65	56,12	73,88	16

Příloha č. 3 Fotografie poškození vzniklých při únavových zkouškách.

Vzorky bez insertu



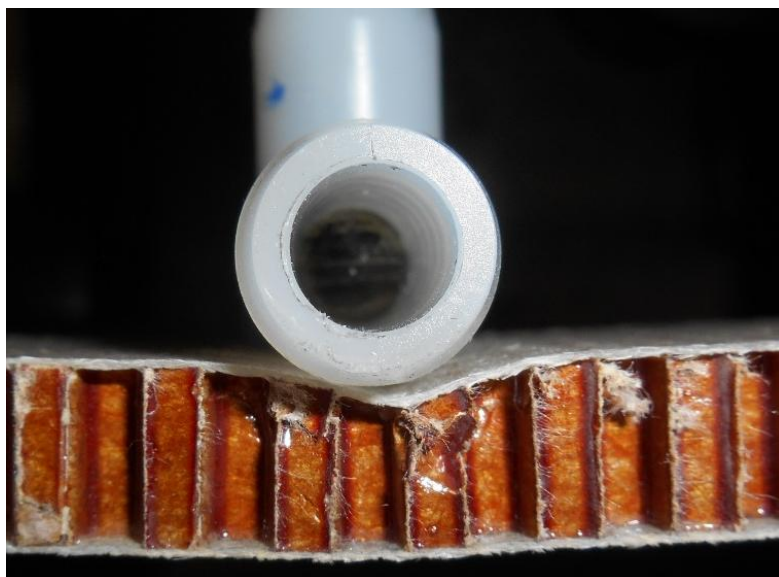
Prasklina potahu po hranicích voštinových buněk (bAlSv)



Deformace jádra (indentace) a prasknutí potahu (bAlSV)



Nepoškozená strana a poškozená strana vzorku č. 329055 (bAlUv)

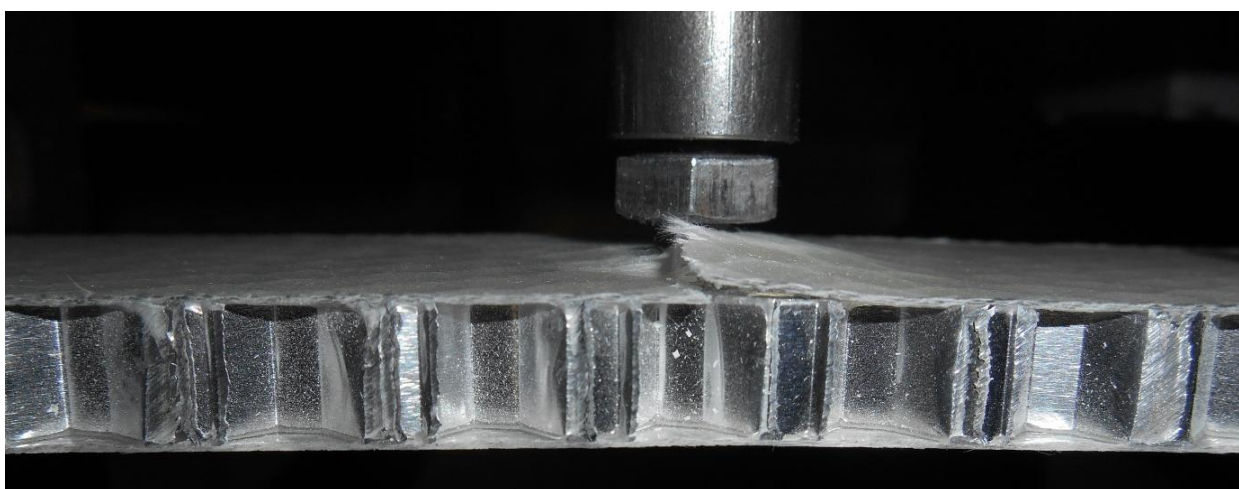


Deformace (indentace - prohloubení) jádra (bNoSv)

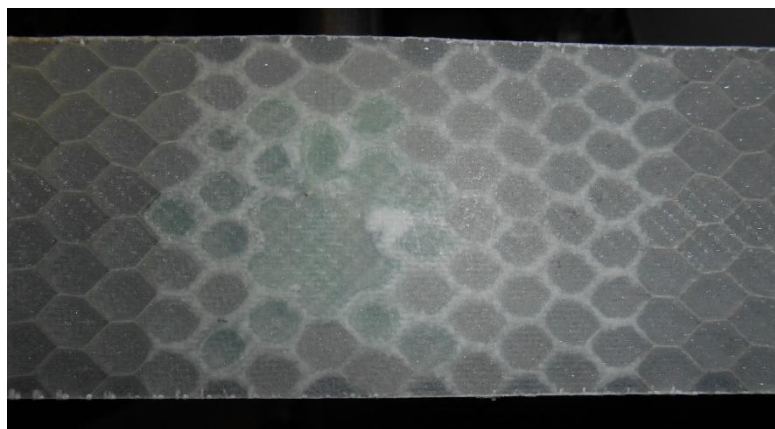


Odlepený potah od jádra (bAlUv) – stejné, jako u pilotních vzorků

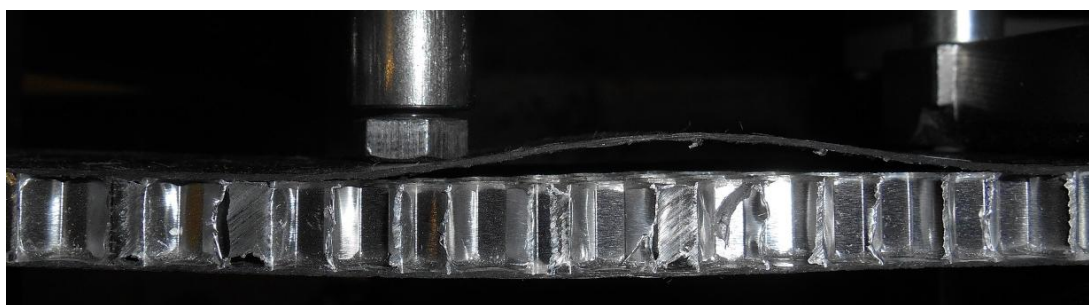
Vzorky s insertem



Odlepení potahu a jeho částečná delaminace (sAlSv)



Spodní, nepoškozená strana, vzorku z předchozího obrázku



Odlepený potah od jádra (bAlUv) – stejné, jako u pilotních vzorků



Rozsáhlá deformace jádra a odlepení obou potahů (sAlUv)

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
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 vlákno-kovových 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 výrobný manažment 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

Spolehlivost kompozitních konstrukcí

Dependability of Composites Contructions

Disertační práce

Vydala Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně,

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

Sazba: autor

Publikace neprošla jazykovou ani redakční úpravou.

Rok vydání: 2018

