

Využití senzorů pro sledování deformace kompozitů v leteckém průmyslu

Aleš Korečko

Bakalářská práce
2021



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2020/2021

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Aleš Korečko**
Osobní číslo: **T20861**
Studijní program: **B3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Technologická zařízení**
Forma studia: **Kombinovaná**
Téma práce: **Využití sensorů pro sledování deformace kompozitů v leteckém průmyslu**

Zásady pro vypracování

1. Literární rešerše na aplikační možnosti sensorů v leteckém průmyslu.
2. Sensory, princip, monitorování aktuálního stavu kompozitů.
3. Průmysl 4.0 v leteckém průmyslu. IoT aplikace v leteckém průmyslu.
4. Navrhnete aplikační možnosti zabudování senzoru v kompozitních strukturách formou 3D návrhů.
5. Závěr a vzájemné srovnání navržených řešení.

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

Barbero, Ever J. 2018, Introduction to composite materials design, Third Edition, CRC Press, Taylor & Francis Group, ISBN-13: 978-1138196803.

ŠUBA, Oldřich. Mechanika polymerů a kompozitů. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2011. ISBN 978-80-7454-015-8

ŠUBA, Oldřich. Dimenzování a navrhování výrobků z polymerů. Vyd. 3. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2010, 112 s. ISBN 978-80-7318-948-8.

EHRENSTEIN GOTTFRIED, W. 2009. Polymerní kompozitní materiály. Praha, nakladatelství SCIENTIA v Praze, 351s, 2009. ISBN 978-80-86960-29-6

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Soňa Rusnáková, Ph.D.**
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání bakalářské práce: **5. ledna 2021**

Termín odevzdání bakalářské práce: **21. května 2021**

prof. Ing. Roman Čermák, Ph.D. v.r.
děkan

L.S.

prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D. v.r.
ředitel ústavu

Ve Zlíně dne 1. dubna 2021

PROHLÁŠENÍ AUTORA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že:

- bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému a dostupná k nahlédnutí;
- na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- podle § 60 odst. 1 autorského zákona má Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- pokud bylo k vypracování bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tj. k nekomerčnímu využití), nelze výsledky bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- pokud je výstupem bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považuji se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji,

- že jsem na bakalářské práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou obsahově totožné.

Ve Zlíně, dne:

Jméno a příjmení studenta:

.....
podpis studenta

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá návrhem zabudování senzorů do kompozitních struktur v leteckém průmyslu. Teoretická část je zaměřena obecně na senzory. Součástí je popis a rozdělení senzorů, konkrétní aplikace senzorů v leteckém průmyslu, a také je přiblížena problematika spojená s monitorováním strukturálního zdraví (Structural Health Monitoring). Praktická část je zaměřena na zabudování optických vláknových senzorů do zjednodušeného 3D modelu křídla letadla. Výsledkem práce je návrh konkrétní integrace senzorů do kompozitní struktury, návrh materiálů, formy a také technologický postup výroby kompozitního dílu dle 3D modelu.

Klíčová slova: vláknový senzor, monitorování strukturálního zdraví, kompozitní struktura

ABSTRACT

This bachelor thesis deals with the design of installation sensors into composite structures in the aviation industry. The theoretical part is focused generally on sensors. It is included the description and distribution of sensors, specific sensor applications, and also problematics related to Structural Health Monitoring. The practical part is focused on the installation of optical fiber sensors into a simplified 3D model of an airplane wing. The result of the work is a specific design of integrating sensors into a composite structure, design of materials, form, and also the technological process of composite part production based on 3D model.

Keywords: optical sensor, Structural Health Monitoring, composite structure

Touto cestou bych velmi rád poděkoval vedoucí mé bakalářské práce, doc. Ing. Soni Rusnákové, Ph.D. za odborné vedení, užitečné rady a čas, který mi věnovala při vypracování této bakalářské práce. Dále bych rád poděkoval své rodině a přítelkyni, kteří mi byli oporou během celého studia a při tvorbě této bakalářské práce.

Prohlašuji, že odevzdaná verze bakalářské/diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

OBSAH

ÚVOD	9
I TEORETICKÁ ČÁST	10
1 SENZORY A JEJICH PRINCIP	11
1.1 VÝZNAM SENZORŮ	11
1.2 POPIS PRINCIPU ČINNOSTI	12
1.3 ROZDĚLENÍ SENZORŮ	14
1.3.1 Rozdělení dle fyzikálního principu	14
2 OPTICKÉ VLÁKNOVÉ SENZORY	18
2.1 OPTICKÉ VLÁKNO.....	18
2.1.1 Struktura optického vlákna	19
2.2 ROZDĚLENÍ OPTICKÝCH SENZORŮ	20
2.2.1 Interferometrické senzorické systémy.....	21
2.2.2 Distribuované senzorické systémy	22
2.2.3 Bodové a semi-distribuované systémy	22
2.3 APLIKACE OPTICKÝCH SENZORŮ V LETECKÉM PRŮMYSLU	24
2.3.1 Aplikace senzorů FBG	24
2.3.2 Aplikace distribuovaných senzorů	26
3 ODPOROVÉ SENZORY	27
3.1 DRUHY ODPOROVÝCH SENZORŮ	28
3.2 ODPOROVÉ SENZORY DEFORMACE – TENZOMETRY	28
3.2.1 Rozdělení tenzometrických senzorů.....	29
3.2.2 Využití odporových tenzometrů.....	31
3.3 APLIKACE ODPOROVÝCH SENZORŮ V LETECKÉM PRŮMYSLU	32
4 STRUCTURAL HEALTH MONITORING	33
4.1 SHM V LETECKÉM PRŮMYSLU	35
5 PRŮMYSL 4.0 V LETECKÉM PRŮMYSLU (AEROSPACE 4.0)	37
5.1 INTERNET OF THINGS (IOT) V LETECKÉM PRŮMYSLU	38
II PRAKTICKÁ ČÁST	39
6 STANOVENÍ CÍLŮ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE	40
7 VOLBA KOMPOZITNÍ ČÁSTI A TVORBA 3D MODELU	41
7.1 NÁVRH 3D MODELU	41
7.2 SOFTWARE	42
7.3 3D MODEL	42
8 VOLBA VÝROBNÍ TECHNOLOGIE	45

9	NÁVRH MATERIÁLŮ	48
9.1	PREPREGY	48
9.2	VOŠTINOVÉ JÁDRO	50
9.3	POLYURETANOVÁ PĚNA	50
9.4	EPOXIDOVÁ PĚNA	51
10	ZABUDOVÁNÍ SENZORŮ	52
10.1	SENZORY FBG	54
10.2	MONITOROVACÍ JEDNOTKA	55
11	NÁVRH FORMY	56
12	TECHNOLOGICKÝ POSTUP VÝROBY	58
12.1	RÁMCOVÝ TECHNOLOGICKÝ POSTUP.....	63
	ZÁVĚR	65
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	66
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	71
	SEZNAM OBRÁZKŮ	73
	SEZNAM TABULEK	75
	SEZNAM GRAFŮ	76

ÚVOD

Kompozitní materiály postupem času nacházejí stále většího uplatnění ve všech odvětvích průmyslu. Díky jejich předním vlastnostem, jako jsou vysoká pevnost, odolnost vůči vnějším vlivům, a zejména výrazná úspora hmotnosti při dodržení požadovaných mechanických vlastností se hojně objevují také v průmyslu leteckém. Konstrukce letadel se v dnešním světě bez kompozitních částí téměř nevyskytují, neboť právě úspora váhy hraje klíčovou roli při návrhu a provozu letadel.

Protože jsou kompozity složeny z více různorodých materiálů, mohou nejen uvnitř těchto struktur vznikat napětí či deformace způsobené například namáháním nebo výrobní chybou. Právě tímto problémem se zabývají metody strukturálního monitorování zdraví celých kompozitních konstrukcí, které mají tyto nedokonalosti odhalit a včas informovat o jejich vzniku. Obrovskou výhodou sledování stavu v kompozitních materiálech je bezesporu možnost samotné integrace senzorů do vnitra těchto materiálů. V leteckém průmyslu nabyl pojem monitorování obrovského významu, neboť zajišťuje bezpečnost letového provozu, která je prioritou číslo jedna.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 SENZORY A JEJICH PRINCIP

1.1 Význam senzorů

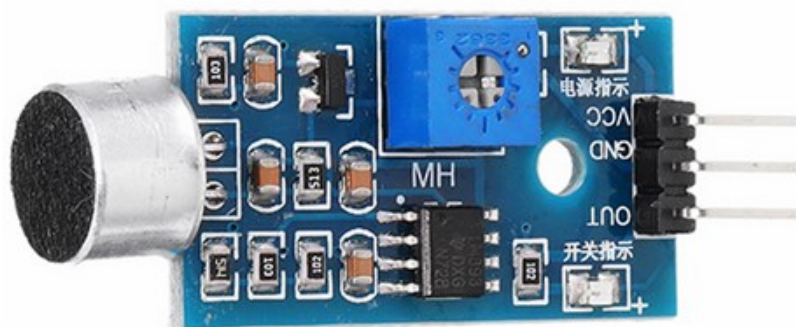
Senzory jsou základním prvkem technických prostředků pro snímání a měření údajů, informací a dat u řídicích a informačních systémů. Jedná se o klíčové prvky, které popisují vlastnosti a činnosti systému. Technická praxe i vědecká oblast používá velké množství různých typů senzorů. Při tom je využíváno různých fyzikálních principů pro zajištění snímání různých veličin od vnějších podnětů, jako jsou například deformace, změny teplot, vlhkosti apod.

Systémy informatiky a automatického řízení se neustále rozvíjí a jsou aplikovány téměř ve všech odvětvích průmyslu, ve zdravotnictví, vědě, ale také ve službách a domácnostech. Tyto systémy mají své funkce založené na kvalitních vstupních datech a informacích, tj. na spolehlivém podsystému snímání nebo měření.

Různorodost požadavků řídicích a informačních systémů na podsystémy snímání a měření dat vyvolává trvalý tlak na vývoj nových typů senzorů.[1]



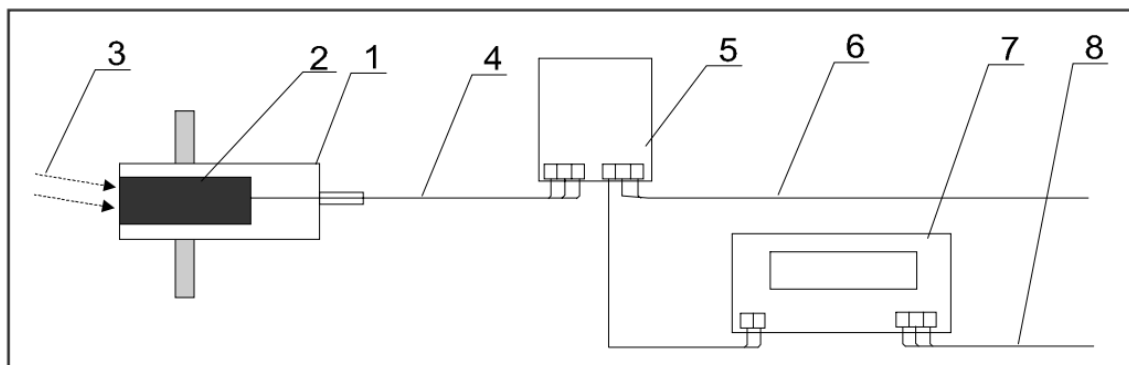
Obrázek 1 Fototelegrafický snímač [2]



Obrázek 2 Senzor detekce zvuku [3]

1.2 Popis principu činnosti

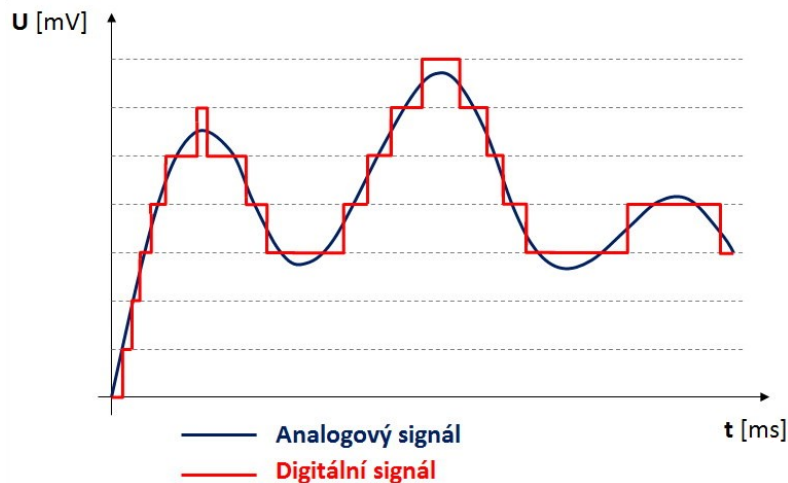
V obecném měřicím okruhu je systém tvořen snímačem – převodníkem – případně jednotkou, ve které dochází k vyhodnocení snímaných dat. Nejvýznamnějším prvkem snímače je senzor, kde je uskutečněno snímání nebo převod vnějšího fyzikálního podnětu na měřitelný zpravidla neunifikovaný signál. Senzor tvoří primární rozhraní mezi vnějším podnětem sledovaného objektu a obvody dalšího zpracování informací. Je to element, který je ovlivňován měřenou veličinou z vnějšího prostředí, která generuje v senzoru měřitelnou změnu fyzikální, mechanickou, chemickou, nebo tekutinovou. V další části snímače je mechanická nebo elektronická konstrukce. Převodník je elektronický obvod a vyhodnocuje primární signál ze senzoru a převádí jej zpravidla na elektrický unifikovaný signál měřené veličiny. Pro elektronické zpracování jsou nejčastěji používány veličiny napětí, proud a kmitočet. V případech dalšího zpracování signálů měřené veličiny, např. při vyhodnocení dávkovaného množství integrací nebo měření dodávky tepla, se používá vyhodnocovací jednotka s výstupem. [1]



Obrázek 3 Schéma zpracování signálu [1]

- 1 - Snímač, 2 - Senzor, 3 – Vnější podnět, 4 – Primární signál, 5 – Převodník,
6 – Elektrický signál, 7 – Vyhodnocovací jednotka, 8 – Výstup

Konečným výstupem může být digitální (číslicový) nebo analogový signál. V případě číslicového signálu dochází ke zpracování číslicovým měřicím přístrojem nebo zvoleným komunikačním rozhraním. Analogový signál bývá zpracován přímo-ukazujícím zapisovačem nebo analogovým přístrojem.



Graf 1 Znárodnění analogového a digitálního signálu [4]

Měřená veličina může mít statický nebo dynamický charakter. U statických měření je požadováno především lineární závislosti mezi vstupní a výstupní veličinou. [1] Základní parametry, které charakterizují statické a dynamické vlastnosti senzorů, jsou:

- Statické parametry [5]
 - Citlivost
 - Dynamický rozsah
 - Reprodukovatelnost
 - Rozlišitelnost
- Dynamické parametry [5]
 - Časová konstanta
 - Frekvenční rozsah
 - Rychlost číslicového přenosu
 - Parametry časové odezvy

Znalost dynamických vlastností měřícího přístroje je důležitá pro měření veličin, jejichž hodnota se rychle mění s časem. V případě špatně zvoleného přístroje nebude udávat přesnou hodnotu a výsledný údaj bude zatížen velkou dynamickou chybou, neboť se bude výstupní signál opožďovat za změnou hodnoty měřené veličiny.

Z hlediska nepřesností a chyb měření je také zapotřebí uvažovat o vhodném zapojení senzoru do měřícího systému. Tím pádem musí být respektovány vazby senzoru s ostatními částmi systému. Mezi okolní veličiny, které mohou způsobovat rušení či chyby měření můžeme zařadit např. tlak, vlhkost, teplotu, elektrické či magnetické pole apod. [6]

1.3 Rozdělení senzorů

Senzory se rozdělují z několika různých hledisek:

- Dle fyzikálního principu (odporové, indukční, kapacitní, magnetické apod.)
- Dle měřené veličiny (teplota, tlak, průtok apod.)
- Dle styku senzoru s měřeným prostředím (bezdotykové, dotykové)
- Dle transformace signálu (aktivní, pasivní)
- Dle výrobní technologie (elektrické, elektromechanické, pneumatické apod.)

1.3.1 Rozdělení dle fyzikálního principu

Senzory pracují na různých fyzikálních či fyzikálně chemických, mechanických a jiných principech. Dle těchto principů je možné tedy rozdělit veškeré senzory, které existují, tím pádem i všechny ostatní podskupiny uvedené výše. Hmotu senzoru má takové vlastnosti, že své vlastnosti nebo parametry mění pod vlivem působení vnějších vlivů. Podle druhu změn ve hmotě senzoru, tj. podle principů přeměny vlivu vnějšího vlivu na její vlastnosti rozlišujeme senzory, které:

- Mění elektrické vlastnosti dle změn elektrického odporu, změn indukčnosti, či kapacitance – odporové, indukčnostní a kapacitní senzory
- Generují určitý elektrický potenciál – aktivní nábojové, potenciometrické či indukční senzory
- Vytváří změnu směru a energie elektromagnetického záření – senzory optické
- Způsobují mechanické efekty – mechanické senzory
- Působí hydraulickými účinky na proudění tekutin – tekutinové senzory
- Vytváří chemické změny či reakce – elektro katalytické senzory
- Ovlivňují polovodičový efekt hmoty polovodičů – polovodičové senzory
- Reagují na ionizující záření – ionizační senzory

Přehledné rozdělení senzorů dle fyzikálních principů, vnějších vlivů, typů senzorů a jednotlivých aplikací senzorů je znázorněno v Tabulce 1 a 2. [1]

Fyzikální princip	Typ senzoru	Aplikace
Mechanický: - tepelná roztažnost - setrvačnost osy, odstředivá a Coriolisova síla	Bimetal, roztažnost objemů Akcelerometr, Gyroskop	Snímání teploty, termostat Snímač polohy a její změny
Tekutinový: - změna rychlosti proudění - vírový - změna tlaku při výtoku	Průřezový senzor průtoku, Pitotova trubice Vírový průtokoměr Tryska - klapka	Měření průtoku a rychlosti průtoku Měření polohy, posuvu
Elektrická resistance (odpor podle Ohmova zákona) a vodivost: - kovový teplotní - kovový – mechanické napětí - polykrystalický - polovodičový - monokrystalický – polovodičový - polovodičový s přechodem - polovodičový tenzometrický	Pt, Ni, Mo teploměr Tenzometr Termistor NTC, PTC Si senzor monokrystalický Polovodičový materiál s přechodem P nebo N Tenzometr	Měření teploty dotykem, Potenciometr. natočení, Mechanické napětí Měření teploty dotykem Měření teploty dotykem, magnetická indukce Mechanické napětí, síla, hmotnost
Elektrické pole a náboj: - pyroelektrický - kapacitní - piezoelektrický	Pyroelektrický Kondenzátor jako senzor Piezoelektrický nebo ultrazvukový	Měření teploty bezdotykově Posuv, poloha, vlhkost Tlak, síla, hmotnost Ultrazvuk poloha, průtok, vzdálenost
Induktance a magnetismus: - indukčnost cívky - magnetostrikce - paramagnetismus	Indukční senzor Magnetostrikční senzor Paramagnetický senzor	Měření polohy, posuvu Měření polohy, posuvu Měření obsahu O ₂ , NO
Magnetická indukce:	Tachogenerátor, magnetodynamický senzor	
Hallův efekt	Hallův senzor	Měření proudu a magnetické indukce
Seebeckův a Peltierův efekt	Termočlánek	Měření teploty
Přenos a absorpce elektromagnetického záření	Emisní senzor Elektroluniscence Fotonásobič Absorpce elektromagnet. záření Rozptyl elektromagnet. záření	Intenzita světla Koncentrace látek Kvantové měření světla Turbidimetrie Nefelometrie

