

Životnost kompozitních sendvičových konstrukcí

Bc. Smetánka Václav

Diplomová práce
2018



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2017/2018

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: Bc. Václav Smetánka

Osobní číslo: T16220

Studijní program: N3909 Procesní inženýrství

Studijní obor: Řízení jakosti

Forma studia: prezenční

Téma práce: Životnost kompozitních sendvičových konstrukcí

Zásady pro vypracování:

- 1. vypracování literární rešerše k danému tématu**
- 2. návrh a výroba zkušebních těles**
- 3. provedení experimentálních zkoušek při dynamickém zatížení v ohybu**
- 4. vyhodnocení výsledků a statistické zpracování dat**

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

Literatura dle doporučení vedoucího DP.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Milan Žaludek, Ph.D.**
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce: **2. ledna 2018**

Termín odevzdání diplomové práce: **18. května 2018**

Ve Zlíně dne 5. února 2018



doc. Ing. František Buňka, Ph.D.
děkan



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

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby ¹⁾;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/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 ²⁾;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – diplomovou/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);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně: 12. 5. 2018


Václav Smetánka

¹⁾ zákon č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, § 47 Zveřejňování závěrečných prací:

(1) Vysoká škola nevydělečně zveřejňuje disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce, u kterých proběhla obhajoba, včetně posudků oponentů a výsledku obhajoby prostřednictvím databáze kvalifikačních prací, kterou spravuje. Způsob zveřejnění stanoví vnitřní předpis vysoké školy.

(2) Disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce odevzdané uchazečem k obhajobě musí být též nejméně pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněny k nahlížení veřejnosti v místě určeném vnitřním předpisem vysoké školy nebo není-li tak určeno, v místě pracoviště vysoké školy, kde se má konat obhajoba práce. Každý si může ze zveřejněné práce pořizovat na své náklady výpisy, opisy nebo rozmnoženiny.

(3) Platí, že odevzdáním práce autor souhlasí se zveřejněním své práce podle tohoto zákona, bez ohledu na výsledek obhajoby.

²⁾ 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, § 35 odst. 3:

(3) Do práva autorského také nezasahuje škola nebo školské či vzdělávací zařízení, užije-li nikoli za účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obchodního prospěchu k výuce nebo k vlastní potřebě dílo vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacímu zařízení (školní dílo).

³⁾ 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, § 60 Školní dílo:

(1) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení mají za obvyklých podmínek právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla (§ 35 odst. 3). Odpírá-li autor takového díla udělit svolení bez vážného důvodu, mohou se tyto osoby domáhat nahrazení chybějícího projevu jeho vůle u soudu. Ustanovení § 35 odst. 3 zůstává nedotčeno.

(2) Není-li sjednáno jinak, může autor školního díla své dílo užít či poskytnout jinému licenci, není-li to v rozporu s oprávněnými zájmy školy nebo školského či vzdělávacího zařízení.

(3) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení jsou oprávněny požadovat, aby jim autor školního díla z výdělků jím dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence podle odstavce 2 přiměřeně přispěl na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložily, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přihlédne k výši výdělků dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

ABSTRAKT

Cílem této diplomové práce je prozkoumání životnosti kompozitních sendvičových konstrukcí při únavovém cyklickém zatížení.

Teoretická část diplomové práce popisuje kompozitní materiály, jejich bližší využití u automobilových závodních speciálů a v dalších průmyslech. Dále jsou rozvedeny požadavky na kompozitní sendvičové konstrukce, druhy jejich poruch odvíjejících se od únavového cyklického zatížení. V závěru teoretické části jsou vysvětleny pravidla pro používání insertových vložek a téma ke statistickému zpracování malých souborů pomocí Hornova postupu.

V praktické části je popsán návrh a výroba zkušebních tělísek, následné testování a statistické zpracování naměřených hodnot, ze kterých se následně vytvořily výsledné křivky s popisem vad kompozitních sendvičových vzorků.

Klíčová slova: Životnost, sendvičová konstrukce, voštinová struktura, prepreg, insert,

S – N křivka

ABSTRACT

The aim of this diploma thesis is to examine the Viability of Composite Sandwich Construction. The theoretical part of the diploma thesis describes composite materials, their use in automotive racing specialties and other industries. Further, requirements for composite sandwich structures, types of their fatigue-related failures are explained. At the end of the theoretical part, the rules for using inserts and the topic of statistical processing of small parts using Horn's method are explained. The practical part describes the design and manufacture of test parts, subsequent testing and statistical processing of the measured values, from which the resulting Wöhler curves with the description of the defects of the composite sandwich samples were created.

Keywords: durability, sandwich construction, honeycomb structure, prepreg, insert, S-N curve

Chtěl bych mockrát poděkovat panu Ing. Milanu Žaludkovi, Ph.D., za pomoc, cenné rady, čas a konzultace při vypracovávání moji diplomové práce. Dále chci poděkovat Ing. Alexanderovi Čapkovi za možnost vykonávat praktickou část moji diplomové práce na stroji, který zkonstruoval a doc. Dr. Ing. Vladimíru Patovi za odborné konzultace při zpracování dat. Hlavně také mojí rodině a blízkým přátelům, kteří mě podporovali při studiu a byli mi oporou v nelehkých chvílích nejen při studiu.

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

OBSAH

ÚVOD	10
I TEORETICKÁ ČÁST	11
1 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY	12
1.1 ZÁKLADNÍ TERMINOLOGIE KOMPOZITŮ	13
1.2 ZÁKLADNÍ TERMINOLOGIE SENDVIČŮ.....	14
1.3 VLASTNOSTI KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ	14
1.4 ROZDĚLENÍ KOMPOZITU	15
1.4.1 Vláknové kompozity	16
1.5 MATRICE.....	17
1.5.1 Termoplasty.....	17
1.5.2 Termosety.....	18
1.5.3 Druhy pryskyřic	18
1.6 VÝZTUŽE KOMPOZITŮ	19
1.6.1 Skleněné vlákna	20
1.6.2 Uhlíkové vlákna	21
1.7 APLIKACE KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ V LETECTVÍ A DOPRAVNÍCH PROSTŘEDCÍCH	22
1.8 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY V ZÁVODNÍCH SPECIÁLECH	25
2 STRUKTURA KOMPOZITNÍCH SENDVIČŮ	27
2.1 VLASTNOSTI SENDVIČŮ	27
2.2 PORUCHY SENDVIČŮ	28
2.2.1 Vady ovlivňující životnost	28
2.2.2 Vady u sendvičových konstrukcí	29
2.3 JÁDRA SENDVIČŮ.....	30
2.3.1 Voštinové jádra	31
2.3.1.1 Rozdělení voštin podle geometrie.....	32
2.3.1.2 Kovové voštiny	32
2.3.1.3 Nekovové voštiny	33
2.3.2 Pěny.....	34
2.4 POTAHY.....	34
2.5 PREPREGY	34
3 INSERTY	37
3.1 ROZDĚLENÍ INSERTŮ	38
3.1.1 Vady při montáži insertů.....	38
3.2 SÍLY PŮSOBÍCÍ NA INSERTY.....	39
4 ÚNAVOVÉ CHOVÁNÍ KOMPOZITŮ	40
4.1 ŽIVOTNOST KOMPOZITNÍCH SENDVIČŮ	40
4.1.1 Únavové křivky	40
4.1.2 Proměnlivé zatížení	41
4.1.2.1 Tvrdé zatěžování.....	42
4.1.2.2 Měkké zatěžování	42