Tabulka 1 Fyzikální principy, jednotlivé typy a aplikace senzorů [1]

Fyzikální princip	Typ senzoru	Aplikace
Optické vlastnosti materiálů	Refraktometrický senzor	Koncentrace organických látek
	Optické vlákno, Absorpce	Poloha, posuv
Radioaktivní záření	Ionizační senzor	
Polovodičový efekt	Diodový senzor	Měření intenzity světla, teploty
	Tranzistorový senzor	Měření teploty
	Integrovaný obvod	CMOS obrazový snímač, PSD
	CCD senzor	Obrazový snímač
	MEMS senzor	Akcelerometr, tlakový senzor, gyroskop
Chemické reakce	Termo katalytický senzor Pt, polovodičový	Koncentrace spalitelných plynů
	Plamenoionizační senzor	Koncentrace spalitelných plynů
	Bioreakce	Biosenzory – analýza potravin

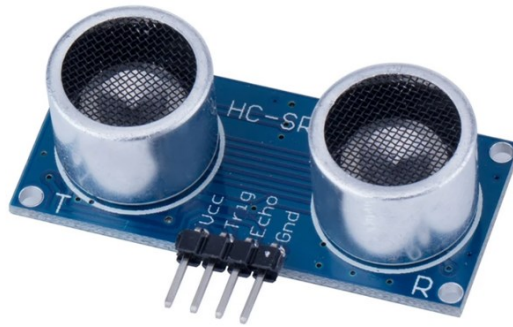
Tabulka 2 Fyzikální principy, jednotlivé typy a aplikace senzorů [1]



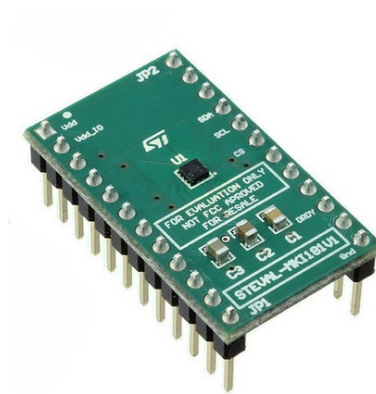
Obrázek 4 Kovový tenzometr [7]



Obrázek 5 Hallův snímač otáček [8]



Obrázek 6 Ultrazvukový senzor vzdálenosti [9]



Obrázek 7 MEMS tlakový senzor [10]

Z výše uvedených metod používaných při snímání a převodu vnějších vlivů na výstupní signály senzorů je patrné, že se jedná převážně o elektrické principy. Elektronika totiž umožňuje zajištění miniaturizace senzorů, velkou přesnost, dálkový přenos signálu, citlivost apod. Pouze malé procento využití je zaznamenáno u mechanických jevů či tekutinových principů – tyto principy mají z pravidla převodník na převod mechanické změny v elektrický signál. [1]

2 OPTICKÉ VLÁKNOVÉ SENZORY

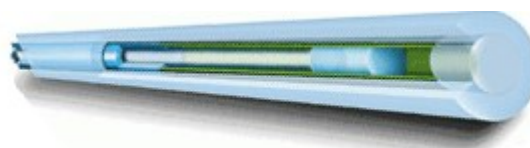
Optické vláknové senzory jsou optoelektronická zařízení, která umožňují snímání změn různých fyzikálních veličin. V posledních letech je optickým sensorům věnována velká pozornost, neboť svými vlastnostmi a různorodostí použití těchto sensorů převyšují senzory, založené na méně efektivních či zastaralých principech. (viz. Tabulka 1 a 2). Optické vláknové senzory našly uplatnění téměř ve všech odvětvích průmyslu, zdravotnictví, biofyzice, ale také v armádě či letecké technice.



Obrázek 8 Monitorování stavu mostní konstrukce pomocí sensorů [11]

2.1 Optické vlákno

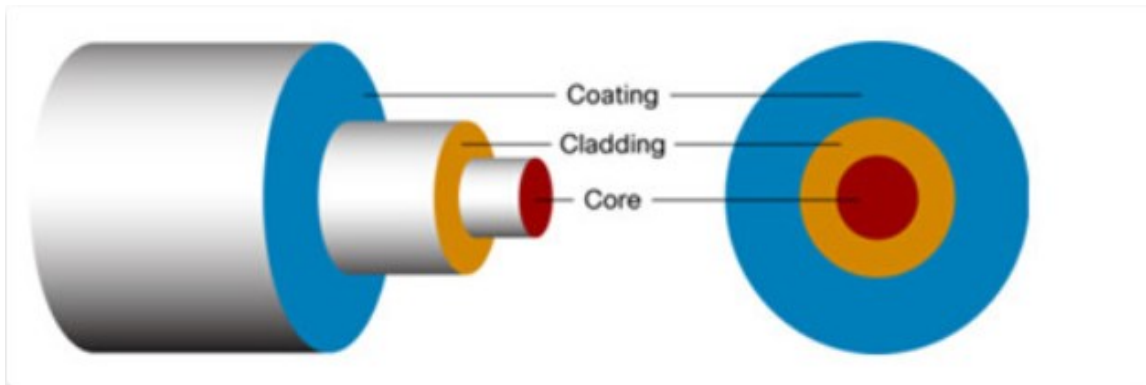
Jak již název napovídá, základním prvkem vláknových sensorů je optické vlákno. Přenos informací a dat v tomto vlákně se děje šířením světla optickým vlnovodem. Princip je jednoduchý – světelný paprsek dopadá na rozhraní dvou prostředí s rozdílnou optickou hustotou a tím pádem s rozdílným indexem lomu, kde se jeho část láme a prostupuje z jednoho prostředí do druhého a část druhá se odrazí a vrací se do prostředí, z něhož přichází. Důležitým faktorem při tomto procesu je úhel odrazu, který odrazí paprsek zpět do prostředí, ze kterého pochází. Každé optické rozhraní má tzv. mezní úhel odrazu, což znamená, že pokud světlo dopadá pod tímto úhlem dochází k totálnímu odrazu, kdy je 100% světla odraženo, a tedy neopustí prostředí, ze kterého přichází. Právě tento princip je využíván u optických vláken. [12] [13]



Obrázek 9 Optické vlákno [14]

2.1.1 Struktura optického vlákna

Optické vlákno je složeno ze tří hlavních částí, kterými jsou jádro (core), obal jádra (cladding), a primární ochrana (coating).



Obrázek 10 Průřez optickým vláknem [15]

Hlavní části optického vlákna:

- Jádro – je to hlavní část vlákna, kterou se šíří paprsek v celé jeho délce
 - je tvořeno křemenným sklem
 - má větší hodnotu indexu lomu než obal jádra
 - jeho rozměr se pohybuje v rozmezí 5-10 μm
- Obal – tento prvek chrání a zpevňuje samotné jádro
 - umožňuje vedení světelného záření
 - jeho rozměr (i s jádrem) je například 125 μm
- Primární ochrana – ochranná vrstva jádra, která brání poškození jádra vnějšími vlivy
 - tato vrstva je tvořena většinou akrylovým lakem
 - rozměr této ochrany má průměr 250 μm
- Sekundární ochrana – dále může být vlákno chráněno ještě vrstvou tvořenou plastickou hmotou, která vlákno chrání vůči mechanickému namáhání a také chemickým vlivům okolí. [12] [16]

Základní vlastnosti optického vlákna:

1) Numerická apertura NA	2) Šířka pásma
3) Ztráty	4) Disperze

Z uvedených vlastností je nejdůležitější numerická apertura NA, která nám udává maximální možný úhel, pod kterým může paprsek vstoupit do vlákna.

2.2 Rozdělení optických senzorů

Optické vláknové senzory je možné rozdělit z mnoha různých hledisek. Nejzákladnějším kritériem pro rozdělení se považuje to, zda senzor využívá optické vlákno pro přenos informací. To znamená, že se změřená hodnota dané veličiny přenáší po optickém vlákne do vyhodnocovací jednotky, ve které dojde k jejímu zpracování. Tyto senzory označujeme jako extrinsické. Naopak pokud je optické vlákno využito pouze jako detektor a změřená hodnota je přenášena po jiném médiu, jedná se o senzor instrinsický. [13]

Dále se dají optické senzory rozdělit:

Dle působení fyzikální veličiny na senzor prostřednictvím změn:

- Indexu lomu optického vlákna
- Absorpce
- Emise nebo fluorescence

Dle modulace optického signálu:

- Amplitudové
- Fázové
- Polarizační
- S modulací vlnové délky nebo časového rozšíření impulzu

Dle druhu měřené veličiny:

- Mechanické napětí
- Teplota
- Posuv a deformace
- Vibrace
- Tlak kapalin a plynů
- Elektrický proud

- Zrychlení
- Rotace

Na základě jejich prostorového uspořádání:

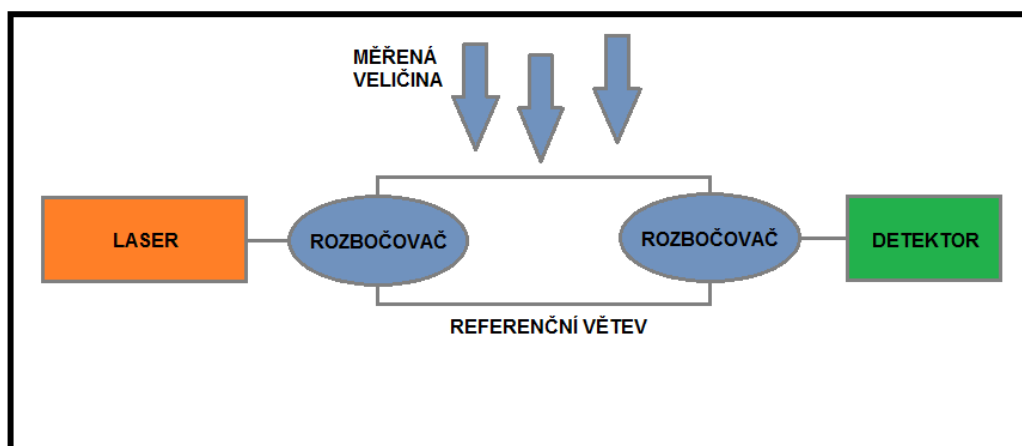
- Interferometrické
- Distribuované
- Bodové a semi-distribuované

Tyto senzory jsou využívány pro sledování strukturálního zdraví a jsou založeny na různých principech. Každý z těchto principů představuje prostorově rozdílné možnosti měření. [13]

2.2.1 Interferometrické senzorické systémy

Tyto senzory sledují rozdíl mezi dvěma optickými svazky, které prošly stejné dráhy, ale ve dvou různých ramenech interferometru. Základem konstrukce interferometrických senzorů jsou vláknové interferometry – Fabryho-Pérotův, Michelsonův, Machův-Zehnderův a Sagnacův. Senzory modulují optickou vlnu, která prochází snímací částí vlákna. Při snímání veličiny nastává v místě, kde se mění index lomu vlákna, změna fáze světelné vlny. V interferometru je využíváno dvou ramen, kde jedno rameno je referenční a druhé slouží k měření. Detektor zaznamenává signál, který vzniká interferencí dvou optických paprsků – z měřicího a referenčního ramena.

V praxi mohou být tyto systémy využity pro citlivé měření akustických signálů, teploty, tlaku, apod [13] [17]



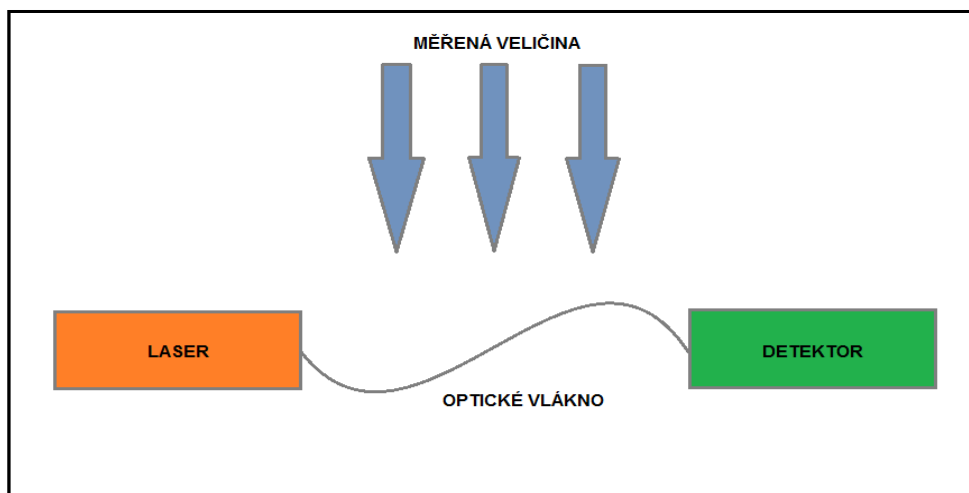
Obrázek 11 Blokové schéma interferometrického systému

2.2.2 Distribuované senzorické systémy

U tohoto typu senzorů dochází k měření veličiny v celé délce optického vlákna. Obecně je u distribuovaných senzorů vyhodnocován zpětný rozptyl. Nosný optický signál se šíří od zdroje záření (laseru) k detektoru, část tohoto záření se zpět vrací formou rozptylu, který vznikl na nehomogenitách optického vlákna.

Rozlišují se tři základní typy rozptylů – Ramanův, Rayleighův a Brillouinův. Rozdíl mezi jednotlivými rozptyly tvoří u každého jiný frekvenční posun v Stokesovu nebo anti-Stokesovu pásmu. Zdrojem záření bývají v těchto systémech úzkopásmové lasery, zesílené na maximální možnou úroveň pomocí zesilovačů.

Největší výhodou těchto systémů je měření velkého množství veličin podél celého optického vlákna současně. [13] [17]



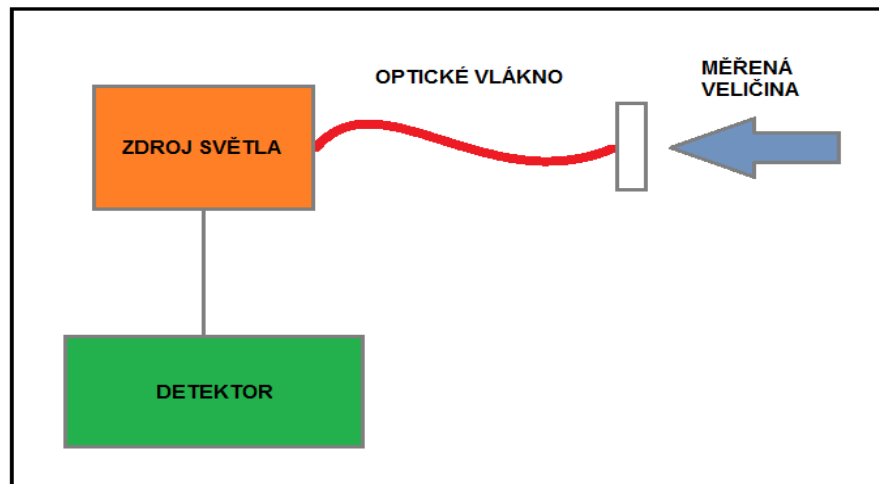
Obrázek 12 Blokové schéma distribuovaného systému

2.2.3 Bodové a semi-distribuované systémy

K měření veličiny u tohoto druhu senzorů dochází v určitém, zpravidla několik milimetrů až centimetrů dlouhém místě vlákna, ve kterém je vytvořena měřicí struktura.

Obecně tyto senzory rozdělujeme podle toho, kde je světelné záření modulováno na:

- Senzory s vnější modulací – záření vyvázáno z vlákna ven a navázáno znovu do vlákna
- Senzory s vnitřní modulací – modulace světelného záření probíhá uvnitř optického vlákna



Obrázek 13 Blokové schéma bodových senzorů

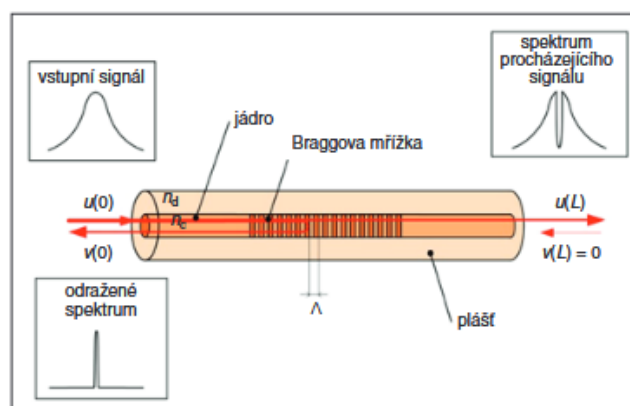
V současné době je využíváno spíše senzorů s vnitřní modulací – senzory FBG (Fiber Bragg Grating) založené na Braggových mřížkách nebo Fabry-Pérot rezonátorech.

2.2.3.1 Senzory FBG (Fiber Bragg Grating)

Braggovy (vláknové) mřížky jsou tvořeny periodickou změnou indexu lomu jádra podél osy vlákna. Tato periodická struktura tvoří Braggovo zrcadlo, na které je vázáno procházející a odražené optické záření.

Vláknové mřížky fungují vlastně jako optické pásmové filtry, které odráží optické záření o vlnové délce velmi podobné Braggově rezonanční vlnové délce, a záření odlišných vlnových délek propouští. Struktury FBG jsou nejčastěji zapisovány UV laserem pomocí bočního osvětlení skrze fázovou masku.

Senzorické systémy s FBG senzory jsou zejména využívány pro měření teploty, tlaku a tahu v průmyslových aplikacích, pro monitorování stavebních útvarů a infrastruktur, v energetice, stavebnictví, letecké technice, aj. [13] [17]



Obrázek 14 Princip činnosti FBG senzorů [17]

2.3 Aplikace optických senzorů v leteckém průmyslu

V současnosti nacházejí kompozitní materiály stále více uplatnění ve všech odvětvích průmyslu, a jinak tomu není ani v průmyslu leteckém. Aby ovšem mohly být tyto materiály použity v letecké technice, musí splňovat obrovské množství kritérií tak, aby byla dodržena zejména bezpečnost letového provozu. Proto musí být tyto struktury navrženy naprosto bezchybně, a také je nutné, aby byly pravidelně kontrolovány a sledovány z hlediska poškození, deformací, únavy materiálu apod.

V posledních letech se právě pro tyto účely ukázaly optické vláknové senzory jako vynikající způsob k monitorování stavu kompozitních struktur (Structural Health Monitoring – SHM) v reálném čase.

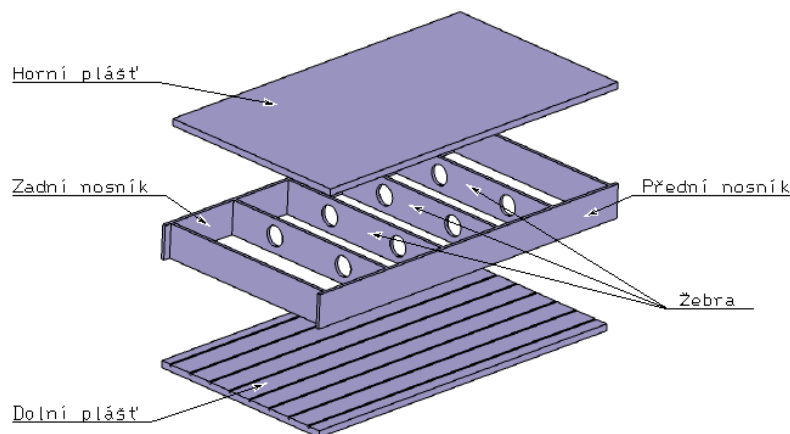
Tyto technologie jsou instalovány zejména kvůli výhodám jako je odolnost proti elektromagnetickému rušení, minimalizace rozměrů senzoru, jejich nízká hmotnost, široké pásmo použití, a hlavně možnost samotné integrace senzoru do kompozitní struktury. [18]

2.3.1 Aplikace senzorů FBG

2.3.1.1 Sledování napětí v konstrukcích křídel

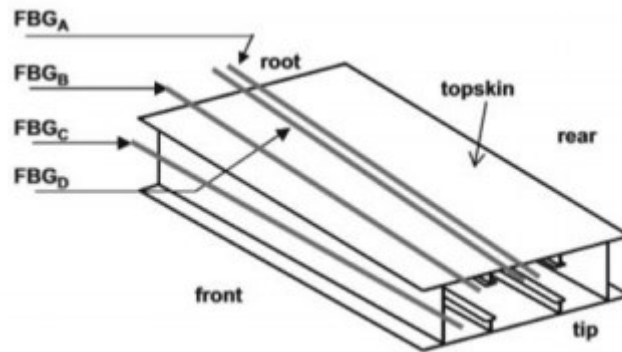
Kompozitní materiály jsou využívány hlavně pro nosné primární konstrukce, jako jsou křídla nebo jiné konstrukční prvky větších rozměrů.

Konstrukční skříň křídla se skládá většinou z horní a dolní kompozitní části (plášť), z přední a zadní části tvořené „I“ paprsky (nosníky), a vnitřních výztuh (žeber). [18]



Obrázek 15 Zjednodušené schéma křídla letadla

Pomocí zabudování FBG senzorů je možné monitorovat například dynamické pnutí v nosníku nebo v náběžné hraně křídla, ohyb nosníku nebo také šíření trhlin v křídle letadla apod.



Obrázek 16 Schéma rozmístění optických senzorů ve struktuře [18]

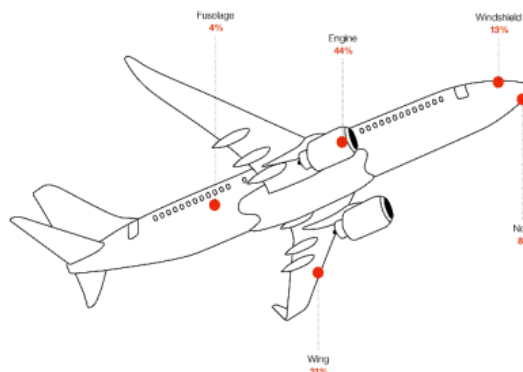
Tento typ monitorovacího systému by byl obecně vhodný pro detekci relativně pomalých dynamických procesů například ve velkých kompozitních strukturách. [18]

2.3.1.2 Detekce poškození nárazem

Detekce a lokalizace dopadu má při monitorování kompozitních leteckých struktur a konstrukcí ten nejvyšší význam. Hlavním problémem je mechanická pevnost vnějších kompozitních obalů, které by měly odolávat i větší deformaci bez vzniku trhlin, i když dojde k poškození spodní struktury.

Metody pro monitorování výskytu a polohy poškození bývají založeny na detekci rázových vln pomocí FBG senzorů umístěných na povrchu letadla (příp. lehce pod povrchem), a vysokorychlostních vyšetřovacích systémů.

Nejpravděpodobnější příčinou poškození letadla nárazem bývá úder ptáků, krupobití nebo blesky. [18]

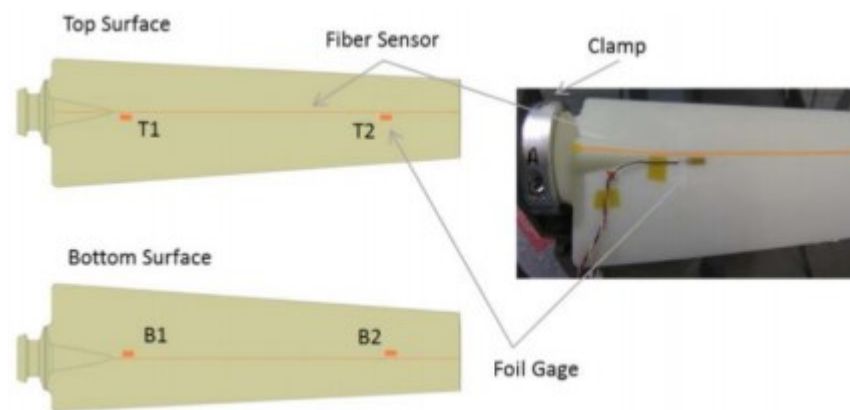


Obrázek 17 Nejvyšší pravděpodobnost nárazu ptáka [18]

2.3.2 Aplikace distribuovaných senzorů

2.3.2.1 Sledování napětí v konstrukčních prvcích

V současnosti se zlepšila dostupnost také distribuovaných systémů, což nám otevírá mnohé možnosti pro použití této senzorky v oblasti letectví. Tak jako u FBG senzorů mohou být tyto senzory využity zejména pro monitorování napětí, deformací a jiných veličin. Oproti FBG senzorům dokážou však tyto senzory díky svému principu měřit danou veličinu v celé délce optického vlákna. [18]



Obrázek 18 Umístění optického vlákna (senzoru) na lopatce ventilátoru [18]

3 ODPOROVÉ SENZORY

Odporové snímače jsou pasivní snímače, u kterých je měřená veličina (vnější podnět) převáděna na změnu elektrického odporu. Aby mohlo dojít k vyhodnocení těchto změn v elektronických obvodech, musíme zde použít pomocné napájecí napětí – proto spadají tyto senzory do kategorie pasivních.

Vnější podnětem, který způsobí v elektrickém obvodu změnu odporu může být:

- změna polohy nebo rozměru předmětu (kontaktní a potenciometrické senzory)
- změna rozměrů (tenzometrické senzory)
- teplota okolí (teplotní senzory)
- elektromagnetické tepelné záření
- magnetická indukce
- emise viditelného světla

Tato skupina snímačů je rozšířena a používána pro měření neelektrických veličin, jako jsou např. deformace, posun, teplota apod. Mezi jejich hlavní výhody patří zejména spolehlivost, přesnost, široké spektrum použití, a také nízké pořizovací náklady. [1] [19]



Obrázek 19 Odporové senzory teploty [20]

3.1 Druhy odporových senzorů

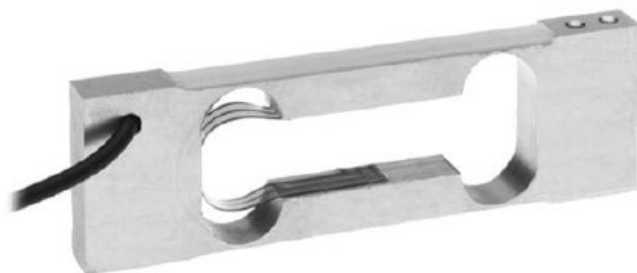
Obdobně jako u senzorů optických i senzory odporové lze dělit dle různých hledisek.

Mezi odporové senzory patří: [19]

- Kontaktní odporové senzory
- Odporové senzory využívající stykového odporu
- Odporové senzory deformace – **TENZOMETRY**
- Odporové senzory polohy – potenciometry
- Odporové senzory rychlosti prostředí
- Odporové senzory teploty
- Odporové senzory vakua
- Odporové analyzátory plynů
- Odporové senzory záření
- Odporové senzory magnetických veličin
- Odporové senzory vlhkosti
- Odporové senzory elektrolytické

3.2 Odporové senzory deformace – TENZOMETRY

Odporový tenzometr je senzor, který reaguje na vnější podnět od mechanického napětí nebo tlaku změnou svého elektrického odporu, jehož důsledkem je jeho vlastní deformace. Jedná se tedy o metodu nepřímého měření, kdy je poměrné prodloužení určováno právě na základě změny tohoto odporu. Ke změně elektrického odporu dochází při mechanickém zatížení v oblasti pružných deformací materiálu, což jsou oblasti, ve kterých platí Hookův zákon. Ve velkém množství případů jsou tyto změny vyvolány tlakem nebo tahem. [19]



Obrázek 20 Odporový tenzometr [7]

3.2.1 Rozdělení tenzometrických senzorů

Tenzometry se dělí podle jejich konstrukčního řešení, podle typu měření nebo materiálu senzoru.

Rozdělení:

Dle konstrukce

- S volným odporovým článkem (příložné)
- S odporovým článkem na podložce (lepené)

Dle měření

- Statická
- Dynamická

Dle materiálu

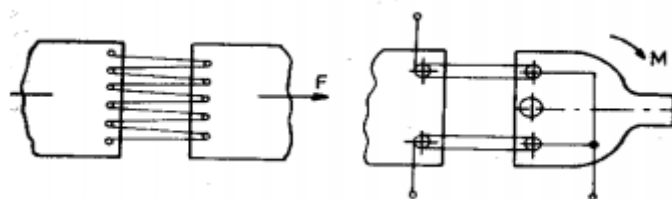
- Kovové – s kruhovým průřezem vodiče
 - s obdélníkovým průřezem vodiče
- Polovodičové – homogenní (bez přechodu)
 - homogenní vytvořené v polovodičovém pružném prvku
 - s jedním nebo více PN přechody

3.2.1.1 Kovové tenzometry

Senzory s volným odporovým článkem (příložné)

U příložných senzorů jsou odporové drátky uchyceny pouze přes soustavu držáků, a aktivní odporový článek není přilepen. Nejsou zde proto problémy s přenosem deformace na celý povrch článku a mohou být použity při vysokých teplotách.

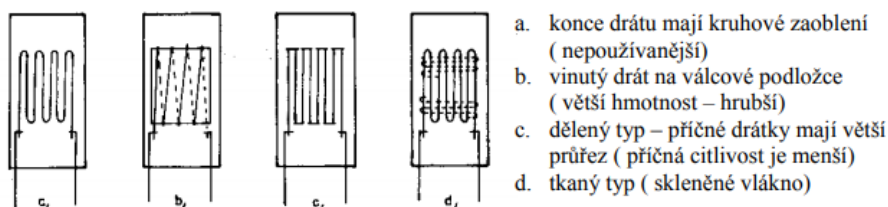
Využívají se například pro měření tlakových sil, deformací objektů, měření zatížení nosníků a mostů apod. [19]



Obrázek 21 Základní princip příložných tenzometrů [19]

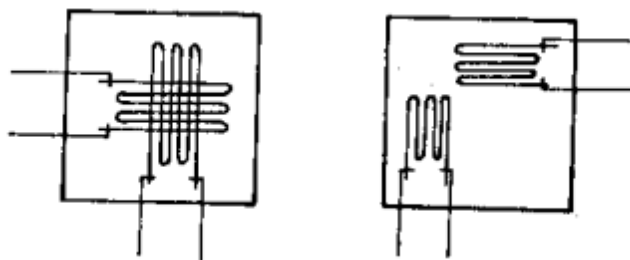
Senzory lepené

Tento typ odporového článku je ve tvaru mřížky přilepen na podložce, která je pak celá přilepena na měřený objekt nebo součást. Pro správné přenesení měřené deformace je zde nezbytné, aby byl tenzometr nalepen správně na měřenou část.



Obrázek 22 Základní typy lepených tenzometrů [19]

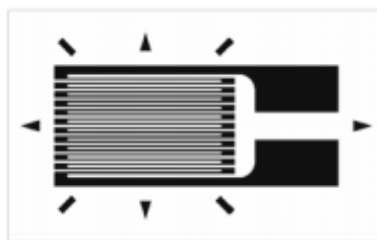
Je-li potřeba měřit deformace ve více směrech, využíváme **sdužené tenzometry**, u kterých je na podložce umístěno více vhodně orientovaných vinutí.



Obrázek 23 Sdužené senzory [19]

Do kategorie lepených snímačů se řadí i speciální, tzv. **fóliové tenzometry**.

Fóliové tenzometry jsou v současnosti jedním z nejvyžívanějších druhů tenzometrů. Vyrábí se v nejrůznějších tvarech a skupinách pro měření tvarových objektů a sil působících z různých směrů. Jsou vyráběny z fólie tloušťky 1 až 10 μm . Tato fólie je nalepena na podložku stejně tak, jak je tomu u lepených senzorů. Výhodou je vysoká citlivost, větší přesnost měření, pracovní rozsah a schopnost snášet větší zatížení elektrickým proudem. [7] [19]



Obrázek 24 Fóliový tenzometr [19]

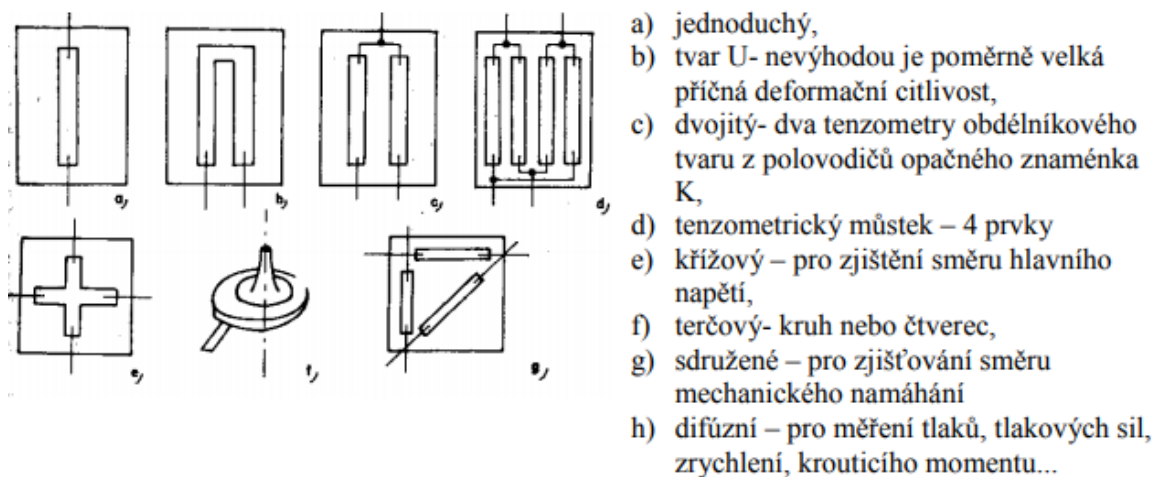
3.2.1.2 Polovodičové tenzometry

Polovodičové tenzometry jsou založeny na principu piezorezistence, což je vlastně změna elektrického odporu v závislosti na deformaci polovodičového krystalu. Krystalem se rozumí například monokrystal křemíku, či germania. Polovodičové prvky jsou schopny měnit vodivost v širokém rozmezí vlivem vnějších fyzikálních jevů, či přidáním malého množství příměsi do jinak čisté látky polovodiče. Oproti tenzometrům kovovým vykazují polovodičové tenzometry výrazně vyšší citlivost. [21]

Dle materiálu se dělí na: [19]

- Monokrystalické – nejčastějším monokrystalem křemík, germanium či fosfor
- Polykrystalické – umělé směsi jako uhlík, či bakelitový lak (jejich vývoj je ukončen)

Typy polovodičových tenzometrů dle konstrukce:



Obrázek 25 Druhy polovodičových tenzometrů [19]

3.2.2 Využití odporových tenzometrů

Celá tato skupina senzorů bývá použita k měření: [19]

- Tlakové a tahové síly
- Deformací
- Zrychlení
- Tlaku
- Geometrických rozměrů
- Hladiny a průtoku kapalin, aj.

3.3 Aplikace odporových senzorů v leteckém průmyslu

Již před prvním vzletem každého letadla musí být zřejmé chování celé konstrukce letadla v různých situacích. Při těchto zkouškách je nutné zjistit veškeré konstrukční nedostatky tak, aby byla zajištěna maximální možná bezpečnost následného provozu.

Testování únavy konstrukce zahrnuje několik konkrétních aplikací:

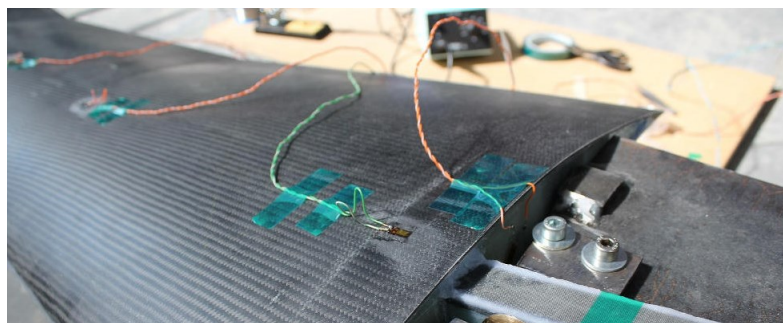
- Zkoušení materiálů – únavové zkoušky
- Zkoušení jednotlivých komponentů letadel jako jsou dveře, křídla, aj.
- Zkoušení v plném rozsahu – únavové zkoušky celé konstrukce letadla a zkoušky konečného zatížení

Právě pro tato testování bývají využívány odporové tenzometry. Při zkoušení leteckých konstrukcí může být využito velké množství těchto senzorů, klidně v řádech tisíců kusů na jednom letadle. Sensory mohou být umístěny jak na povrchu letadla, tak i pod povrchem, například mezi jednotlivými vrstvami kompozitní struktury. [22]



Obrázek 26 Rozmístění tenzometrů na dopravním letadle [23]

Na Obrázku 28 je znázorněno konkrétní umístění tenzometrů na křídle letadla, které jsou použity pro určení velikosti přetvoření křídla a k ověření simulovaných křivek deformace, které byly vytvořeny pomocí simulačního programu. [24]



Obrázek 27 Odporové tenzometry na křídle letounu [24]

4 STRUCTURAL HEALTH MONITORING

Structural health monitoring (dále jen SHM) neboli sledování strukturálního zdraví můžeme definovat jako automatizované metody pro určování nepříznivých změn v integritě mechanických systémů. Cílem SHM systému je poskytnout automatické hodnocení schopnosti struktury plnit zamýšlený účel v reálném čase. Pomocí SHM technologií je možné průběžné sledování struktury, detekovat poškození při jeho vzniku a následně sledovat jeho vývoj. [25]

Všechny konstrukce, ať už se jedná o mosty, vodní a větrné elektrárny, ropovody, tunely, kolejnice, ale také letadla, vlaky, lodě a jiné, jsou během své existence zatěžovány vnitřními nebo vnějšími faktory. Takové faktory mohou u těchto konstrukcí způsobovat nesprávné fungování nebo opotřebení. K tomu může docházet například v důsledku zhoršení stavu, nevhodného postupu při výrobě, nedostatečné kontroly kvality, nebo důsledkem nepředvídatelné situace, jako je například nehoda či působení přírodních vlivů.