4.2	DRUHY CYKlickÉHO ZATĚŽOVÁNÍ.....	42
4.3	FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ ÚNAVU KOMPOZITŮ	44
4.3.1	Módy porušení	44
4.3.1.1	Praskání matrice.....	45
4.3.1.2	Lámání vláken, spojování prasklin, narušení mezifázového rozhraní, počátek delaminace.....	45
4.3.1.3	Delaminace a porušování vláken	45
4.4	ÚNAVOVÉ VLASTNOSTI KOMPOZITNÍCH SENDVIČŮ.....	46
	Mezní stav sendvičů	47
4.5	ÚNAVOVÉ VLASTNOSTI INSERTŮ	47
5	STATISTICKÁ ANALÝZA JEDNORozMĚRNÝCH DAT	48
5.1	STATISTICKÉ POJMY U ANALÝZY MALÝCH VÝBĚRŮ.....	48
5.2	ANALÝZA MALÝCH VÝBĚRŮ.....	49
5.2.1	Zvláště malé výběry	49
5.2.2	Malé výběry	49
II	PRAKTICKÁ ČÁST	52
6	CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE	53
7	VÝROBA ZKUŠEBNÍCH TĚLES	54
7.1	PŘÍPRAVA VOŠTIN	54
7.2	PŘÍPRAVA POTAHŮ	56
7.3	VÝROBA SENDVIČOVÉHO PANELU	58
7.4	FINÁLNÍ PŘÍPRAVA SENDVIČOVÝCH PANELŮ	61
7.4.1	Řezání vzorků.....	61
7.4.2	Vrtání děr pro insertové vložky.....	61
7.4.3	Instalace insertových vložek	62
7.5	ROZDĚLENÍ VZORKŮ.....	63
8	TESTOVÁNÍ ZKUŠEBNÍCH TĚLES.....	65
8.1	STATICKÁ ZKOUŠKA OHYBEM	65
8.2	ÚNAVOVÁ ZKOUŠKA	66
9	VYHODNOCENÍ NAMĚŘENÝCH DAT	69
9.1	VÝSLEDKY ZKOUŠKY TŘÍBODOVÝM OHYBEM PRO VYTRŽENÍ INSERTU.....	69
9.2	ZPRACOVÁNÍ ÚNAVOVÝCH ZKOUŠEK PRO SENDVIČE S INSERTY	70
9.2.1	Naměřené data.....	70
9.2.2	Zpracování dat.....	73
9.2.3	Vyhodnocení výsledků únavové zkoušky	75
9.2.4	Porovnání naměřených hodnot se vzorky bez insertů.....	78
9.2.4.1	Vady u vzorků při únavových zkouškách.....	78
	ZÁVĚR	82
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	84
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	88
	SEZNAM OBRÁZKŮ	91
	SEZNAM TABULEK.....	94
	SEZNAM PŘÍLOH.....	95

ÚVOD

Aplikace kompozitních materiálů značně vzrůstá z důvodu snižování nákladů při dopravě, zvýšení bezpečnosti a dopadu na životní prostředí. Aby se kompozitní materiály stále více využívaly a inovovaly, musí se prozkoumávat všechny neznámé parametry a jejich výzkum posouvat dál. Nevýhodou těchto materiálů je vysoká cena u kompozitních materiálů s tím spojená produktivita a kvalita výroby. I s ohledem na výrobní cenu se kompozitní materiály jako první objevily v kosmickém průmyslu, následně v leteckém, kde je první zmínka o aplikaci tohoto materiálu v roce 1919. V současnosti se moderní letouny skládají až z padesáti procent kompozitních materiálů. Další uplatnění je ve stavebním, chemickém, zdravotním či automobilovém průmyslu, na který se vzorky a jejich testování v této práci zaměří. Konkrétně pro použití kompozitních sendvičových prvků u soukromých týmů v konstrukci závodních vozů, což si můžou dovolit pouze velké tovární týmy z důvodu vysoké ceny a nedostatku možností k testování. Kompozitní sendvič se skládá alespoň ze tří vrstev, které jsou k sobě pevně spojeny. Vnější vrstvy tvoří pevné a velmi tenké potahy a střední část tvoří jádro, které je výrazně tlustší než potah. Výzkum životnosti kompozitních sendvičových konstrukcí a technologických podmínek může být přínosem v budoucnosti s ohledem na snížení nákladů pro používání těchto součástí v tomto sportovním odvětví. Při výzkumu životnosti sendvičových konstrukcí je třeba se zabývat taky vznikem únavových poruch. Ty vznikají jako miniaturní trhlinky ve více místech a rozrůstáním nastává delaminace případně další poruchy jako prasknutí potahu či poruchy jiného rázu, například zborcení jádra. Tudiž poruchy u kompozitních sendvičových konstrukcí můžou nastat v potahu, v jádru, mezi potahem a jádrem, nebo v okolí insertové vložky.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY

Kompozitní materiály jsou ze dvou a více různých fází. Jednotlivé zainteresované části mají rozdílné vlastnosti a ve výsledku vytvoří vlastnosti zcela jiné, lepší oproti jednotlivým stavebním složkám. Např. v normě ČSN EN 4408-001 popsany „laminát – dvě nebo více vrstev lamin“. Další zdroj uvádí „laminát – kompozit ve tvaru plošného výrobku z jednotlivých rozlišitelných vrstev, který vzniká spojením vláken a pryskyřice nezávisle na formě konstrukčního prvku, nebo na stavu výroby“.

Základem je matrice, ve které se nachází výztuž v podobě krátkých vláken, dále vlákna přes celý rozměr výrobku. Matrice zajišťuje pevnost, je pojivem v kompozitním materiálu, chrání výztuž před vnějšími vlivy. Velmi důležitá je adheze, přesněji přilnavost k dalším materiálům.

Aby výsledný kompozit splňoval požadované předpoklady je taky důležité správné dodržení technologického postupu výroby. [1, 2]



Obr. 1. Rozdělení materiálů [4]

Definice MIL – NASA USA:

Kompozitní materiál je kombinace dvou nebo více materiálů (vyztužovací elementy, výplně a spojovací matrice), lišících se v makroměřítku tvarem a složením. Složky si v nich zachovávají svou identitu (tzn vzájemně se úplně nerozpouštějí ani neslučují), ačkoliv na své okolí působí v součinnosti. Každá složka může být fyzikálně identifikována a mezi ní a dalšími složkami je rozhraní [5]

1.1 Základní terminologie kompozitů

Kompozitní materiál

- Konstrukční materiál složený ze dvou a více složek (fází), které se mezi sebou nijak nerozpouští a mají mezi sebou fázové rozhraní. Skládá se vždy z matrice a výztuže; u kompozitního materiálu musí být dosaženo synergického efektu.

Kompozit vláknový

- Konstrukční materiál s dlouhou výztuží, kdy v rozdílu délky a průměru je první rozměr několikrát větší. Výztuž musí mít vyšší tuhost a být pevnější jako matrice.

Laminát

- Je kompozit ze dvou a více vrstev, který obsahuje pryskyřici a vyztužující vlákna, která jsou orientována v organizovaně, nebo různě.

Matrice

- Jinými slovy pojivo je základní stavební jednotka pro kompozit, kde se ukládá výztuž. Matrice chrání výztuž proti poškození a udává výrobku tvar.

Polymerní kompozitní materiál

- Kompozit, jež má matrici, nebo také vlákna za polymerního materiálu.

Plnivo

- Látka přidávající se do pojiva za cílem změny vlastností.

Prepreg

- Polotovar pro výrobu vláknových kompozitů, který obsahuje pryskyřici před impregnovanou výztuž. Využitím zvýšení teploty a tlaku se tvaruje.

Pryskyřice

- Polymer, který se díky tvrdidlu vytvrzuje polymerací.

Vlákno

Přírodní nebo umělé, rozměrově konečné nebo nekonečné. Vlákno je základní stavební jednotka pro tkaninu, popř. výztuž pro vláknové kompozity.

Výztuž

- Zpevňující část kompozitního výrobku, je sestavená z vláken a přenáší velkou část zatížení u vláknových kompozitů

1.2 Základní terminologie sendvičů

Jádro

- Je střední část sendviče, která má odlišné vlastnosti oproti další části (potahům), zvyšují pevnost a tuhost. Jádra jsou ve většině případů z voštiny.

Potah

- Tvoří povrchovou část sendviče, je velmi tenká, ze dvou vrstev. Podle druhu materiálu je potah přilepen k jádru, nebo dojde ke spojení při vytvrzovacím procesu. Hlavní význam je přenos tahových a tlakových sil.

Sendvič

- Vytvořený z různých materiálů, které jsou k sobě navzájem propojeny lepením. Výsledná konstrukce má lepší vlastnosti pro následné použití.

Voština

- Materiál, který má tvar pravidelných buněk připomínající šestihran. Voština je například z nomexu, což je papír, dále z hliníku, polymeru. [5]

1.3 Vlastnosti kompozitních materiálů

Tyto materiály vyrábíme za účelem zlepšení výsledných vlastností s cílem úspory, zvýšení bezpečnostních koeficientů v dopravě a ne jenom v ní, zlepšení vlastností na životní prostředí a dalších, kterých u běžně používaných materiálů nedosahujeme. Poslední jmenovaná vlastnost se v posledních letech velmi prosazuje, což kompozitním materiálům pomáhá.