Aby bylo možné pozorování strukturálních změn v materiálu a aby mohlo dojít ke správné reakci dříve, než dojde k jeho poškození, je nezbytně nutné, aby byl zaveden systém identifikace těchto poškození. Právě monitorování může včas odhalit různé nedostatky ve strukturách konstrukcí, což zajistí větší efektivitu při provádění akcí spojených s údržbou a opravami, s přímým dopadem na snížení nákladů. [26]

SHM systémy se skládají z: [27]

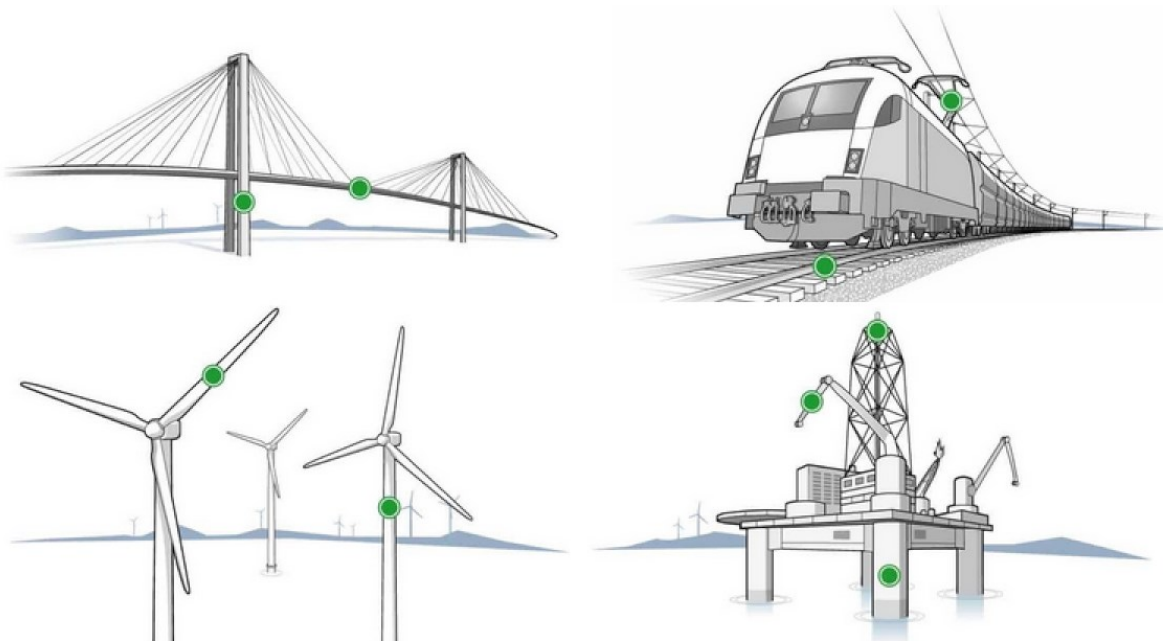
- konstrukce, kterou měří
- měřících senzorů
- systému, který přenáší naměřená data
- systému, který naměřená data zpracovává
- datové struktury
- programu, který naměřená data zpracovává

Mezi největší výhody monitorování patří: [26]

- Zvýšení bezpečnosti
- Průběžné (kontinuální) pozorování
- Automatizace údržby
- Detekce poškození v brzké fázi pro včasnou reakci
- Úspora času, prostředků a nákladů

Využití SHM systémů v různých odvětvích průmyslu: [26]

- Stavebnictví – sledování mostních konstrukcí, budov, silnic, tunelů, aj.
- Letectví – sledování deformací, poškození, rychlostí, turbulencí, aj.
- Železnice – monitorování kolejí, výhybek, nákladu
- Energetika – monitorování větrných elektráren a jejich součástí
- Ropný průmysl – monitorování konstrukcí, jeřábů, potrubí



Obrázek 28 Použití SHM systémů v průmyslu [26]

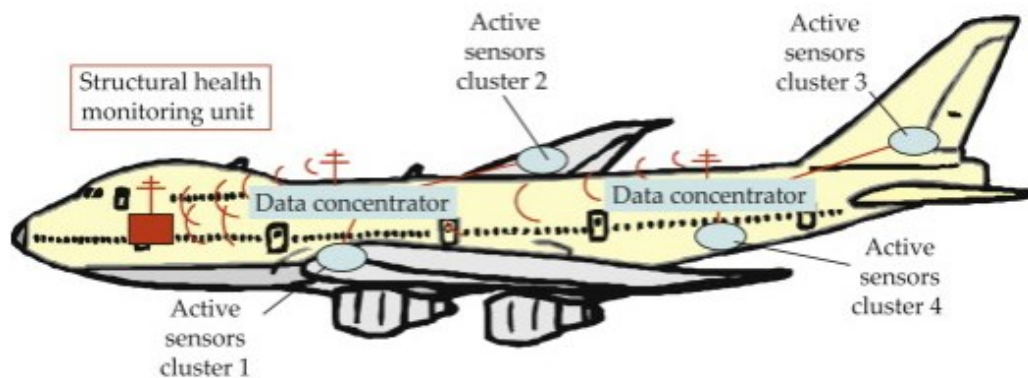
4.1 SHM v leteckém průmyslu

Systémy SHM jsou v leteckém průmyslu používány velmi často, neboť pomocí těchto technologií průběžně dovedou monitorovat strukturu a v případě vzniku poškození sledují jeho následný vývoj.

Technologie SHM jsou založeny na snímání, které monitoruje chování konstrukce, hodnotí její stav a také včas zjišťuje případné poškození struktury. Často jsou do SHM systémů zakomponovány tenzometrické snímače, optické senzory či akcelerometry k monitorování zátěže. Aby bylo možné detekovat poškození, jsou používány také senzory založené na piezoelektrických materiálech.

Pomocí SHM systémů lze například také sledovat a optimalizovat proces vytvrzování, a detekovat pórovitost při samotné výrobě kompozitní struktury v reálném čase.

SHM systémy hodnotí stav aktuálního zdraví a pomocí vhodného zpracování dat mohou předpovědět životnost kompozitních struktur. Dále řeší problémy spojené se stárnutím struktur. Umožňuje kontrolu údržby založenou na stavu místo kontroly prováděné dle určitého plánu. Při samotné integraci SHM systémů do kompozitních struktur letadla lze dosáhnout úspory hmotnosti, velikosti či nákladů. [25]



Obrázek 29 Schéma obecného SHM systému na letadle [25]

K monitorování strukturálního zdraví konstrukcí lze využít dva hlavní způsoby: [25]

- Pasivní SHM
- Aktivní SHM

Pasivní SHM

Zabývá se monitorováním různých provozních parametrů a následně odvozuje stav strukturálního zdraví z těchto parametrů. Například lze sledovat rychlost letu, úroveň vibrací nebo turbulence vzduchu. Poté pomocí algoritmů odvozuje, kolik z „životnosti letadla bylo vyčerpáno, a kolik ještě zbývá“. Tato metoda přímo nezkontroluje, zda došlo k poškození struktury nebo ne.

Aktivní SHM

Zabývá se přímým hodnocením stavu pokusem o detekci přítomnosti a velikosti strukturálního poškození. Metoda umožňuje objevit a předvídat rozsah poruch, a také najít kde jsou tyto poruchy umístěny.

5 PRŮMYSL 4.0 V LETECKÉM PRŮMYSLU (AEROSPACE 4.0)

Název Průmysl 4.0 související s hromadnou digitalizací, automatizací a robotizací výrobních procesů hraje v současné době stále větší roli ve všech průmyslových odvětvích a jinak tomu není ani v průmyslu leteckém. Průmysl 4.0 existuje již nějaký čas a Aerospace 4.0 je součástí této průmyslové revoluce.

V Aerospace 4.0 se setkáváme s aplikací všech nových technologií, které vstupují do odvětví výroby elektroniky. Mezi tyto nové technologie patří například 3D tisk, Big Data, mobilní výpočetní technika, rozšířená realita nebo Internet of Things (IoT). Před nimi se u leteckých společností objevovaly potíže s poskytováním dat zpět do procesu návrhu, výroby a údržby produktu. Nynější digitalizace zajišťuje, že údaje o životním cyklu určitého produktu jsou dostupné v reálném čase, jsou adaptivní a optimalizované.

Nástroje, které tvoří Průmysl 4.0 v letectví, umožní leteckým společnostem zlepšovat kvalitu, snižovat náklady, zvyšovat rychlost práce, snižovat zásoby a plýtvání, a zavést nové produkty.

Důležitou oblastí, ve které hrají tyto technologie významnou roli, jsou výrobní linky. Právě zde se průmysl setkává s mohutnou automatizací a digitalizací, která nabývá stále většího významu. Klíčovým prvkem se u výrobních linek může ukázat analyzování dat. V leteckém či kosmickém výrobním procesu se v minulosti jednalo o přesun produktů z výrobních linek po částech, které byly následně po kompletaci jednotlivých částí podrobeny důkladnému testování. Tento způsob vedl ke značné neefektivnosti, neboť produkt, který v některé z těchto fází nefungoval správně, musel být přepracován a opětovně testován. Takový postup je zdlouhavý, nákladný a může způsobit výrazná zpoždění ve výrobě.

Zavedením nových technologií do výrobních linek a procesů mají výrobci přehled o každé části procesu v reálném čase. To přispívá k minimalizaci prostojů, a umožňuje zavádět zpětnou vazbu a testování v reálném čase v každé z fází výrobního procesu. Neustálý přehled o stavu výroby znamená, že při testování nedochází k takovému plýtvání časem ani prostředky, neboť proces testování probíhá během jednotlivých částí výrobního procesu. Tomu napomáhá datová analýza, kterou dochází ke zpětnému přenosu a zpracování dat do řídicího systému. Zmíněná technologie přispívá k výraznému usnadnění a zvyšuje efektivitu výrobního procesu. [28]

5.1 Internet of Things (IoT) v leteckém průmyslu

Pojem Internet of Things lze vysvětlit jako ekosystém počítačů a chytrých zařízení, či strojů, které mezi sebou dovedou vzájemně komunikovat nebo spolupracovat bez potřeby asistence člověka. Jedná se o elektroniku, která přidáním operačního systému a připojení k internetu získá nové možnosti využití a přínosy i pro běžné činnosti. [29]

V leteckém průmyslu se technologie IoT využívá pro zvýšení efektivity a data generovaná IoT zařízeními přispívají ke zvyšování bezpečnosti letového provozu.

Mezi hlavní přednosti IoT systémů v leteckém průmyslu patří: [30]

- Zjednodušování výroby a snížení zpoždění výrobních procesů
- Analyzování spotřeby energie při výrobním procesu v reálném čase a následně návrh opatření pro úsporu této energie užitím analytických algoritmů
- Poskytování přesných informací pomocí IoT sensoriky z tisíců úhlů, které umožňují monitorovat letadlo za letu a snižují náklady řešením problémů hned po přistání
- Snižování nákladů, času a práce spojené s pravidelnou údržbou pomocí IoT senzorů
- Zvyšování konektivity či rychlosti komunikace

Konkrétní příklady využití IoT systémů v leteckém průmyslu:

Společnost Airbus je jedním z hlavních lídrů ve využívání IoT systémů v leteckém průmyslu. Tyto systémy jsou zde začleněny ve výrobě od údržby, přes náklady na palivo, až po optimalizaci letového provozu. Airbus využívá IoT k získávání dat ze strojů a dopravníků. Tyto data jsou analyzována za účelem vytvoření vizualizace celé montážní linky v reálném čase. Dále jsou také využívány inteligentní měřiče, které poskytují informace o spotřebě energie při výrobě letadel, což může následně vést k významným úsporám výrobních nákladů. [30] [31]

Rolls Royce sjednocuje data ze senzorů IoT a analyzuje tak, aby v reálném čase vizualizovala výkon svých proudových motorů, lopatek a dalších produktů. Data jsou využity pro předpověď možných problémů s výkonem motorů a požadavků pro údržbu. [30]

PRAKTICKÁ ČÁST

6 STANOVENÍ CÍLŮ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Cílem praktické části bakalářské práce bylo:

- Navrhnout vhodnou kompozitní součást pro zabudování senzorů
- Vytvořit 3D model součásti ve zvoleném programu CATIA V5R19
- Zvolit druh výrobní technologie
- Navrhnout materiály pro výrobu
- Zabudovat vhodný typ senzoru do struktury součásti
- Navrhnout formu pro výrobu
- Vytvořit rámcový technologický postup výroby

7 VOLBA KOMPOZITNÍ ČÁSTI A TVORBA 3D MODELU

V leteckém průmyslu jsou kompozitní díly nebo součásti takřka běžnou věcí, a proto zde bylo více možností, kam senzory z hlediska monitorování strukturálního zdraví integrovat.

Při rozmyšlení nad určitým kompozitním dílem jsem se zaměřil na použití tzv. sendvičové struktury, neboť mi z hlediska integrace senzorů přišla nejvíce zajímavá.

Kompozitní částí, která mi přišla jako velmi vhodná pro použití sendvičové struktury, je křídlo letounu – nebo spíše jeho vybraná část.

7.1 Návrh 3D modelu

Při návrhu součásti jsem se zaměřil na tvorbu 3D modelu kompozitní části křídla ultralehkého letounu dle dostupných zdrojů. Samotný návrh modelu byl zaměřen na zjednodušené znázornění sendvičové kompozitní struktury tak, aby bylo možné provést i samotný návrh zabudování optických vláknových senzorů mezi jednotlivé vrstvy kompozitu.



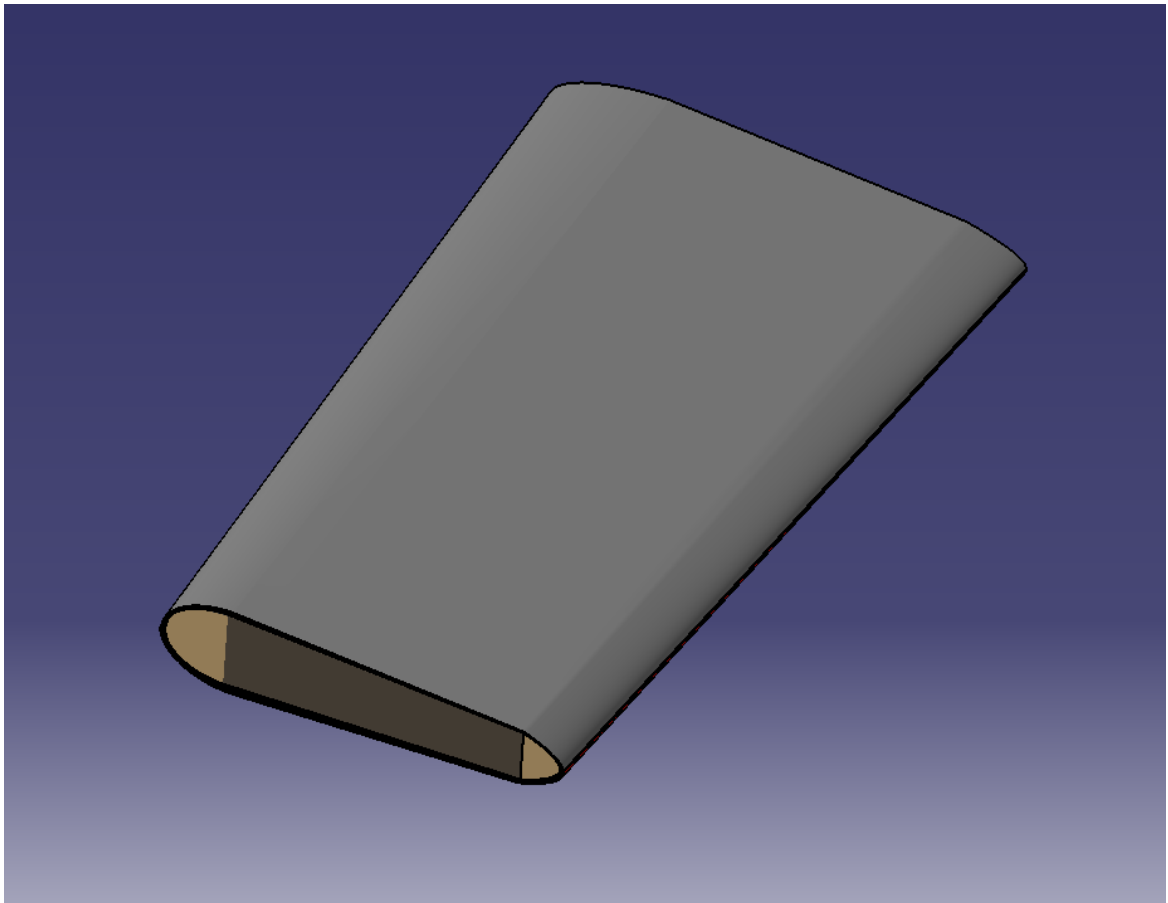
Obrázek 30 Ultralehký kompozitní letoun AirLony Skylane [32]

7.2 Software

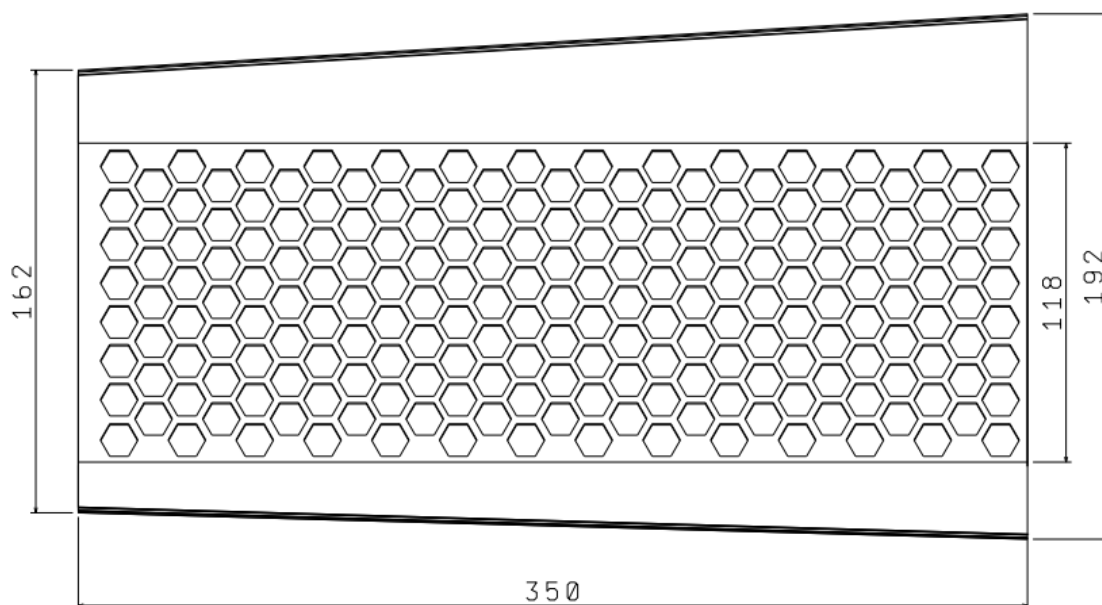
Tvorba samotného 3D modelu probíhala v programu CATIA V5R19. Tento software francouzské společnosti Dassault Systèmes je vhodnou alternativou pro tvorbu 3D modelů součástí pro celou řadu strojírenských aplikací, jako jsou například vstřikovací formy, postupové nástroje pro tváření plechů, 3D tisk či ohýbané součásti. Systém je zejména využíván v automobilovém, či leteckém průmyslu.

7.3 3D model

Při návrhu jsem nevycházel ze skutečných rozměrů křídla či nároků na aerodynamiku křídla apod. Uvedené tvary a rozměry byly voleny z vlastní iniciativy tak, aby alespoň přibližně tvarem odpovídaly skutečné podobě této části.



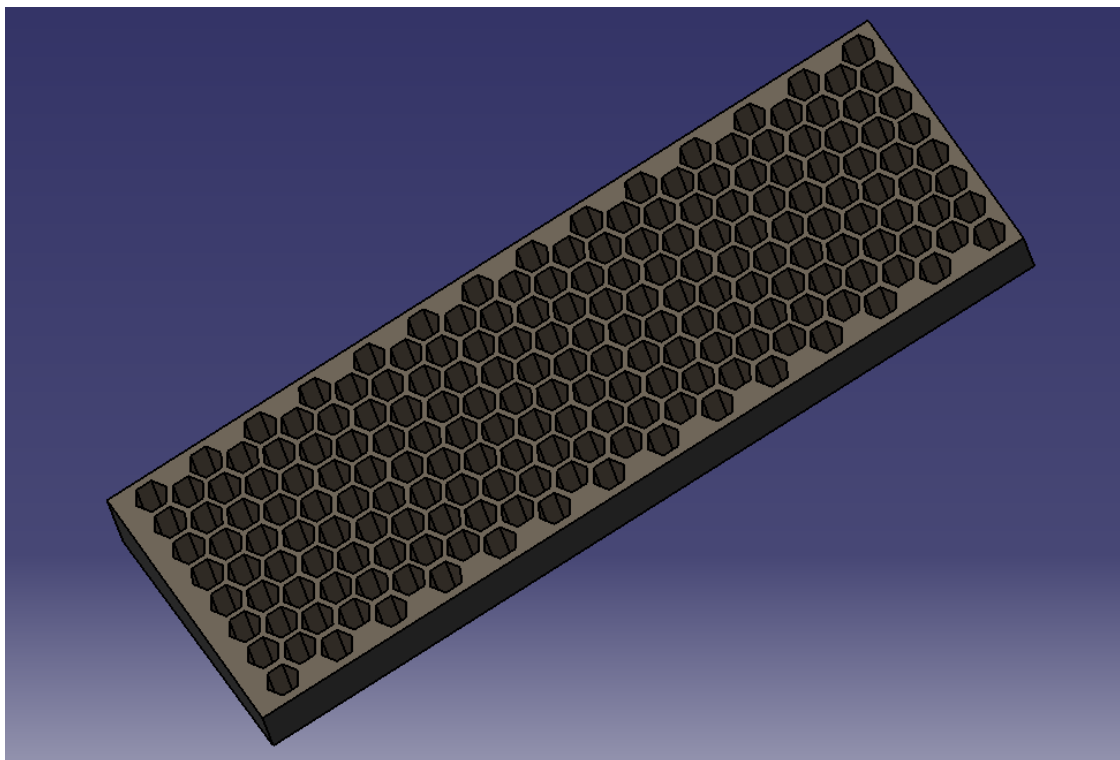
Obrázek 31 3D model kompozitního křídla



Obrázek 32 Hlavní rozměry modelu v milimetrech

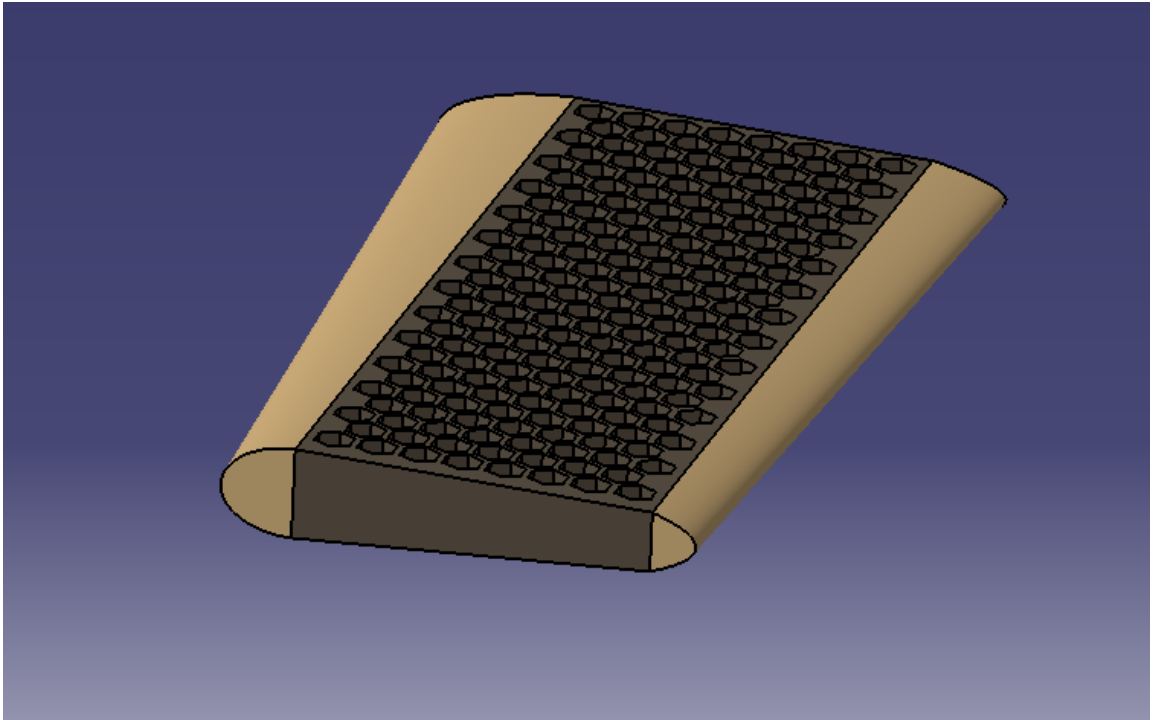
Tvorba modelu probíhala ve třech základních fázích:

- 1) Tvorba voštinové části



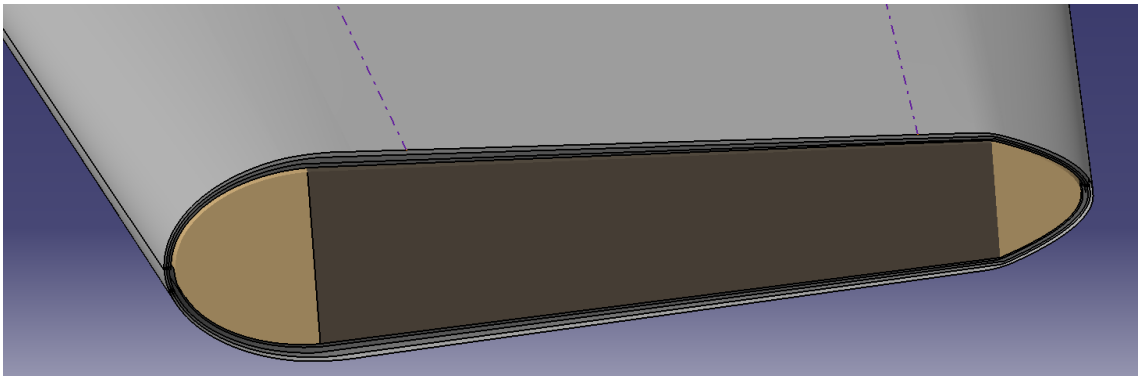
Obrázek 33 Voštinová část modelu

2) Tvorba části z polyuretanové pěny



Obrázek 34 Voštinová část s polyuretanovou pěnou

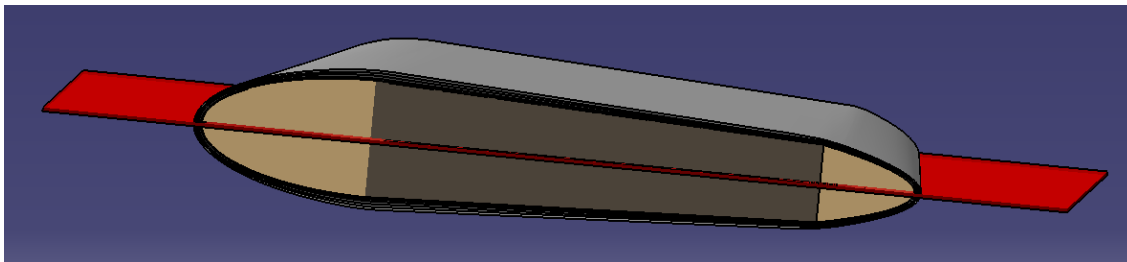
3) Tvorba jednotlivých vrstev kompozitní struktury



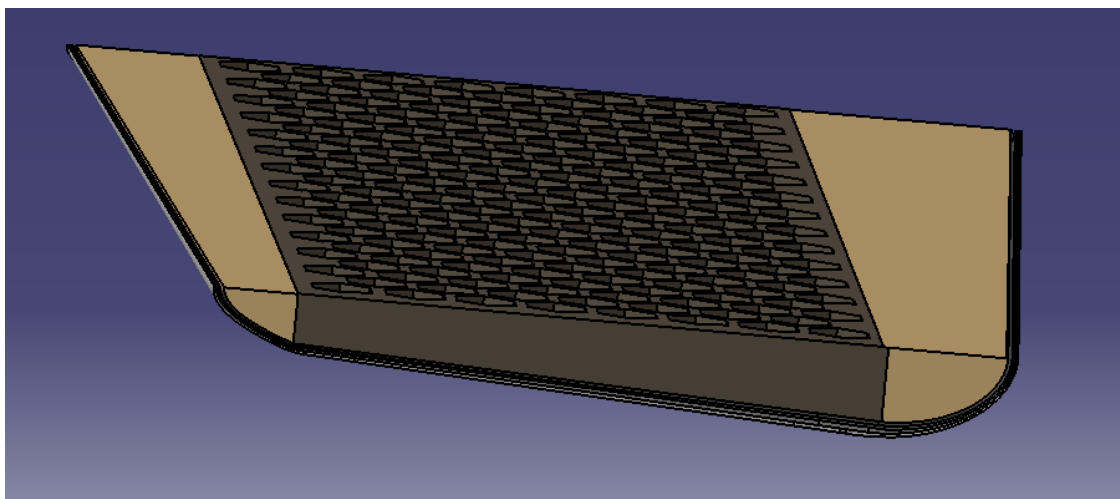
Obrázek 35 Jednotlivé vrstvy struktury

8 VOLBA VÝROBNÍ TECHNOLOGIE

Vzhledem ke strukturnímu složení zvoleného modelu bych navrhnul výrobu tohoto dílu technologií kladení prepregů za současného použití vakuové fólie (neboli pružného vaku), která je pro sendvičové struktury vhodná. Neboť je můj model symetrický dle osy, navrhuji výrobu dvou totožných částí stejným postupem výroby a následná slepení obou polovin k sobě. Rovina, která zároveň naznačuje osu symetrie součásti je znázorněna na Obrázku 36



Obrázek 36 3D model s dělicí rovinou

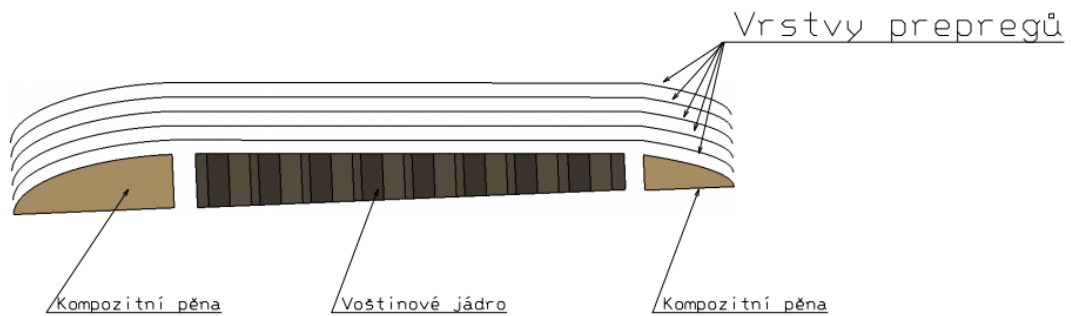


Obrázek 37 Zobrazení 3D modelu v řezu

8.1 Metoda kladení prepregů s použitím vakuové fólie

Princip metody bude spočívat v rozložení pryskyřicí předimpregnovaných materiálů zvaných prepregy do dutiny formy. Jelikož jsem zvolil voštinové jádro výrobku, budou ve formě nejdříve vloženy prepregy a poté až jádro. Jádro není tvořeno pouze voštinou, na přední a zadní části jsou tvarově složité části z vysokopevnostní polyuretanové pěny. Tyto části se budou muset k voštinovému jádru nejdříve přilepit epoxidovou spojovací pěnou, a až poté se začnou vkládat do dutiny formy.

Z hlediska pevnosti struktury a následné aplikace senzorů jsem se rozhodl pro aplikaci pěti vrstev prepregů. Jejich schématické rozložení je vidět na Obrázku 38.



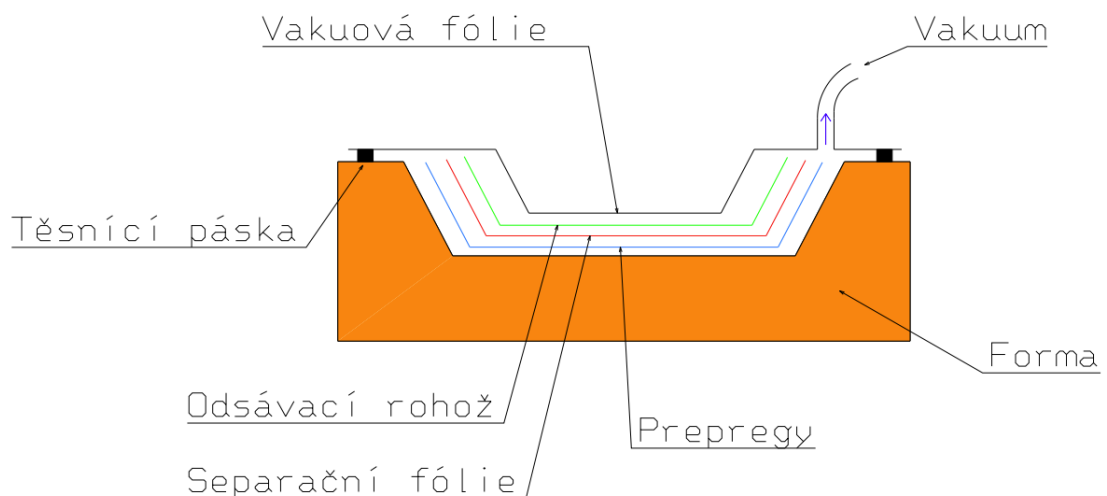
Obrázek 38 Schématické uložení jednotlivých vrstev

Po navrstvení všech zvolených materiálů do formy následuje rozložení dalších materiálů potřebných pro správný postup výroby. Takovým materiálem je odsávací rohož pro správné odsání vzduchu z dutiny formy a následnému odsání přebytečné pryskyřice, a odtrhová tkanina.

Dalším použitým materiálem je separační fólie, která odděluje použité materiály od výsledného výrobku.

V dalším kroku dojde k rozložení a utěsnění vakuové fólie, tak aby bylo možné odsávat vzduch z dutiny formy. Následuje vakuové odsávání přebytečného vzduchu, a tedy i výsledné formování výrobku.

Popis principu této metody je znázorněn na Obrázku 39.

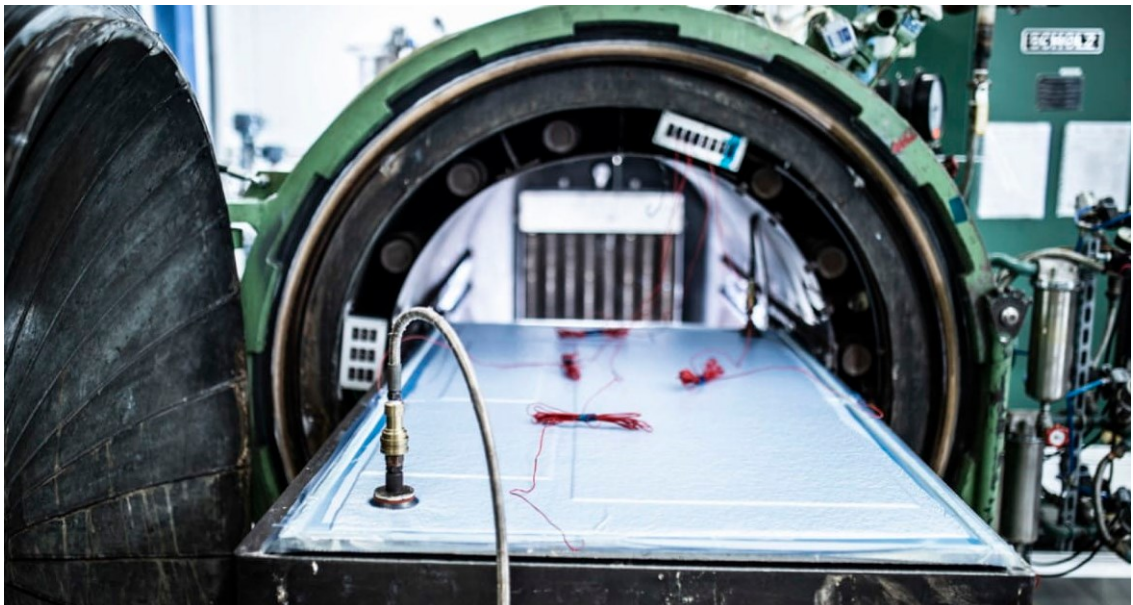


Obrázek 39 Princip technologie kladení prepregů za použití vakua

Jelikož se jedná o technologii kladení prepregů, bude nezbytný ještě další krok procesu, který je nutný pro správné spojení a vytvrzení kompozitní struktury. Tímto krokem je transport celé formy do autoklávu.

Autokláv je speciální tlaková nádoba, ve které je výrobek podroben účinkům vakua, zvýšené teploty a tlaku.

Jedná se o technologicky i finančně nejnáročnější proces výroby, ovšem myslím že je pro tento případ vhodný, neboť se v mém návrhu vyskytuje více druhů materiálů. Pomocí správného nastavení tlaku a teploty v autoklávu dojde k optimálnímu vytvrzení kompozitní struktury.



Obrázek 40 Vytvrzovací autokláv [33]

9 NÁVRH MATERIÁLŮ

Jak je již zmíněno dříve v této práci, celý model se skládá z několika materiálů, které mají rozdílné vlastnosti a jsou vhodné pro různé aplikace v kompozitním dílu.

Jsou to:

- 1) Prepregy pro vnější plášť struktury
- 2) Voštinové jádro
- 3) Polyuretanová pěna na přední a zadní část dílu
- 4) Epoxidová pěna pro spojení voštinového jádra a polyuretanové pěny

9.1 Prepregy

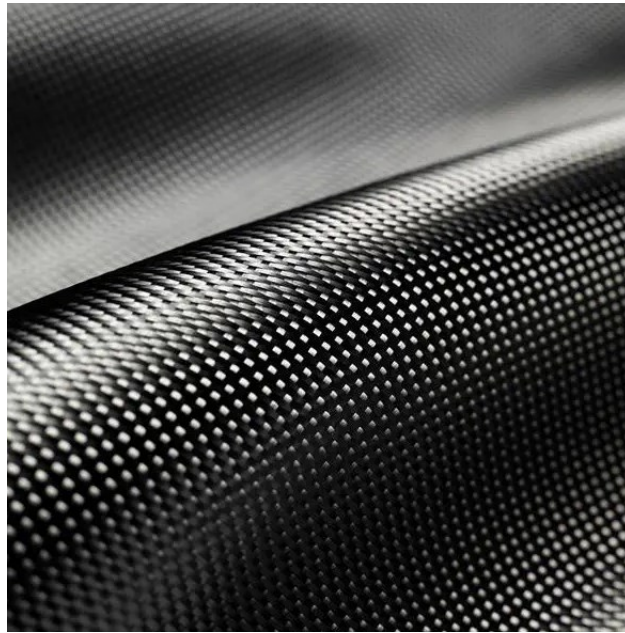
Na vnější část modelu jsem vybíral prepregy z nabídky společnosti Solvay, která poskytuje širokou škálu produktů spojenou s kompozitními materiály.