Přednosti kompozitů v porovnání s kovy:

- Nižší měrná hmotnost
- Dobré tlumící vlastnosti při použití uhlíkových vláken

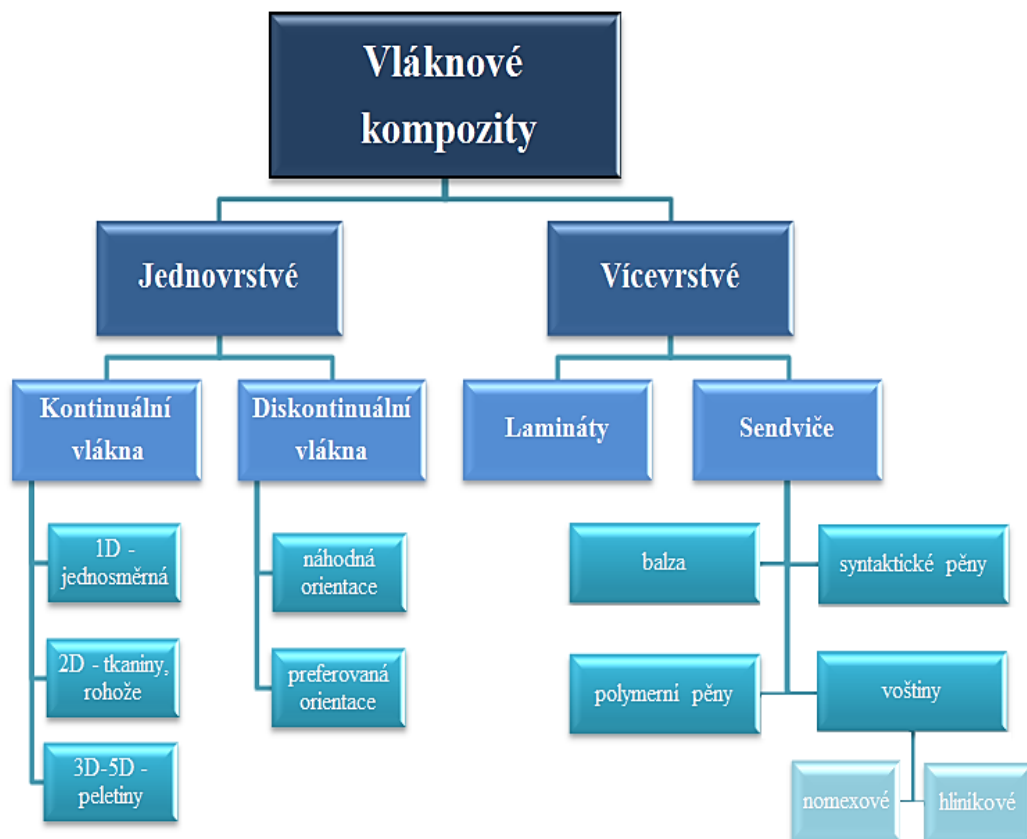
- Zvýšená pevnost a tuhost
- Odolnost proti korozi
- Snížení nasákavosti
- Korozivzdornost v ovzduší

Nevýhody kompozitů:

- Časově náročná výroba (v porovnání s lisováním plechů)
- Musíme dodržovat výrobní technologii
- Ekologické a zdravotní rizika (výskyt rakovinotvorných látek)
- Vysoké ceny kompozitů s uhlíkovými vlákny [2, 5, 16]

1.4 Rozdělení kompozitu

Kompozity dělíme podle materiálu matrice, technologie výroby, geometrického tvaru výztuže a dalších hledisek. Na obr. 2 je k vidění rozdělení vláknových kompozitů.



Obr. 2. Rozdělení kompozitů

- **Materiálu matrice**
 - Nekovová
 - Kovová
- **Materiálu výztuže**
 - Nekovovou
 - Kovovou
- **Tvaru výztuže**
 - Vlákňové
 - Částicové

1.4.1 Vlákňové kompozity

Podoba vlákňové výztuže je v matrici orientována jednosměrně, dvousměrně, více směrně, nebo prostorově a nahodile v rovině. Mechanické vlastnosti a tloušťky stěn se vytváří skládáním vrstev.

- **Jednovrstvý kompozit**

Je složený z několika samostatných vrstev, které mají stejnou orientaci a vlastnosti.

- **Vícevrstvý kompozit**

Je používaný v konstrukcích a skládá se z několika vrstev vlákňových kompozitů. Pakliže skládáme stejné materiály na sebe v každé jedné vrstvě, vzniká laminát. Další představitel jsou sendviče, kde je mezi potahy voština, pěnová hmota, balza.

V těchto výrobcích nacházíme vlákna uhlíková, skelná a to v různých délkách.

- Krátko vlákňové
 - délka vláken je mockrát menší oproti rozměru výrobku.
- Dlouho vlákňové
 - délka vláken je rozměrově stejná v porovnání s výrobkem. [7, 11, 14]



Obr. 3. Dělení kompozitů podle vláknové výztuže [46]

1.5 Matrice

Máme dvě základní polymerní pryskyřice (pojiva), kterými jsou termoplasty a termosety. U vláknových kompozitů hlavně termosety, jako matrice nejčastěji:

- nenasyčené polyestery v 75% celosvětového objemu zpracovaných pryskyřic,
- vinylestery v případě cca 20%,
- v 5% fenolické pryskyřice a epoxidy u kompozitů se sníženou hořlavostí.

Většímu rozšíření termoplastů brání velká viskozita při zpracování (2-4x větší) než u termosetů, což vede ke vzniku defektů a tím nenaplnění požadovaných vlastností kompozitů.

1.5.1 Termoplasty

Jsou to tuhé látky, které při zvýšené teplotě tečou a po ochlazení se vrací zpět do pevného skupenství. Jsou to například tyto termoplasty:

- Polypropylen - PP,
- Polyetylén - PE,
- Polystyren - PS,
- Polykarbonát - PC,
- Polyetylén tereftalát – PET.

Charakteristický znak termoplastů jsou makromolekuly, které jsou vytvořeny opakováním stejných stavebních jednotek.

1.5.2 Termosety

Jsou v podobě viskózních tekutin s podobou více řídkého medu tvořené malými molekulami, následně chemickou reakcí vytvrzeny. Vytvrzování probíhá za pokojové, nebo zvýšené teploty. Do této skupiny patří:

- Epoxidy,
- Nenasycené polyestery,
- Fenol formaldehydové pryskyřice.

Vytvrzený termoset zůstává v tuhém stavu i při zahřátí, což zaručuje odolnost proti vysokým teplotám, creepu.

Tab. 1. Porovnání vlastností termoplastů a termosetů

TERMOSETY	TERMOPLASTY
Výroba dílu je nezvratný chemický proces	Opakovatelný výrobní proces
Skladování v mrazivých teplotách	Skladování za běžných podmínek
Zavedená technologie	Nová technologie
Relativně křehký materiál	Houževnatý materiál
Pevnost v tlaku je výborná	Pevnost v tlaku je dobrá
Únavová životnost je výborná	Únavová životnost je dobrá
Absorbuje až 2% vody	Absorbuje jen do 0,02% vody
Teplota zpracování 120 – 200°C	Teplota zpracování je 320 – 420°C

1.5.3 Druhy pryskyřic

- **Polyesterové pryskyřice**
 - Mají zkratku UP,
 - Aby reakce vytvrzování probíhalo požadovanou rychlostí, vytvrzuje se za zvýšené teploty.
- **Vinylesterové pryskyřice**
 - Při většině jejich aplikací není kladen důraz na elektrické vlastnosti.

- Velmi vhodné k výrobě kompozitů pro náročnější aplikace, do agresivního chemického prostředí.
- Sklem vyztužené vinylesterové roury mají vynikající trvanlivost u nádrží, v chemickém průmyslu, u sanitární techniky a plaveckých bazénů.
- **Epoxidové pryskyřice**
 - Charakteristickým znakem jsou dobré mechanické a dynamické vlastnosti.
 - V případě použití vhodných tvrdidel je teplotní odolnost až 180°C.
 - Neobsahují škodlivý styren na rozdíl od předešlých pryskyřic.
 - Teplotní odolnost matrice je vyjádřena teplotou Tg (teplota, kdy zůstane polymer ve skelném tvaru), zde má kompozit potřebné vlastnosti, avšak nad ní začíná měknout a teplotně se destruuje.

1.6 Výztuže kompozitů

Povrch kompozitních dílů zpravidla tvoří tkaniny, které mají různou textilní vazbu. Přenáší většinu zatížení a pevnost je větší, jako u matric.