Konkrétně byl zvolen prepreg z epoxidové pryskyřice **CYCOM® 97714A**, určený pro výrobu kompozitních dílů za použití vakua. Prepreg bude obsahovat jednosměrnou uhlíkovou UD tkaninu, s plošnou hmotností 280 g/m².

Tento prepreg je vhodný pro zpracování v autoklávu či lisu. Velmi důležitá vlastnost je možnost využití v kompozitu, který obsahuje sendvičové struktury, což je pro mou aplikaci důležité. [34]

Další vlastnosti prepregu:

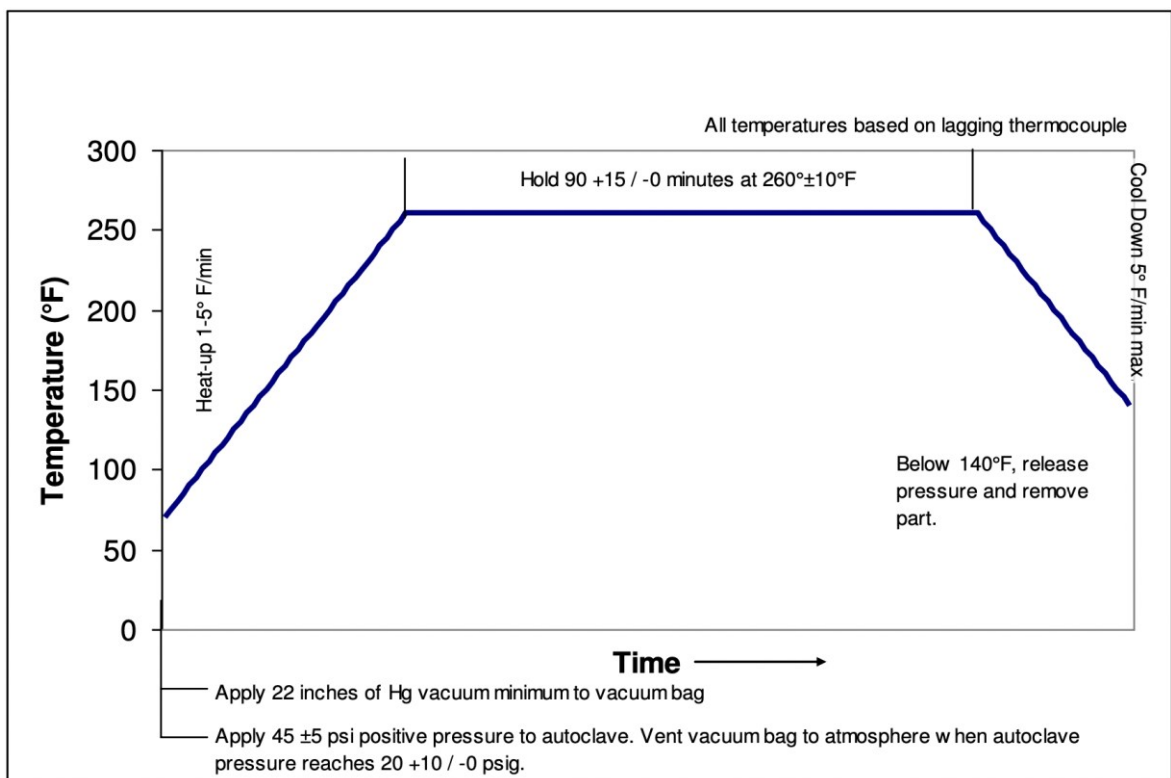
- Splňuje požadavky NASA na odplyňování
- Skladovatelnost 6 měsíců při -18 °C
- Manipulační životnost 10 dní při teplotě 24 °C
- Je vhodný pro výrobu s použitím laminátu, či hybridních struktur
- Možnost společného vytvrzování s ostatními systémy CYCOM® 7701, CYCOM® 7714 a CYCOM® 7714A
- Je ideální alternativou pro využití v leteckém nebo kosmickém průmyslu



Obrázek 41 Uhlíkový prepreg s epoxidovou maticí [35]

Proces vytvrzování:

Standartní doba vytvrzování prepregu jsou dvě hodiny při teplotě 121 °C (250 °F). Vytvrzovací diagram je zobrazen na Grafu 2.



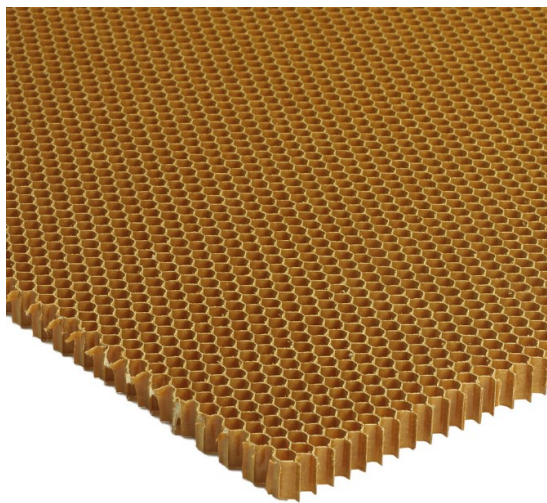
Graf 2 Vytvrzovací diagram prepregu CYCOM® 97714A [34]

9.2 Voštinové jádro

Voštinové jádro také nazývané jako honeycomb, je vnitřní vrstva kompozitní struktury, která ovlivňuje pevnostní vlastnosti modelu. Tato vrstva je použita také kvůli výrazné úspoře hmotnosti, neboť kdyby byl díl například vyroben kompletně z prepregů, byl by výrazně těžší, a také by nedosahoval takových pevnostních vlastností jako s voštinovým jádrem. Rozhodl jsem se zvolit zde jádro **Nomex® HRH-10-9,5-48**, které je vyrobeno z aramidového papíru impregnovaného žáruvzdornou pryskyřicí. Mezi jeho největší přednosti patří extrémní úspora váhy, vynikající mechanické vlastnosti a možnost zabudování do struktury mnoha způsoby. [36]

Vlastnosti jádra:

- Šestihranné (hexagonální) buňky
- Velikost buňky 9,5mm
- Hustota 48 kg/m³



Obrázek 42 Voština Nomex® [37]

9.3 Polyuretanová pěna

Pro vyplnění vnitřních tvarově složitých míst (přední a zadní část modelu) v kompozitní struktuře byla zvolena kompozitní pěna, která bude vyhotovena dle potřebných rozměrů. Tato pěna bude přilepena k voštinovému jádru epoxidovou spojovací pěnou. Jako vhodnou alternativu jsem zvolil tuhou, polyuretanovou pěnu **T-A-FOAM® FR-6710**. Tato pěna vykazuje vysoký poměr pevnosti k hmotnosti, její materiál je odolný a dobře obrobitelný standartními řeznými nástroji z rychlořezné oceli.

Právě obrobiteľnosť hrála v návrhu veľkou roľou, leboť sa budú musieť tieto pěnové časti modelu vyrobiť pomocou presného CNC obrábění. [38]



Obrázek 43 Polyuretanová pěna [38]

9.4 Epoxidová pěna

Pro spojení jádra s polyuretanovou pěnou jsem zvolil epoxidovou spojovací pěnu **FM® 490B**, opět z nabídky společnosti Solvay. Tato pěna se vyznačuje podobnými teplotami vytvrzování jako zvolený prepreg **CYCOM® 97714A**. Pěna je navržena tak, aby došlo k minimalizaci změn ve struktuře buněk vyvolané typickými procesními proměnami, jako jsou rychlost zahřívání, či vakuové podmínky.

Typickým využitím v leteckých konstrukcích je spojování a vyztužování voštinových jader, nebo hranových prvků, což je pro navržený model příhodné. [39]

Další vlastnosti pěny:

- Jednotná buněčná struktura
- Odolnost vůči vniknutí tekutin
- Neobsahuje žádná kovová plniva
- Rozsah pracovních teplot v rozmezí od -55 °C do 177 °C

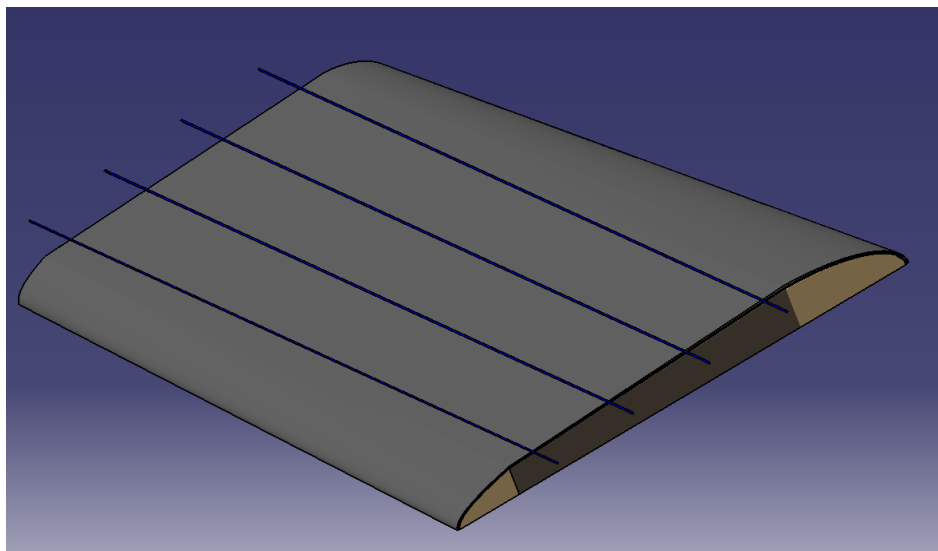
Proces vytvrzování za použití vakua:

- Zahřívání z teploty 75 °F (24 °C) na 225 až 250 °F (107-121 °C) rychlostí 5-10 °F (3-6 °C) za minutu
- Udržování teploty 225 °F-250 °F (107-121 °C) po dobu 90 minut s odchylkou pěti minut
- Chladnutí pod tlakem na méně než 140 °F (60 °C) při 5 °F (3 °C) za minutu

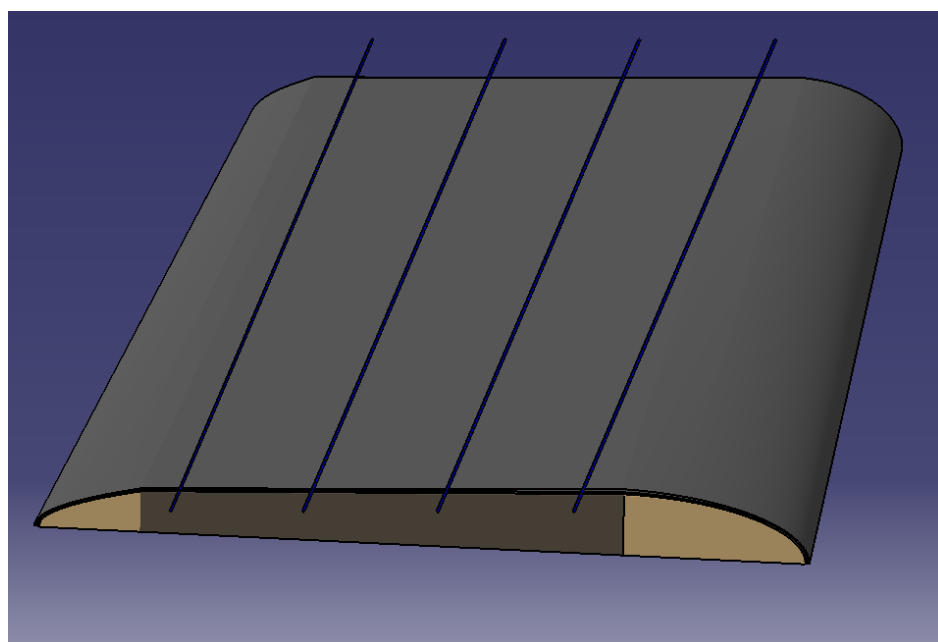
10 ZABUDOVÁNÍ SENZORŮ

Umístěním sensorů do vnitra modelu bude umožněno snímání ohybového napětí kompozitní struktury, i z hlediska dlouhodobého monitorování. V návrhu jsem se rozhodl zabudovat senzory přímo mezi jednotlivé vrstvy prepregů. Při samotné výrobě by zabudování bylo provedeno po položení druhé vrstvy prepregů, následně by byly položeny zbývající vrstvy.

Navrhnul jsem snímání konstrukce pomocí FBG sensorů, z hlediska jejich výborných vlastností pro monitorování kompozitních struktur. Zvolil jsem 4 FBG senzory na každou polovinu křídla, umístěné v podélném směru konstrukce.

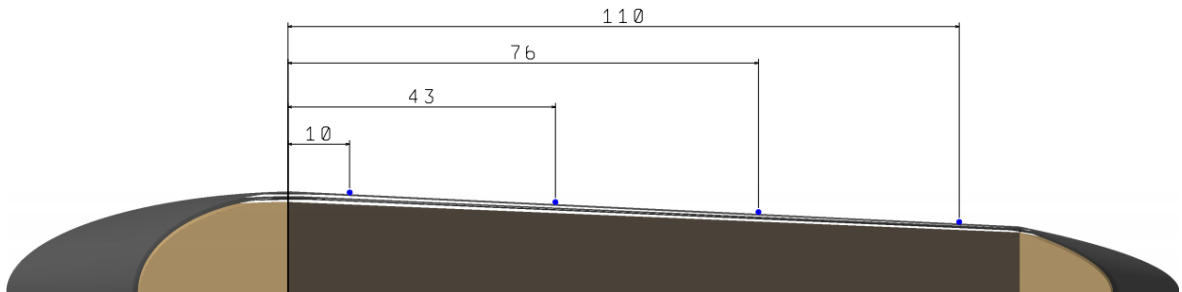


Obrázek 44 Rozmístění FBG sensorů



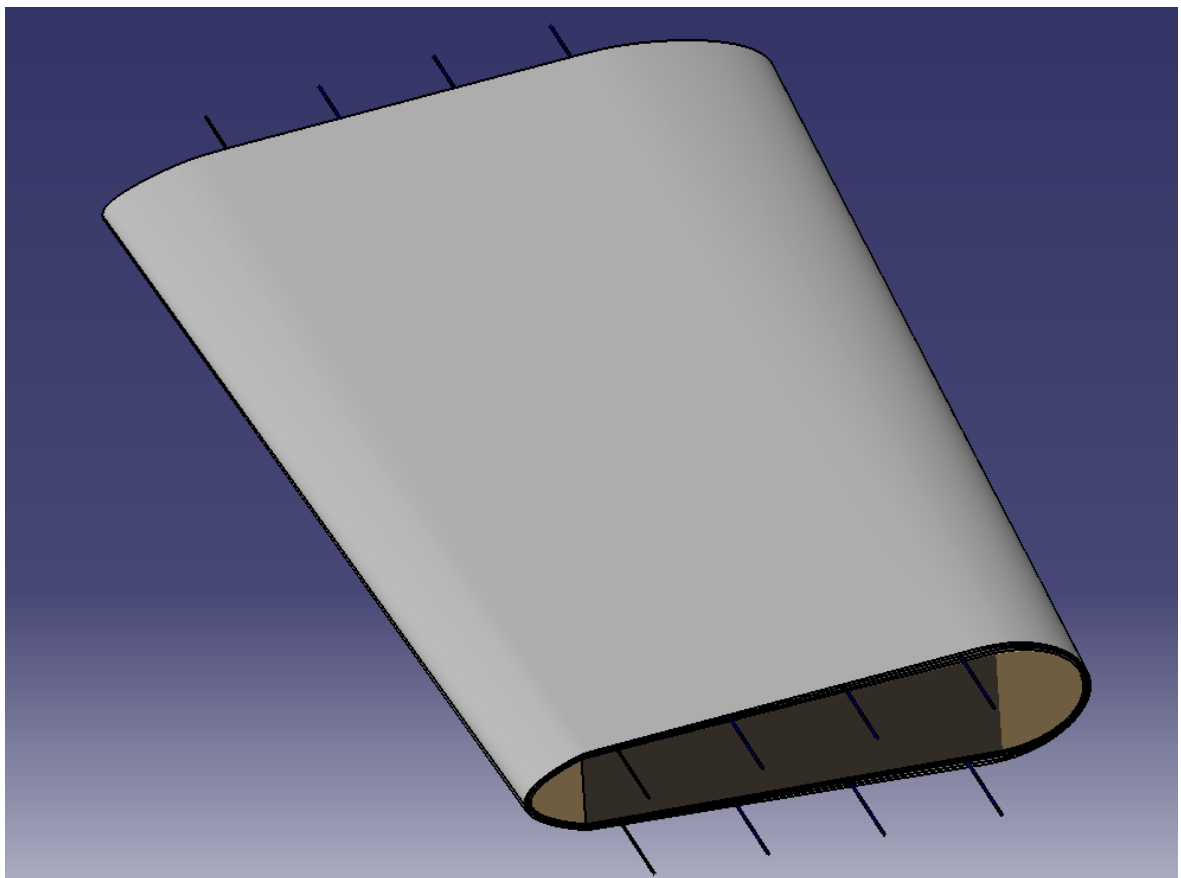
Obrázek 45 Rozmístění FBG sensorů

Při výrobě budou senzory pravidelně rozmístěny téměř po celé části v pravidelných mezerách. Přesné rozmístění je naznačeno na Obrázku 46.



Obrázek 46 Rozmístění senzorů

Po vytvrzení obou částí modelu bude následovat případná úprava, jako je řezání přesahů jednotlivých prepregů a tmelení nedostatků. Po této fázi se obě části přilepí epoxidovým lepidlem k sobě, a vznikne finální podoba celého dílu.



Obrázek 47 Finální podoba dílu

10.1 Senzory FBG

Při návrhu senzorů konkrétního výrobce jsem se zaměřil na produkty společnosti Halliburton Acquires Smart Fibres, která se zaměřuje právě na monitorování strukturálního stavu optickými vlákny v reálném čase. Z široké nabídky jsem zvolil **SmartFBG sensor**, který je svými vlastnostmi velmi vhodnou alternativou pro měření ohybového napětí, právě v namáhané sendvičové struktuře. Jedná se o senzor zaznamenaný uvnitř jádra standardního optického vlákna. Odráží úzkou šířku pásma světla, která spolehlivě reaguje na změny napětí. [40]

Jelikož je senzor vyráběn ve více provedeních, které se liší například naneseným povlakem pro měření za různých teplot, zvolil jsem polyamidový povlak pro měření i za vysokých teplot.