- Plátová vazba

Jednoduše vytvořená základní vazba, avšak lehce se zvlíní. Při řezání se chová dobře, jelikož nevznikají nežádoucí otřepy.

- Keprová vazba

Táto vazba má vyšší tuhost a pevnost a menší zvlnění vláken. Tkanina je vhodnější pro tvarové prvky z důvodu lepší ohebnosti, na rozdíl od vazby plátové. Rozlišujeme směr stoupání řádků na levý ve tvaru písmene S, nebo pravý ve tvaru písmene Z. Tvoří svými vlastnostmi přechod mezi vazbou plátovou a atlasovou.

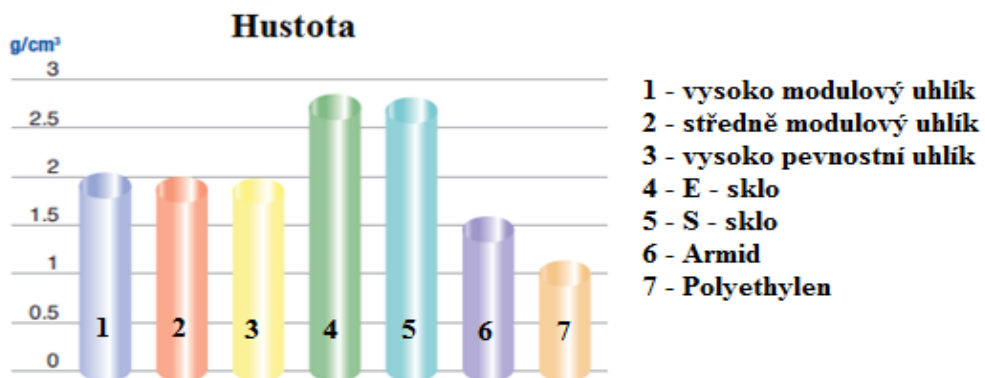
- Atlasová vazba

Nejmenší zvlnění vláken, používá se pro prostorově náročné části. Tato vazba taky vytváří velmi hladký povrch, střída vazby je nejmenší. Atlasy mají pravidelně rozsazeny vazné body, aby se sebe nedotýkaly. [2, 16]



Obr. 4. Typy vazeb výztuží [36]

Vlákna v kompaktní podobě vytváří pevné materiály pro kompozitní materiály. Pevnost narůstá se zmenšujícím se průřezem vláken a záleží na délce. Většina vyráběných vláken má kruhový průřez o průměru 3,5 - 24 μ m. Menší rozměry se neaplikují z důvodu špatného zpracování – obtížné prosycování matricemi.



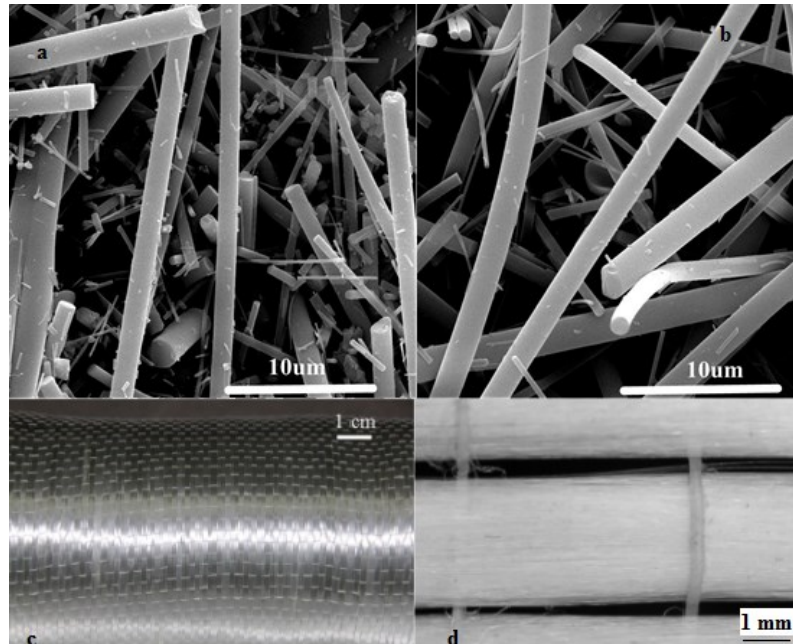
Obr. 5. Hustota vláken [21]

1.6.1 Skleněné vlákna

Odlišné skloviny, které vytváří vláknům specifické vlastnosti, jako je pevnost, ohebnost, chemická odolnost, elektrické izolační vlastnosti, tepelná odolnost.

- Textilní skleněná vlákna
 - Vyráběny tažením roztavené skloviny.
 - Mají výborné elektrické izolanty s vysokou prostupností záření.
 - E – vlákna, jejich sklovina je E – sklovina, tvoří 90% zastoupení na trhu.
 - Dále potom R, S, T sklovina, má o 40 – 70% vyšší pevnost.

- Další vyráběnou je sklovina C, která je naopak odolný proti kyselinám a chemicky agresivním látkám. [1, 26, 30]



Obr. 6. a) SEM snímek neupraveného E-skelného vlákna, b) SEM snímek upraveného E-skelného vlákna, c) Tkaná struktura ze skelného vlákna, d) Mikroskopický snímek tkaniny ze skelného vlákna [26], [30]

- Výroba skleněných vláken

Probíhá ve sklářské peci s teplotou až 1400°C. Sklovina na výstupu tuhne, dochází k dloužení na finální rozměry. Na výstupu se nanáší vodní emulze (lubrikace) z důvodu spojení do vlákna, chránění povrchu, přípravu pro další zpracování a zlepšení vazby mezi pryskyřicí a vláknem. [1, 16]

1.6.2 Uhlíkové vlákna

Přednost je ve vysoké pevnosti, tepelné odolnosti, modulu pružnosti a nízké měrné hmotnosti. Význam uhlíkových vláken stoupá i přes to, že cena oproti skleněným vláknům je desetkrát i vícenásobně vyšší. [1, 5]

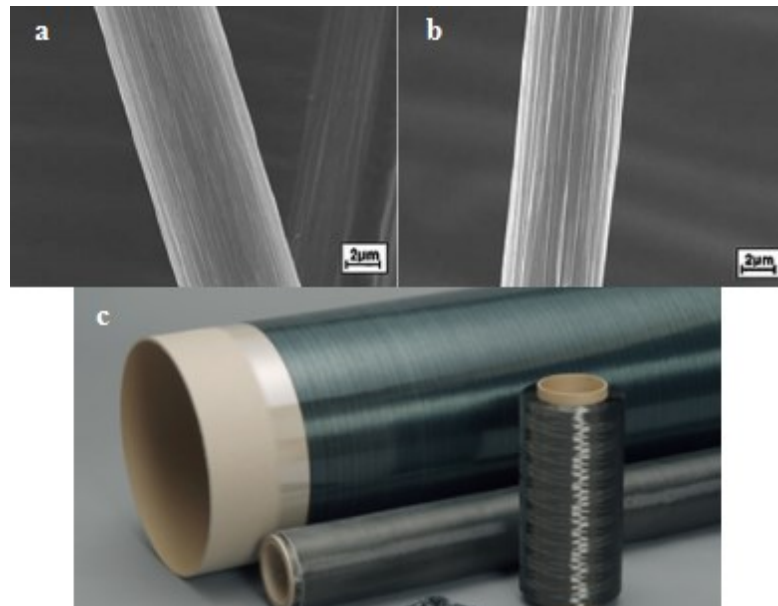
Pro výrobu těchto vláken se používají tři suroviny:

- Smola – Zvláknění probíhá pod napětím, ať jsou orientace molekul ve směru osy vlákna. Čím více je orientace dokonalejší, tím má vlákno lepší modul a pevnost.

- Viskózosé vlákna – spíše jako izolační materiál při vysokých teplotách.
- Polyakrylonitrilové vlákna (PAN) – vlákna se peroxidují a následně dochází ke karbonizování primárního vlákna při teplotách 1200 – 1400°C. Při této operaci nesmí dojít k reakci, nebo roztavení, případně dochází k další operaci při teplotách 2200°C – 3000°C a vzniku grafické struktury.

Z energetického a materiálového hlediska jsou vhodnější suroviny, které dávají při karbonizaci vyšší výtěžky hmoty výchozích látek.