Tabulka 3 Parametry zvoleného senzoru FBG [40]

Střední vlnová délka	od 1528 do 1608 nm
Délka FBG	3 mm
Odrazivost	$\geq 70\%$
3 dB Šířka pásma	< 0.7 nm
SLSR senzor	15 dB
Rozsah napětí	± 9000 μ strain
Napět'ová citlivost	1.2 pm/ μ strain
Napět'ové rozlišení	0.4 μ strain
Teplotní citlivost	11 pm/ $^{\circ}$ C
Teplotní rozlišení	0.05 $^{\circ}$ C
Typ vlákna	Single Mode SMF-28, 9/125 μ m
Povlak	Polyimid
Teplotní rozsah	-270 to +300 $^{\circ}$ C

Klíčové vlastnosti:

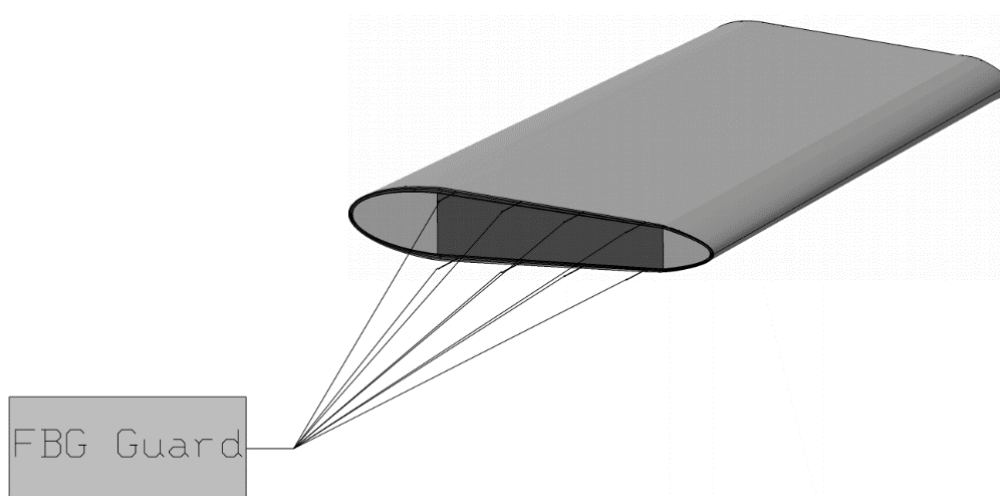
- Vysoká stabilita snímání
- Dostupný jednotlivě nebo s možností více FBG polí v jediném optickém vlákne
- Vhodný pro dlouhodobé monitorování
- Lze použít k výrobě inteligentních senzorů či převodníků
- Vhodný pro vložení přímo do vnitra kompozitu



Obrázek 48 Zvolené optické vlákno s FBG senzorem [40]

10.2 Monitorovací jednotka

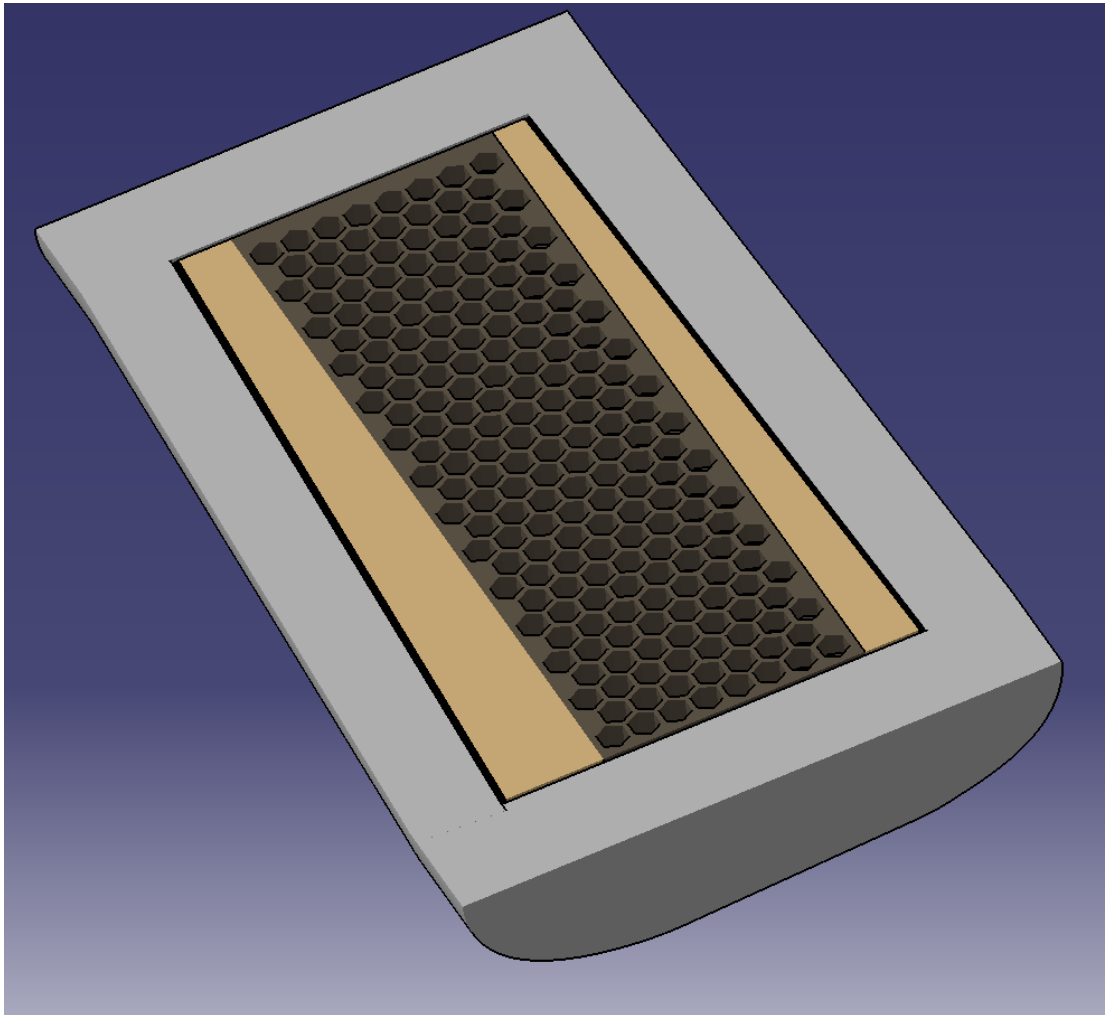
K vyhodnocení dat z FBG senzorů byla zvolena monitorovací jednotka **FBG Guard 1550**. Tato jednotka se vyznačuje vysokou spolehlivostí a přesností přenosu informací z optických vláknových senzorů. [41] Schématické připojení monitorovacího systému k senzorům je na Obrázku 49.



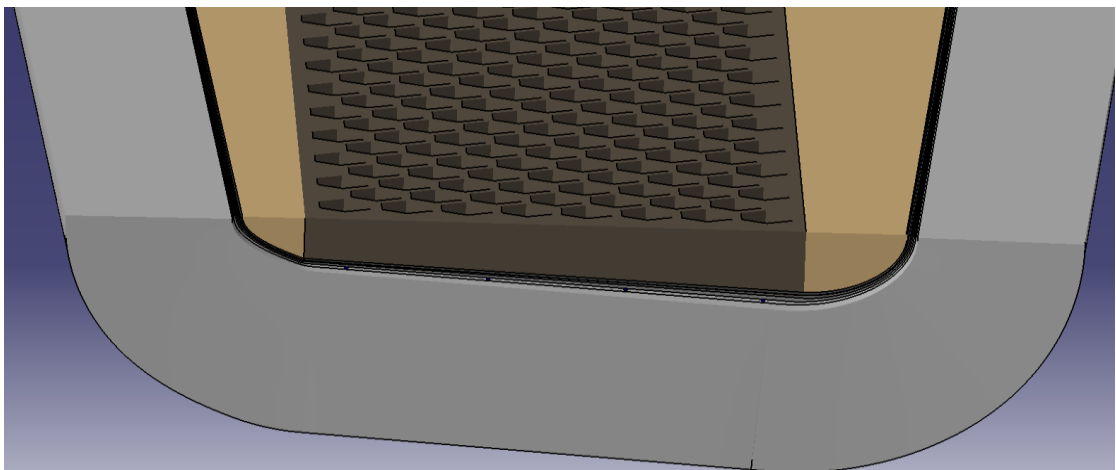
Obrázek 49 Schéma přenosu dat do monitorovací jednotky

11 NÁVRH FORMY

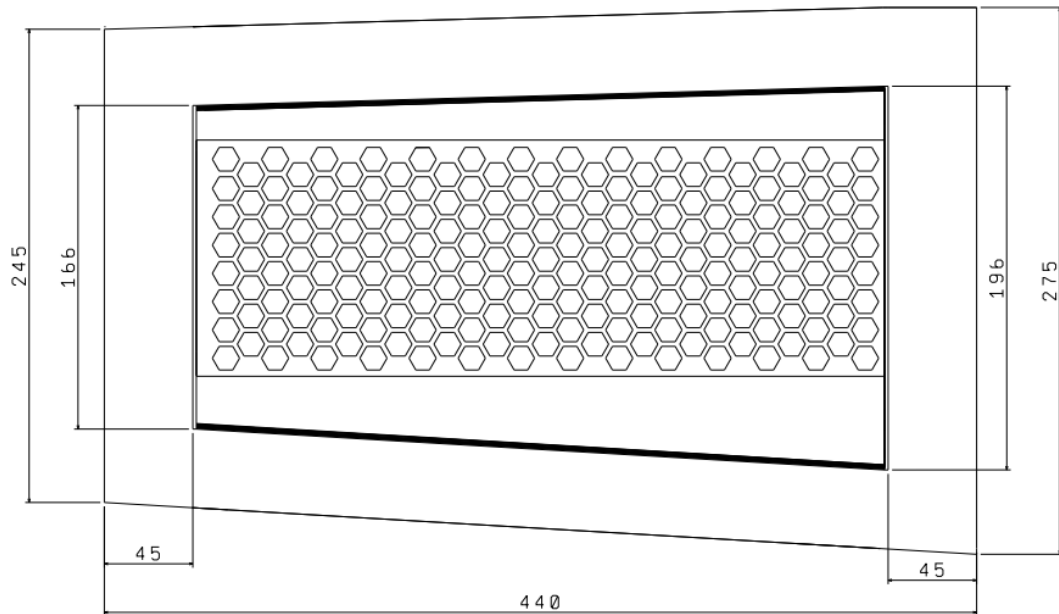
V softwaru CATIA V5R19 byl vytvořen také 3D model formy, ve které bude kompozitní díl vyroben. Umístění celé kompozitní části do formy je znázorněno na Obrázku 50.



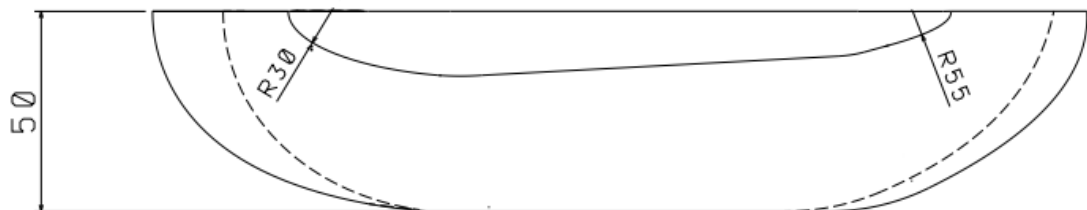
Obrázek 50 Návrh formy



Obrázek 51 Detailní pohled na rozložení jednotlivých vrstev struktury ve formě



Obrázek 52 Základní rozměry formy



Obrázek 53 Celková výška formy

Forma pro výrobu dílu bude vyrobena z hliníkové slitiny **AlCu4Mg** CNC frézováním. Vnitřní část bude leštěná, aby byla zaručena výborná kvalita povrchu kompozitního dílu. Slitina se vyznačuje vysokou pevností, tvoří krátké třísky a má velmi dobrou obrobiteľnosť. [42]

Tabulka 4 Vlastnosti slitiny AlCu4Mg [43]

Označení dle EN AW	Označení dle ČSN	Pevnost v tahu Rm [MPa]	Mez kluzu Rp [MPa]	Tažnost A [%]
2017A	42 4201	360	240	10

12 TECHNOLOGICKÝ POSTUP VÝROBY

Zadaný úkol:

Výroba kompozitního dílu dle 3D návrhu pomocí vakuové fólie, s následným vytvrzením v autoklávu

Použité nástroje a materiály:

- Forma – Forma vytvořená CNC frézováním dle 3D modelu, materiál je hliníková slitina **AlCu4Mg**
- Voskový separátor **Havel AX60-X3**, od společnosti Havel composites [44]
- Aplikátor separátoru ve formě hadříku
- Pryskyřici předimpregnovaný **Prepreg CYCOM® 97714A s uhlíkovým vláknem**, plošná hmotnost 280g/m²
- Technické nůžky
- Vytlačovací váleček
- Voštinové jádro **Nomex® HRH-10-9,5-48**, tloušťky 8 mm, vyrobené z aramidového papíru, s hexagonálním profilem a velikostí jednotlivé buňky 9,5mm
- Polyuretanová pěna **T-A-FOAM® FR-6710**
- Spojovací epoxidová pěna **FM® 490B**
- **SmartFBG sensor**, od společnosti Halliburton Acquires Smart Fibres
- Odtrhová tkanina **50 PLUS**, od společnosti Havel composites [44]
- Odsávací rohož Havel composites, plošná hmotnost 200 g/m² [44]
- Separální fólie **PP40**, od společnosti Havel composites [44]
- Vakuová fólie **PO180**, od společnosti Havel composites [44]
- Těsnící páska tloušťky 12 mm, od společnosti Havel composites [44]
- Epoxidové víceúčelové lepidlo **Adhesive G40**, od společnosti Havel composites [44]
- Vakuová pumpa
- Vytvrzovací autokláv
- Jemný dokončovací tmel – **HAVELfillerSP**, od společnosti Havel composites [44]

Poznámka:

*V tomto postupu byly použity vlastní fotografie z laboratorních cvičení předmětu **Zpracovatelské inženýrství kompozitů**. Tyto materiály budou alespoň principiálně popisovat postup výroby kompozitního dílu.*

Postup výroby:

Prvním výrobním krokem bude očištění formy od nečistot. Poté se pomocí příčných a podélných tahů aplikuje do formy separátor, který slouží ke zvýšení kvality samotného dílu. Tento postup se bude opakovat 3x.

Princip separování formy – skleněné desky, je znázorněn na Obrázku 54.



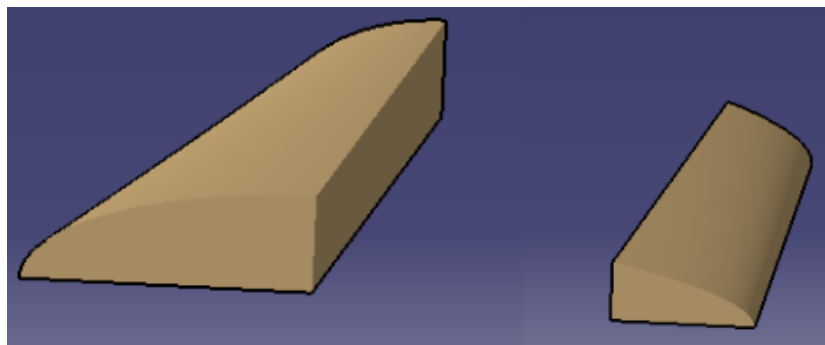
Obrázek 54 Nanášení separátoru na povrch formy

Následuje příprava prepregů. Ta se provádí technickými nůžkami, kterými se prepreg nastříhá na rozměry 35x23cm (i s technologickým přídavkem pro finální ořez). Tento krok se provede celkem 5x, neboť bylo zvoleno 5 vrstev prepregů.



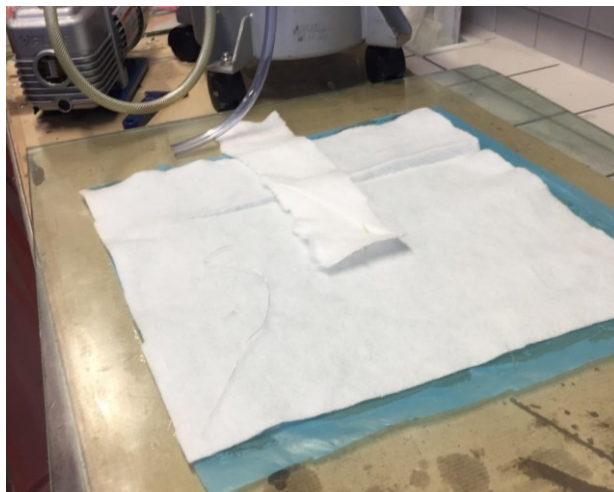
Obrázek 55 Stříhání prepregů

Dalším krokem bude CNC frézování polyuretanové pěny na výsledný rozměr dle 3D modelu. Pěna bude obráběna stopkovou frézou z rychlořezné oceli (HSS).



Obrázek 56 Polyuretanová pěna

Následujícím krokem bude příprava vakuové fólie, odsávací rohože, separační fólie a odtrhové tkaniny, které budou rozstříženy na totožné rozměry jako prepregy.



Obrázek 57 Separací fólie (modrá barva) a odtrhová tkanina (bílá barva)

V další fázi následuje příprava voštinového jádra, které bude rozstříženo na rozměry 12x35cm. Poté dojde ke spojení voštinového jádra s polyuretanovými částmi dílu pomocí epoxidové spojovací pěny. Od tohoto kroku se postupně do formy začnou ukládat prepregy. Po uložení druhé vrstvy prepregů, následuje aplikace FBG senzorů tak, aby mezi nimi byly pravidelné mezery dle Obrázku 46.

Ihned poté budou uloženy do formy zbývající vrstvy prepregů, následované voštinovým jádrem s polyuretanovými částmi.

Po tomto kroku se přiloží separační fólie a odtrhová tkanina přes celý díl a také přes část formy. Ihned následuje aplikace vakuové fólie na které je již předpřipravena těsnící páska.



Obrázek 58 Lepení těsnící pásky na vakuovou fólii

Následuje aplikace hadice, utěsnění veškerých netěsností a samotné odsávání vzduchu z prostoru formy. Proces vakuování je zobrazen na Obrázku 59.



Obrázek 59 Použití vakuové pumpy

V předposlední fázi bude celá forma transportována do autoklávu, ve kterém dojde k vytvrzování kompozitní struktury za zvýšených teplot.

Vytvrzování bude spočívat v pozvolném zvyšování teploty (okolo 3°C za minutu) v autoklávu až na teplotu 121 °C, následuje výdrž na této teplotě po dobu dvou hodin a pozvolné ochlazování (opět 3 °C za minutu) až na konečnou teplotu okolí. Celý proces bude probíhat za přetlaku 0,18MPa.

V posledním výrobním kroku první části dílu dojde k ořezání okrajů prepregu.

Následuje opakování stejného výrobního postupu pro druhou polovinu kompozitního dílu, neboť bude použita pouze jedna forma.

Po konečném ořezání okrajů druhé poloviny budou obě části slepeny k sobě epoxidovým lepidlem.

Ve finálním kroku následuje broušení a tmelení případných nerovností, celý proces bude ukončen nástřikem hotového kompozitního dílu bílou barvou.

K úplnému vytvrzení lepeného spoje dojde po 24 hodinách.