- Viskózosá vlákna – 15-20%,
- Akrylonitrilová – až 55%,
- Ze smol – až 80%. [2, 16]



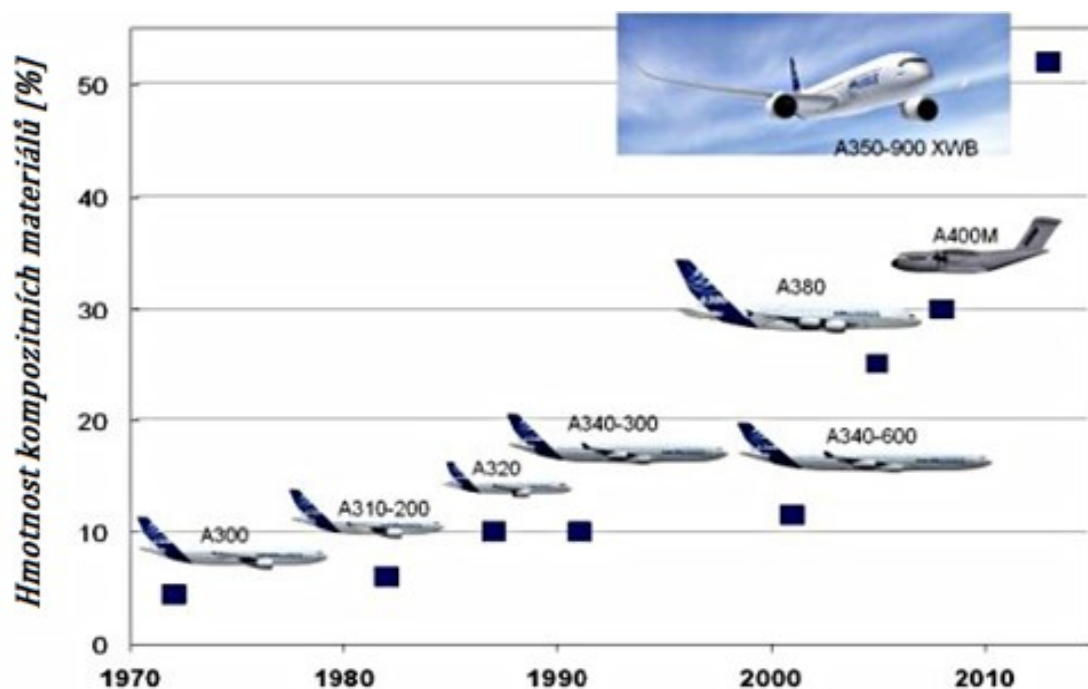
Obr. 7. Uhlíkové vlákno – a) SEM snímek bez ozáření, b) SEM snímek s ozářením 100kGy, c) uhlíkové vlákno v návinech [22],[25]

1.7 Aplikace kompozitních materiálů v letectví a dopravních prostředcích

V dnešní době se téměř v každém průmyslu využívá kompozitních materiálů. První, kde byly vůbec využívány kompozity, bylo organizací NASA ve Spojených Státech Amerických, pro kosmické lodě letu do vesmíru.

Nejvíce se potom tento progresivní materiál využívá v průmyslu dopravním. U letounů se tak stalo za důsledkem zachovat, či zvýšit bezpečnost, snížit náklady z hlediska spotřeby.

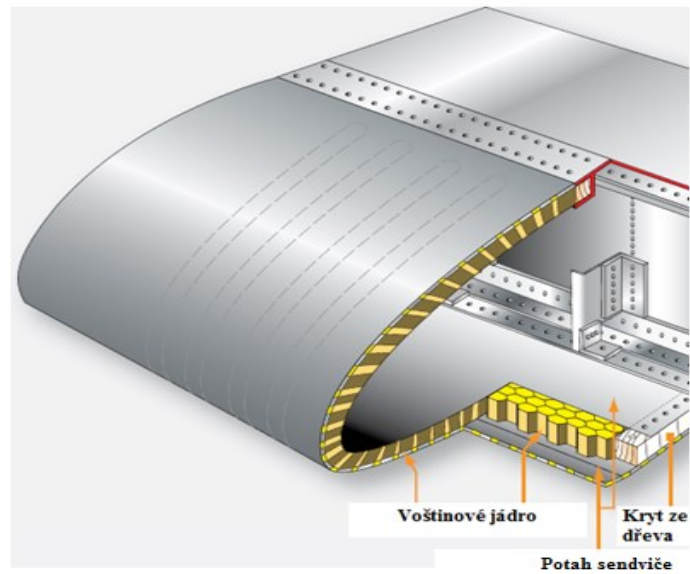
Nejdříve se používaly pro vychystávání druhořadých součástí a v průběhu času se staly součástí hlavních dílů u dopravních prostředků, jako jsou: křídla letounů, trupové části, interiérové prvky. Na obr. 8 je vyobrazený nárůst využívání materiálu u jednotlivých letounů firmy Airbus. Model A350 začíná nahrazovat jeho předchůdce na dlouhé tratě typu A340 a poměr kompozitních materiálů je téměř trojnásobný. Sendviče používající se u letounů mají potahy hliníkových slitin, ocelové a titanové plechy a jádra nejvíce nomexové¹ voštiny, dále hliníkové voštiny, méně pěny. [10]



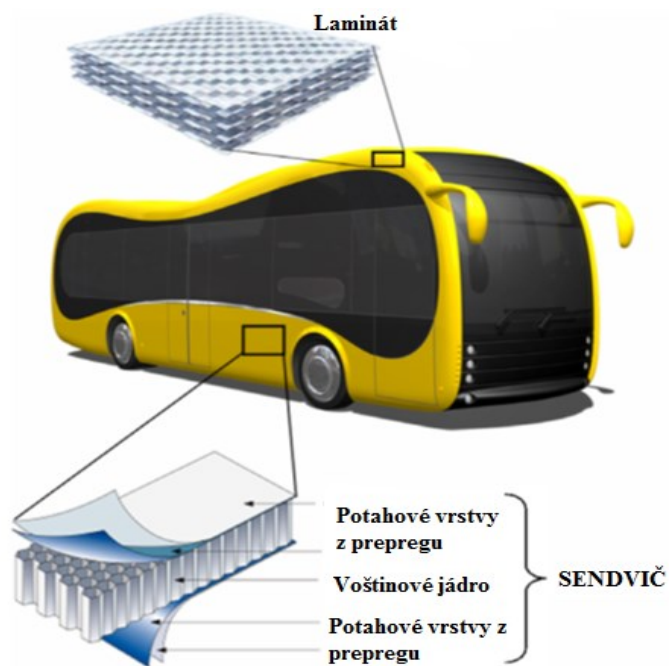
Obr. 8. Aplikace kompozitních materiálů v letounech Airbus [10]

Kompozitní materiály se používají též u sportovních vozidel, začínají se aplikovat u komerčních vozů malých, středních, nákladních. Na obr. 10 je využití kompozitních materiálů u moderního autobusu. Sendvičové prvky nachází uplatnění v karosérii - bočnicích, podlahách; laminát je použitý v částech, jako části střechy či zpětné zrcátka. [10,15]

¹ Pozn. Nomex je meta-armidové vlákno se silnou odolností proti vysokým teplotám. Nomex byl uveden na trh americkou společností DuPont.



Obr. 9. Aplikace sendviče z kompozitu v křídle letounu [15]



Obr. 10. Aplikace kompozitů v moderní hromadné dopravě [15]

Také dodavatelé sportovních a rekreačních produktů se stávají aktivními uživateli kompozitů. Kupříkladu dřívě hokejové hole ze dřeva v dnešní době nahrazují hokejky kompozitní z uhlíkových vláken, nebo tenisové rakety, lyže či golfové hole. V neposlední řadě části zbraní, lodě, nebo implantáty v lékařství. [10]

1.8 Kompozitní materiály v závodních speciálech

Zavedení kompozitních materiálů do závodních vozidel přináší snížení hmotnosti, zlepšení ovládání vozu, rychlosti a zvyšuje se bezpečnost posádky. Nejvíce se tato změna projevuje u monopostů formule jedna. Střední část vozu (monokok), se vyrábí právě z kompozitního materiálu za pomoci autoklávu. Monokok vychází z předepsaných směrnic udávaných mezinárodní automobilovou federací FIA. Tyto směrnice popisují tvar, povolený materiál pro stavbu, minimální hmotnost, tak aby výsledný celek mohl nést známku bezpečného použití v realitě. [9, 12]



Obr. 11. Moderní monokok závodního monopostu [9]

Konstrukční prvky ze závodních speciálů musí být dostatečně tuhé, pevné, odolné proti poškození, absorbovat co nejvíce energie, nehořlavé a zajišťovat co nejnižší hmotnost. Řešení tohoto problému se dosahuje správnou konstrukcí, geometrií, volbou materiálů. Značná část vývoje je zastíněna používáním kompozitních materiálů v leteckém průmyslu, ovšem cíl je téměř totožný, (např. rozdíl F1 a AIR RACE 1). Formule 1 obsahují termoseťové epoxidové pryskyřice, které také používám na vzorcích. Na konci padesátých let, dvacátého století, se objevil v podvozku kompozit z voštinového hliníkového jádra s matricí z fenolové pryskyřice. Až v sedmdesátých letech se aplikovala pryskyřice epoxidová s kombinací hliníkové voštiny. Kompozitní podvozek viděla veřejnost až v roce 1980 u vozů McLaren s výztuží uhlíkových vláken. Monokok z hliníkového jádra byl zpracován v autoklávu, kde se třikrát vytvrzoval. Tato technologie výroby vydržela do začátku devadesátých let. [9, 12, 20]



Obr. 12. První vyrobený monokok vozu Formule 1 [12]

V závodních speciálech nechtěl nikdo přistoupit na monokok, i když toto tělo vozu pohlcovalo daleko více energie bez porušení. Zlom nastal při kolizi většího charakteru v roce 1981, když se řidič při nehodě neporanil. Startuje používání kompozitních materiálů u všech stájí a nejenom v podvozkové části, ale všechny kovové komponenty se začínají nahrazovat. První z nich pružiny, zavěšení, později došlo na brzdy, nárazové bočnice, spojky, části výfukového systému, převodovky. Postupem času se dostávají neustále nové evoluce a vylepšení. V porovnání s převodovkou ze slitin je ta z kompozitního materiálu o 25% tužší, provoz je možný za vyšších teplot a dovolují snadnější úpravy. V současnosti je F1 téměř z 90% kompozitních materiálů, snižují hmotnost až o třetinu v porovnání s původními materiály. V současnosti se kompozitní prvky aplikují již ve všech motoristických odvětvích, jenže v menší míře. Samozřejmostí je, že tyto materiály jsou finančně nákladné a ne každý tým si je může dovolit, jako týmy tovární. Prozkoumáním vzorků a zjištěním výhod je vidina možnosti v budoucnu více zpřístupnit tyto materiály týmům s méně omezenými finančními možnostmi. [9, 12]



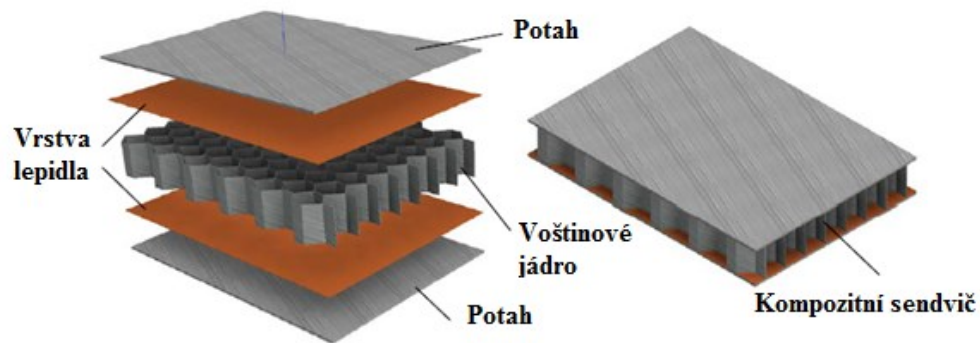
Obr. 13. Zavěšení a odpružení z kompozitního materiálu [20]

2 STRUKTURA KOMPOZITNÍCH SENDVIČŮ

Kompozitní sendviče jsou konstrukce, nacházející uplatnění v několika průmyslových odvětvích. Rozdělení kompozitních sendvičů je do následujících skupin, podle:

- Typu jádra – voštiny, balza, polymerní pěny.
- Typu potahu – prepregy sklené, uhlíkové.

Sendvičová konstrukce je tvořena z několika tenkých potahů prepregu a uprostřed se silným jádrem. Jádro musí mít velmi vysokou pevnost ve smyku a tuhost při stlačení. Kompozitní sendvičová konstrukce se nejčastěji vyrábí vytvrzením v autoklávu za tepla, vakuovým vakem, nebo lze použít vulkanizační lis.



Obr. 14. Konstrukce kompozitního sendviče [8]




V leteckém průmyslu se neaplikují potahy z uhlíkových vláken s jádrem hliníkového materiálu, jelikož dochází ke korozi hliníku, což je nežádoucí. Například potahy ze slitin titanu se používají pro speciální částice ve vysokoteplotních konstrukcích. Potahy mnoha komponent, jako spoilery automobilů, aerodynamické prvky letounů, které jsou velmi tenké, na sebe položené tři až čtyři vrstvy, avšak nevýhodou je, že nejsou dobře odolné nárazům.

2.1 Vlastnosti sendvičů

Sendvičové konstrukce mají vysokou tuhost v ohybu, při minimální hmotnosti v porovnání s hliníkovou a kompozitní laminátovou konstrukcí, zároveň mají vysokou nosnost a dlouhou životnost. V tab. 2 je k vidění výhoda použití sendvičové konstrukce. Zvýšení tloušťky jádra se značně navyšuje tuhost konstrukce, zatímco hmotnost se navyšuje velmi pozvolna. U sendvičů musíme zohledňovat, že jsou z několika vrstev a každá vrstva může mít jiné vlastnosti, které taky ovlivňuje:

- druh matrice
- druh vláken
- tvar a orientace vláken
- druhu a tloušťka potahu
- druh a tloušťka jádra
- místo aplikace

Tab. 2. Porovnání tuhosti s nárůstem pevnosti a hmotnosti [21]

	Celistvý materiál 	Sendvič 	Sendvič s vyšším jádrem 
Tuhost	100	7x tužší 700	37x tužší 3700
Pevnost	100	3,5x pevnější 350	9,2x pevnější 920
Hmotnost	100	3% nárůst hmotnosti => 103	6% nárůst hmotnosti => 106

2.2 Poruchy sendvičů

Konstruktéři sendvičů musí prozkoumat všechny možné maxima, jinými slovy potenciál daného sendviče. Spolehlivost se zkoumá po celou dobu využívání i výroby sendviče. Jako vadu vyhodnocujeme jakoukoliv poruchu omezující využívání sendviče.

2.2.1 Vady ovlivňující životnost

Poruchy vznikají při výrobě, nebo při používání sendviče. Mezi vady ovlivňující životnost patří delaminace, neslepené plochy, velké množství pryskyřice v určitém místě, bubliny.

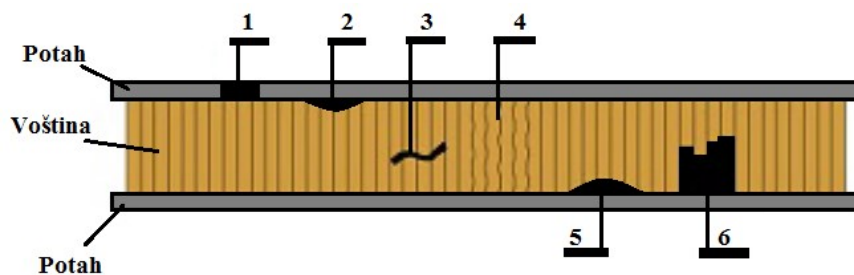
- Delaminace – porušení soudržnosti ve dvou sousedních vrstvách vlivem nedostatečné adheze. Z důvodu nedostatku pojiva, teploty tváření, rychlosti ochlazování.
- Vzduchové bubliny – Při smíchání výztuže, nebo vlivem nedostatečného tlaku při lisování. Velikost bublin je od miniaturních v μm až po velké v mm.

- Neslepené plochy – místa bez pojiva, které vzniknou přesycením výztuže z jiné vrstvy.
- Trhliny – Narušení soudržnosti materiálu. Trhliny jsou různě orientované. Vznikají vlivem teplotního pnutí, nebo nárazy při provozu.

2.2.2 Vady u sendvičových konstrukcí

V sendvičových konstrukcích dochází k deformování vlivem zatěžování, únavou, vlivem okolních podmínek jako působení vlhkosti. Delaminace se vyobrazuje vymalováním mapy na jádru. Problém tohoto typu je způsoben špatnou přípravou jádra (není dostatečně odmaštěné), malým tlakem při výrobě sendviče. Obr. 15. Ukazuje nejčastější poruchy panelu.