12.1 RÁMCOVÝ TECHNOLOGICKÝ POSTUP

Tabulka 5 Rámcový technologický postup

Číslo operace	Název operace	Použité pomůcky	Technologický čas
1.	Příprava a separace formy	Separátor Havel AX60-X3	30 minut
2.	Příprava prepregů	Technické nůžky	25 minut
3.	CNC frézování PU pěny	CNC frézka Stopková HSS fréza	30 minut
5.	Příprava pomocných technologických materiálů	Odrhová tkanina 50 PLUS	5 minut
		Separáčnická fólie PP40	5 minut
		Vakuová fólie PO180	5 minut
		Odsávací rohož	5 minut
4.	Příprava voštiny	Technické nůžky, zalamovací nůž	10 minut
6.	Vlastní kladení prepregů do formy – 2 vrstvy	Forma Vytlačovací váleček Prepregy CYCOM® 97714A	20 minut
7.	Zabudování FBG senzorů - 4 senzory	SmartFBG senzor	30 minut

Tabulka 6 Rámcový technologický postup

Číslo operace	Název operace	Použité pomůcky	Technologický čas
8.	Kladení zbývajících vrstev prepregů – 3vrstvy	Forma Vytlačovací váleček Prepregy CYCOM® 97714A	30 minut
9.	Polohování PU pěny a voštinového jádra	PU pěna T-A-FOAM® FR-6710 Voštinové jádro Nomex® HRH-10-9,5-48	20 minut
10.	Vakuování	Vakuová pumpa	30 minut
11.	Vytvrzení v autoklávu	Autokláv	120 minut
12.	Ořezání přesahů	Ruční nůž	10 minut
13.	Výroba druhé poloviny dílu stejným způsobem	Totožné jako v operacích 1-12	375 minut
13.	Lepení jednotlivých částí k sobě	Epoxidové lepidlo G 40	50 minut
14.	Tmelení a broušení hran	Tmel HAVELfillerSP Brusný papír	20 minut
Celkový technologický čas			820minut = 13hod. 40 min

ZÁVĚR

Cílem bakalářské práce byl návrh integrace vhodného typu senzoru do kompozitní struktury formou 3D návrhu dílu, zaměřeného na letecký průmysl. Jako model byla vyhotovena zjednodušená část křídla letounu dle zvolených rozměrů tak, aby bylo možné do této struktury následně umístit konkrétní typ senzorů.

Teoretická část práce se zabývala senzory obecně, kde byl popsán jejich princip a také rozdělení dle různých hledisek. Následovalo podrobnější zaměření na senzory optické a odporové, které se v hojném počtu vyskytují v leteckém průmyslu a kosmonautice. Celá teoretická část byla zakončena kapitolami věnovanými monitorování strukturálního zdraví a také digitalizaci, které mají v leteckém průmyslu obrovský význam.

Praktická část obsahovala jednotlivé kapitoly, které jsou již zaměřeny na tvorbu konkrétního 3D modelu. Nejprve byla zvolena vhodná kompozitní součást, do které budou senzory integrovány. Touto součástí bylo zjednodušené křídlo ultralehkého letounu. Poté následovala samotná tvorba zjednodušeného 3D modelu. V další kapitole byla navržena konkrétní výrobní metoda, která by mohla být použita na výrobu této součásti. Jako vhodná výrobní metoda byla zvolena metoda ručního kladení prepregů, za použití vakuové fólie s následným vytvrzením celé kompozitní součásti v autoklávu. Další kapitola se zabírala konkrétním návrhem materiálů výrobku. Tyto materiály byly navrženy tak, aby mohly být použity například při zvýšené teplotě či namáhání kompozitní části.

Dalším bodem praktické části byl samotný návrh zabudování konkrétních senzorů do kompozitní struktury. Díky získaným poznatkům z teoretické části byly zvoleny pro tuto aplikaci 4 FBG senzory umístěné do každé z polovin modelu. Jejich integrace byla zvolena mezi jednotlivé vrstvy prepregů, konkrétně mezi druhou a třetí vrstvou pod povrchem součásti.

Po umístění senzorů do kompozitu následoval návrh formy pro výrobu tohoto kompozitního dílu. Ten vychází z rozměrů 3D modelu a je vyhotoven v softwaru CATIA V5R19 stejně jako samotný model.

Závěrem praktické části práce byl vyhotoven rámcový technologický postup výroby stanoveného 3D modelu ze zvolených materiálů, a při konkrétních vytvrzovacích podmínkách.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] HRUŠKA, František. *Senzory: fyzikální principy, úpravy signálů, praktické použití* [online]. Zlín, 2011 [cit. 2021-5-10]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/17879918-Zlin-2011-senzory-fyzikalni-principy-upravy-signalu-practicke-pouziti-frantisek-hruska.html>
- [2] RS. *Fotoelektrické snímače* [online]. [cit. 2021-5-10]. Dostupné z: <https://cz.rs-online.com/web/p/fotoelektricke-snimace/7295117/>
- [3] PAJTECH. *Zvukový senzor* [online]. [cit. 2021-5-10]. Dostupné z: <https://pajtech.cz/senzor-zvuku-hluku-senzol-hlasu-avr-arduino-lm393-p-8713.html>
- [4] Lego-Senzory. *Rozdělení senzorů* [online]. [cit. 2021-5-10]. Dostupné z: <http://robowiki.spsnome.cz/Programovani/Lego-Senzory>
- [5] ŠERÝ, Michal. *Senzory: Automatizace* [online]. 2017 [cit. 2021-5-10]. Dostupné z: http://home.pf.jcu.cz/~kyklop/SERYM/SDC/prednasky/pdf/Automatizace_senzory.pdf
- [6] ŠŤASTNÝ, František. *Senzory* [online]. [cit. 2021-5-10]. Dostupné z: http://amper.ped.muni.cz/jenik/nejistoty/html_tree/node16.html
- [7] VOJÁČEK, Antonín. *Odporové tenzometry: princip, provedení, použití, historie* [online]. 2017 [cit. 2021-5-10]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/foliove-odporove-tenzometry-princip-provedeni-pouziti-historie.html>
- [8] Distrelec. *Hallův snímač* [online]. [cit. 2021-5-10]. Dostupné z: <https://www.distrelec.sk/sk/halovy-snimace-24v-40ma-digitalni-pohlcovaci-proudovy-vystup-honeywell-1gt101dc/p/17349038>
- [9] Components. *Ultrasonic sensor* [online]. [cit. 2021-5-10]. Dostupné z: <https://shop.sb-components.co.uk/products/hc-sr04-ultrasonic-distance-range-finder-obstacle-detection-module-blue>
- [10] Digi – key. *Mems sensor* [online]. [cit. 2021-5-10]. Dostupné z: <https://www.digkey.gr/en/product-highlight/s/stmicroelectronics/steval-mkit01v1-mems-sensor-sample-kit>

- [11] Frontiersin [online]. *Bridge monitoring* [cit. 2021-5-10]. Dostupné z: https://www.frontiersin.org/files/Articles/427971/fbuil-05-00041-HTML/image_m/fbuil-05-00041-g001.jpg
- [12] PC TUNING. *Technologie přenosu dat přes optická vlákna* [online]. 2008 [cit. 2021-5-10]. Dostupné z: https://pctuning.tyden.cz/hardware/site-a-internet/9994-technologie_prenosu_dat_pres_opticka_vlakna?start=1
- [13] ŠIFTA, Radim. *Optovláknové senzory a možnosti jejich využití* [online]. 2021 [cit. 2021-5-10]. Dostupné z: <https://elektro.tzb-info.cz/elektromaterialy/21750-optovlaknove-senzory-a-moznosti-jejich-vyuziti>
- [14] VOJÁČEK, Antonín. *Optické vláknové senzory pro náročná měření teploty* [online]. [cit. 2021-5-10]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/optovlaknove-senzory-pro-narocna-mereni-teploty.html>
- [15] Fiber Optic Cables Solutions. *Internal structure of fiber optic cable* [online]. [cit. 2021-5-10]. Dostupné z: <http://www.chinacablesbuy.com/internal-structure-of-fiber-optic-cable>
- [16] PUNČOCHÁŘ, J. *Přenosová cesta optická* [online]. [cit. 2021-5-10]. Dostupné z: http://fei1.vsb.cz/kat420/vyuka/FEI/AEO/sylaby/AEO_02.pdf
- [17] ŠIFTA, Radim. *Optovláknové senzorické systémy* [online]. 2020 [cit. 2021-5-10]. Dostupné z: https://automa.cz/Aton/FileRepository/pdf_articles/12934.pdf
- [18] DI SANTE, Raffaella. *Fibre Optic Sensors for Structural Health Monitoring of Aircraft: Composite Structures: Recent Advances and Applications* [online]. 2015 [cit. 2021-5-10]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/280998354_Fibre_Optic_Sensors_for_Structural_Health_Monitoring_of_Aircraft_Composite_Structures_Recent_Advances_and_Applications
- [19] GARZINOVÁ, Romana. *Prvky řídicích systémů* [online]. Ostrava, 2012 [cit. 2021-5-10]. Dostupné z: <http://www.person.vsb.cz/archivcd/FMMI/PRS/Prvky%20ridicich%20systemu.pdf>

- [20] Sensit [online]. *Snímače teploty s kabelem* [cit. 2021-5-10]. Dostupné z: https://www.sensit.cz/cz/kategorie/snimace-teploty-s-kabelem-kabelove-snimace-teploty-20605_0/
- [21] VOJÁČEK, Antonín. *Polovodičové odporové tenzometry: princip, provedení, použití, historie* [online]. 2006 [cit. 2021-5-10]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/clanek/2006111601>
- [22] ČERNOHORSKÝ, Jiří. *Aplikace kovových tenzometrů v technické praxi* [online]. 2001 [cit. 2021-5-10]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/aplikace-kovovych-tenzometru-v-technicke-praxi>
- [23] HBM. *Aircraft structural testing* [online]. [cit. 2021-5-10]. Dostupné z: <https://www.hbm.com/en/6711/webinar-mechanical-aircraft-testing-mgcplus-new-features-june-27/>
- [24] HBM. *Load Testing of a Glider's Outer Wing with Strain Gauges* [online]. [cit. 2021-5-10]. Dostupné z: <https://www.hbm.com/en/9880/load-test-glider-outer-wing/>
- [25] OZER, Ekin a Maria Q. FENG. *Structural Health Monitoring* [online]. 2020 [cit. 2021-5-10]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/structural-health-monitoring>
- [26] HBM. *Modular Solution for Efficient Structural Health Monitoring* [online]. [cit. 2021-5-10]. Dostupné z: <https://www.hbm.com/en/5530/structural-health-monitoring/>
- [27] BALAGEAS, Daniel, Claus-Peter FRITZEN a Alfredo GÜEMES. *Structural Health Monitoring* [online]. 2006 [cit. 2021-5-10]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/234037884_Structural_Health_Monitoring_-_Content
- [28] LEWIS, Dan. *Aerospace 4.0 – why we need it* [online]. 2019 [cit. 2021-5-10]. Dostupné z: <https://www.aero-mag.com/aerospace-4-0-why-we-need-it/>
- [29] KOŘOUSKOVÁ, Barbora. *Internet věcí (IoT): Definice, příklady využití, produkty* [online]. 2021 [cit. 2021-5-10]. Dostupné z: <https://www.rascasone.com/cs/blog/iot-internet-veci-definice-produkty-historie>

- [30] SAAB RDS. *IoT in Aerospace* [online]. 2020 [cit. 2021-5-10]. Dostupné z: <https://saabrds.com/iot-in-aerospace/>
- [31] DTM AERONAUTICS. *Industry 4.0 in Aeronautics: IoT applications* [online]. 2017 [cit. 2021-5-10]. Dostupné z: <https://ati.ec.europa.eu/sites/default/files/2020-07/Industry%204.0%20in%20Aeronautics%20-%20IoT%20Applications%20%28v1%29.pdf>
- [32] Aeroweb [online]. *AirLony Skylane* [cit. 2021-5-10]. Dostupné z: <https://www.aeroweb.cz/letadla/ultralighty/airlony-skiplane>
- [33] Element: *Composite Autoclave Curing & Fabrication* [online]. [cit. 2021-5-10]. Dostupné z: <https://www.element.com/materials-testing-services/composite-autoclave-curing-and-fabrication>
- [34] Solvay. *Cycom 97714A* [online]. [cit. 2021-5-10]. Dostupné z: <https://www.solvay.com/en/product/cycom-97714a>
- [35] Aeroexpo. *Epoxy resin prepreg* [online]. [cit. 2021-5-10]. Dostupné z: <https://www.aeroexpo.online/prod/toray-advanced-composites/product-172149-61095.html>
- [36] Hexcel. *Aramid Honeycomb* [online]. [cit. 2021-5-12]. Dostupné z: Hexcel [online]. [cit. 2021-5-12]. Dostupné z: [https://www.hexcel.com/user_area/content_media/raw/HexWeb_HRH10_DataSheet_eu\(1\).pdf](https://www.hexcel.com/user_area/content_media/raw/HexWeb_HRH10_DataSheet_eu(1).pdf)
- [37] Easycomposites [online]. *Nomex aramid honeycomb* [cit. 2021-5-12]. Dostupné z: <https://www.easycomposites.co.uk/nomex-aramid-honeycomb>
- [38] Generalplastics [online]. *Aerospace grade foam* [cit. 2021-5-10]. Dostupné z: <https://www.generalplastics.com/products/fr-6700>
- [39] Solvay [online]. *Epoxy foam* [cit. 2021-5-10]. Dostupné z: <https://www.solvay.com/en/product/fm-490b>
- [40] Smart fibres. *Smart FBG* [online]. [cit. 2021-5-12]. Dostupné z: <https://www.smartfibres.com/files/pdf/SmartFBG.pdf>

- [41] Safibra [online]. *FBG Guard 1550 - Advanced monitoring system* [cit. 2021-5-12]. Dostupné z: <http://www.safibra.cz/en/fbguard-interrogation-uni>
- [42] Alumeco [online]. *Plechy a desky* [cit. 2021-5-12]. Dostupné z: <https://www.alumeco.cz/hlink/plechydesky/prodn-plechydesky/g/360>
- [43] Ehlinik [online]. *Slitiny hliníku* [cit. 2021-5-12]. Dostupné z: <https://www.ehlinik.cz/prilohy/zakladni-technicke-informace.pdf>
- [44] Havel composites. *Seznam kategorií* [online]. [cit. 2021-5-14]. Dostupné z: <https://www.havel-composites.com/cs/kategorie>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

U	Napětí
mV	Milivolt
t	Čas
ms	Milisekunda
O ₂	Kyslík
NO	Oxid dusnatý
μm	Mikrometr
Apod.	A podobně
FBG	Optické vláknové mřížky
aj.	A jiné
UV	Ultrafialové záření
SHM	Monitorování strukturálního zdraví (Structural Health Monitoring)
F	Síla
M	Kroutící moment
3D	Trojrozměrný
IoT	Internet of Things
NASA	Národní Úřad pro Letectví a Vesmír
°C	Stupeň Celsia
°F	Stupeň Fahrenheita
CNC	Číslicové řízení pomocí počítače (Computer Numerical Control)
nm	Nanometr
μstrain	Poměrné prodloužení v μm/m
EN AW	Značení dle Evropské normy
ČSN	Česká technická norma
R _m	Mez pevnosti

R _p	Mez kluzu
MPa	Megapascal
A	Tažnost
%	Procento
cm	Centimetr

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 Fotoelektrický snímač [2].....	11
Obrázek 2 Senzor detekce zvuku [3]	11
Obrázek 3 Schéma zpracování signálu [1]	12
Obrázek 4 Kovový tenzometr [7]	16
Obrázek 5 Hallův snímač otáček [8].....	16
Obrázek 6 Ultrazvukový senzor vzdálenosti [9].....	17
Obrázek 7 MEMS tlakový senzor [10]	17
Obrázek 8 Monitorování stavu mostní konstrukce pomocí senzorů [11].....	18
Obrázek 9 Optické vlákno [14].....	18
Obrázek 10 Průřez optickým vláknem [15].....	19
Obrázek 11 Blokové schéma interferometrického systému	21
Obrázek 12 Blokové schéma distribuovaného systému	22
Obrázek 13 Blokové schéma bodových senzorů	23
Obrázek 14 Princip činnosti FBG senzorů [17].....	23
Obrázek 15 Zjednodušené schéma křídla letadla	24
Obrázek 16 Schéma rozmístění optických senzorů ve struktuře [18]	25
Obrázek 17 Nejvyšší pravděpodobnost nárazu ptáka [18]	25
Obrázek 18 Umístění optického vlákna (senzoru) na lopatce ventilátoru [18]	26
Obrázek 19 Odporové senzory teploty [20].....	27
Obrázek 20 Odporový tenzometr [7]	28
Obrázek 21 Základní princip příložných tenzometrů [19].....	29
Obrázek 22 Základní typy lepených tenzometrů [19]	30
Obrázek 23 Sdružené senzory [19]	30
Obrázek 24 Fóliový tenzometr [19].....	30
Obrázek 25 Druhy polovodičových tenzometrů [19]	31
Obrázek 26 Rozmístění tenzometrů na dopravním letadle [23]	32
Obrázek 27 Odporové tenzometry na křídle letounu [24]	32
Obrázek 28 Použití SHM systémů v průmyslu [26].....	34
Obrázek 29 Schéma obecného SHM systému na letadle [25]	35
Obrázek 30 Ultralehký kompozitní letoun AirLony Skylane [32]	41
Obrázek 31 3D model kompozitního křídla	42
Obrázek 32 Hlavní rozměry modelu v milimetrech	43
Obrázek 33 Voštinová část modelu	43

Obrázek 34 Voštinová část s kompozitní pěnou.....	44
Obrázek 35 Jednotlivé vrstvy struktury	44
Obrázek 36 3D model s dělicí rovinou	45
Obrázek 37 Zobrazení 3D modelu v řezu	45
Obrázek 38 Schématické uložení jednotlivých vrstev	46
Obrázek 39 Princip technologie kladení prepregu za použití vakua	46
Obrázek 40 Vytvrzovací autokláv [33].....	47
Obrázek 41 Uhlíkový prepreg s epoxidovou matricí [35]	49
Obrázek 42 Voština Nomex® [37]	50
Obrázek 43 Polyuretanová pěna [38].....	51
Obrázek 44 Rozmístění FBG senzorů	52
Obrázek 45 Rozmístění FBG senzorů	52
Obrázek 46 Rozmístění senzorů	53
Obrázek 47 Finální podoba dílu.....	53
Obrázek 48 Zvolené optické vlákno s FBG senzorem [40].....	55
Obrázek 49 Schéma přenosu dat do monitorovací jednotky	55
Obrázek 50 Návrh formy	56
Obrázek 51 Detailní pohled na rozložení jednotlivých vrstev struktury ve formě.....	56
Obrázek 52 Základní rozměry formy.....	57
Obrázek 53 Celková výška formy	57
Obrázek 54 Nanášení separátoru na povrch formy.....	59
Obrázek 55 Stříhání prepregů	60
Obrázek 56 Polyuretanová pěna	60
Obrázek 57 Separáční fólie (modr� barva) a odtrhov� tkanina (bílá barva).....	60
Obrázek 58 Lepen� těsnicí p�sky na vakuovou fólii.....	61
Obrázek 59 Použit� vakuov� pumpy	61

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Fyzikální principy, jednotlivé typy a aplikace senzorů [1].....	15
Tabulka 2 Fyzikální principy, jednotlivé typy a aplikace senzorů [1].....	16
Tabulka 3 Parametry zvoleného senzoru FBG [40].....	54
Tabulka 4 Vlastnosti slitiny AlCu4Mg [42]	57
Tabulka 5 Rámcový technologický postup.....	63
Tabulka 6 Rámcový technologický postup.....	64

SEZNAM GRAFŮ

Graf 1 Znázornění analogového a digitálního signálu [24]	13
Graf 2 Vytvrzovací diagram prepregu CYCOM® 97714A [34].....	49