- 1 - delaminace mezi potahy
- 2 – rozlepení mezi potahem a jádrem
- 3 – prasklina voštinového jádra
- 4 – rozdrcená voština
- 5 – rozlepení mezi potahem a protlačeným jádrem
- 6 – vniknutí tekutiny do sendviče [16]



Obr. 15. Vady u sendvičových konstrukcí

- Zlomení sendviče

Potah i jádro by mělo být schopné odolávat tahovým, tlakovým i smykovým napětím. Adhezivní vrstva musí být schopna přenést na jádro zatížení. Obr. 16 – a)

- Zvlnění

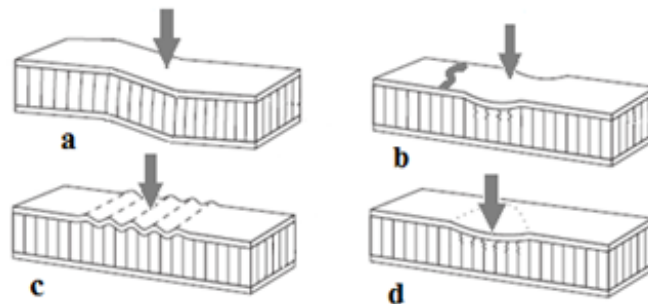
Dochází k němu z důvodu malého modulu průřezu ve smyku v porovnání se zatěžující silou. Obr. 16 – c). Potah se zvlní a jádro se mírně deformuje.

- Delaminace a zborcení jádra

Potah ani jádro neodrazí vytvořenou tlakovou sílu zevnějšku a dochází ke stlačení jádra obr. 16 – b). Delaminace se vyobrazí vykreslením mapy po celé šířce sendviče.

- Lokální stlačení

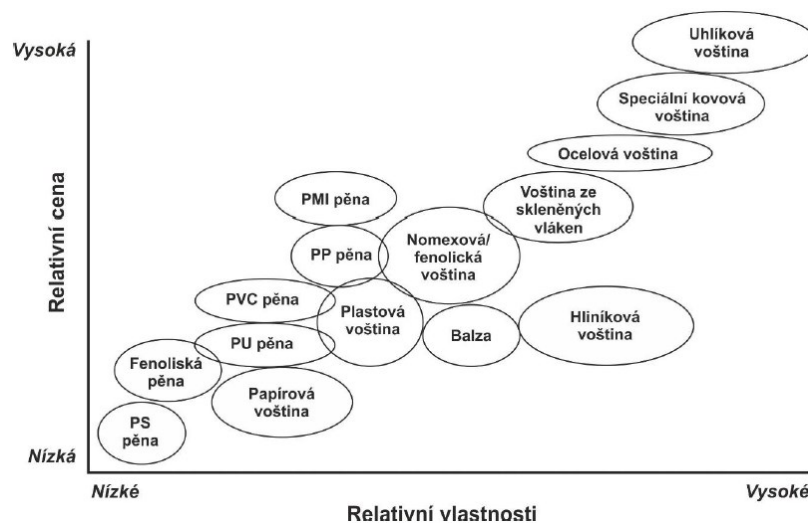
Neodolá-li jádro zvýšené tlakové tuhosti, dojde ke ztrátě stability a následnému propadu na sendviči obr. 16 – d). Může také nastat odlepení vnější vrstvy od propadnutého místa.



Obr. 16. Druhy poruch při ohybovém zatížení a) zlomení sendviče b) lokální ztráta stability a delaminace c) zvlnění potahu d) lokální stlačení jádra [18]

2.3 Jádra sendvičů

Nejvíce se používají jádra jako voštiny a pěny. Jádra jsou umístěny mezi potahy a navrhovány tak, aby měly pokud možno co nejnižší měrnou hmotnost, ale taky zajišťovaly dostatečnou tuhost. Dalšími požadavky jsou izolační vlastnosti a tlumící schopnost ve stavebním průmyslu, u hliníkových voštin pak odolnost proti vysokým teplotám a absorbování vody.



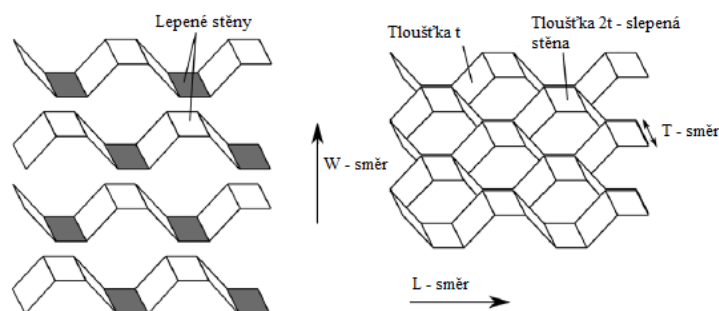
Obr. 17. Závislost ceny na výkonových vlastnostech kompozitních jader [33]

Jádra sendvičů můžeme rozdělit:

- Voštiny – kovové a nekovové
- Pěny – kovové a polymerní
- Materiály na přírodní bázi – korek a balza
- Tvarová jádra

2.3.1 Voštinové jádra

Voštinové jádra nejčastěji tvořené profilem šestihranů, který napodobuje tvar včelího plástu, anglicky Honeycomb. Chování panelů je ortotropické, proto musíme rozlišovat zatížení ve třech směrech voštinového jádra, jak je uvedeno na Obr. 18 - W, L a T. Stěny voštiny jsou vyrobeny z velmi tenkých vrstev kovu, nebo nekovu a tloušťky stěn se liší v místě, kde jsou stěny k sobě slepeny a kde ne. [8, 13]

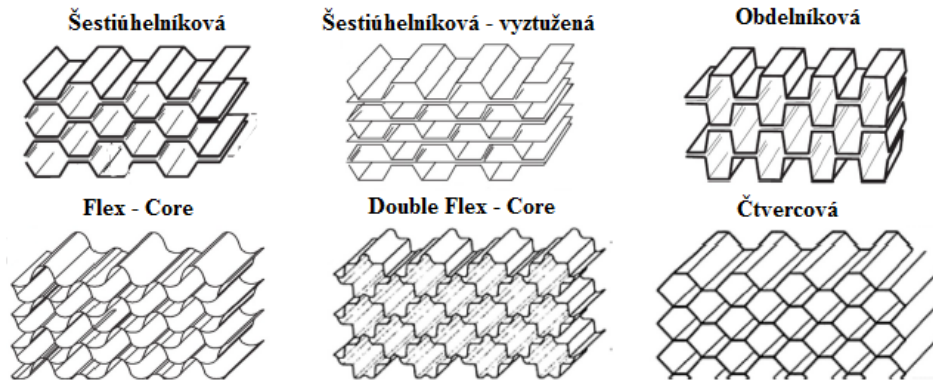


Obr. 18. Konstrukce voštiny [13]

Velikosti buněk ve voštině jsou vždy stejné a při totožné hustotě mají voštiny lepší mechanické vlastnosti než pěny, jakožto jádra z polymerů. Na Obr. 19. jsou tvary buněk, jejichž zpracování závisí na způsobu výroby a materiálu.

Charakteristické znaky voštin:

- Tvar buňky
- Velikost buňky
- Tloušťka, šířka, délka voštiny
- Tloušťka stěny plechu



Obr. 19. Tvary buněk u voštin [16]

2.3.1.1 Rozdělení voštin podle geometrie

- Šestiúhelníková – nejběžnější tvar z kovových i nekovových materiálů, nejefektivnější.
- Šestiúhelníková vyztužená – vyztužující list vede středem buněk a zaručuje lepší mechanické vlastnosti.
- Obdelníková – vhodné pro panely s jednou křivostí.
- Flex-core, Double Flex - core – voštiny s tímto tvarem mají dobrou tvarovatelnost, čili jsou vhodné pro panely s dvojitou křivostí. [1, 5, 16]

2.3.1.2 Kovové voštiny

Do této skupiny řadíme materiály hliníkových slitin (obchodních označení např. 3003, 2024,5056) nerezová ocel již méně používaná a titan.

- Voštiny z hliníkových slitin

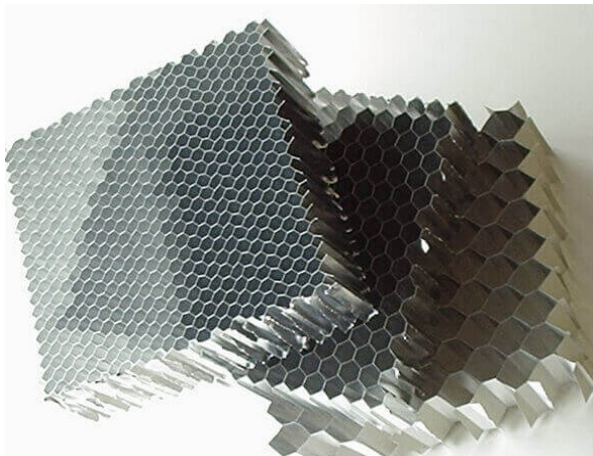
Hlavní informace voštiny - z jakého je materiálu, velikost buňky, slitina, tloušťka plechu, měrná hmotnost, zda je voština korozivzdorně ošetřena. Povlak je na bázi chromátu, s testy americké armády, nebo kyseliny fosforečné eloxované, která zajišťuje sílu vazby v teplém, mokřém prostředí. [16, 27]

- Voštiny z nerezové oceli

Dobré vlastnosti s ohledem na přenos tepla a odolnost proti teplu, dále mají dobré elektromagnetické stínění.

- Titanové voštiny

Speciální materiály, které se vyskytují výjimečně. Mají vysokou pevnost a nízkou měrnou hmotnost, jsou odolné na chemikálie a působení vysokých teplot. [24]



Obr. 20. Hliníkové voštinové jádra [31]

2.3.1.3 Nekovové voštiny

Nejrozšířenější zastoupení materiálů tvoří armidový papír (Nomex®), Armidová vlákna, Skleněná vlákna, Uhlíková vlákna. [17]

- Nomexové voštiny

Vyrobené z papíru zvaného Nomex®, který je tvořený armidovým papírem. Ponořením do fenolické pryskyřice vznikne jádro s dobrou odolností proti ohni, tepelnou stabilitou do 180°C a pevností. Stále více se uplatňující z důvodu nízké objemové hmotnosti. Nomexové voštiny jsou dostupné s šestiúhelníkovou, obdélníkovou a Flex-Core modifikací buňky. [32]



Obr. 21. Nomexové voštinové jádro [32]

2.3.2 Pěny

S voštinami nejvíce zastoupená skupina. Mechanické vlastnosti jsou závislé na objemové hmotnosti, jsou levnější oproti voštinovým jádrům, avšak nedosahují tak kvalitních vlastností. Lze je snadno obrábět, více tlumí a méně absorbují vodu. Jsou dobrými tepelnými izolátory, proto se například používají sendviče s tímto jádrem na skříně nákladních vozů přepravující mražené produkty.

- Kovové pěny – hliníkové
- Polymerní pěny – PVC, PET, PS, PUR, PP [33, 34]



Obr. 22. Hliníková pěna [37]

2.4 Potahy

Potahy kompozitních sendvičů volím podle druhu aplikace daného sendviče. U sendvičů může mít potah i několik vrstev, zpravidla o stejné tloušťce i materiálu, ale může se objevit i sendvič s odlišnými materiály potahů, jednotlivých vrstev. Podle materiálu je dělíme:

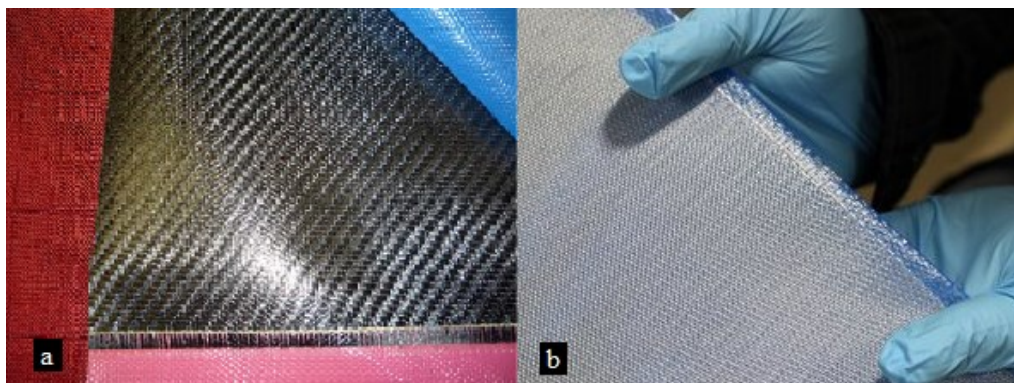
- Kovové – hliníkové slitiny, oceli, titanové slitiny
- Nekovové – kombinace matrice (epoxidové, fenolové, vinylesterové) s výztuží v podobě (skleněných, uhlíkových vláken) – prepregy

2.5 Prepregy

Nejvíce rozšířené potahy, u kterých je daný podíl matrice (pryskyřice) a vláken v dané vazbě. Nejvíce se vyskytuje prepreg specifikace - keprová vazba, pryskyřice epoxidová a vlákna v poměru 30/70. Nanášení matrice se realizuje jednostranně, nebo oboustranně podle požadavku, nástřikem, nebo ponořením (lubrikací).

Prepregy jsou běžně popsány obchodním názvem, typem pryskyřice, typem a tvarem vláken, zda jde o pásku, tkaninu či roving. Množství, datum výroby důležité pro spotřebování, očekávaná trvanlivost s doporučenými podmínkami pro zpracování.

Nejvíce se dodávají v rolích, rozměry jsou udávány nejčastěji v palcích/centimetrech. Dle průřezu je nejvíce odebíráno rozměrů 38/97 pro sklo a 42/10 pro grafit. Vrstvy prepregu se od sebe oddělují lehce odnímatelným plastovým nebo papírovým film, jenž se sundává těsně před zpracováním. [15, 16]



Obr. 23. a - uhlíkový prepreg, b - prepreg z e-vláken [39]

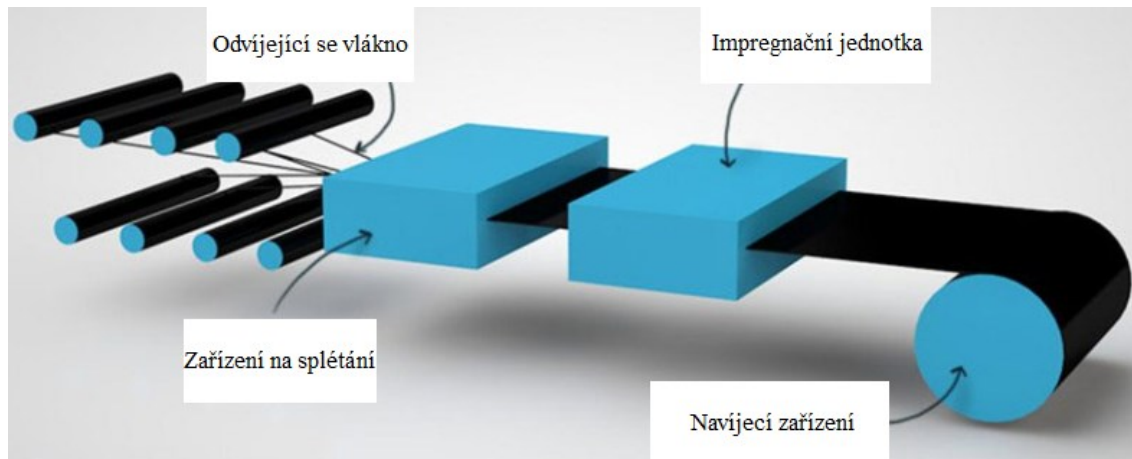
Skladovací prostory musí být suché a uzavřené, které nijak nereagují. Z tohoto důvodu se uchovávají prepregy v mrazících boxech okolo 0°F (-18°C), kdy za této teploty jsou stabilní téměř celý rok. Následné zpracování by mělo probíhat v pokojové teplotě a při zpracovávání se prepregy vytvrzují za výrobcem předepsaných hodnot, nejčastěji v intervalu 70-180°C po dobu 20-30 minut. Kritéria, ovlivňující výběr prepregu jsou:

- Dosahuje se lepší opakovatelnosti;
- Úspora hmotnosti;
- Zlepšení mechanických vlastností;
- Lepší vzhled;

Kontroluje se rovinnost vláken v podélném směru; mezery, které dle specifikací nemají přesahovat 0,76mm. Obsah vláken, pryskyřice, vlhkosti, plnidel, plošné hmotnosti a dalších stejně jako metody zkoušení je možné k nahlédnutí v normách ASTM.

Způsoby výroby prepregu:

- Ruční mechanické kladení
- Automatické kladení pásů
- Automatické kladení vláken [9, 15, 21]



Obr. 24. Výroba prepregu [28]

Procesní technologie:

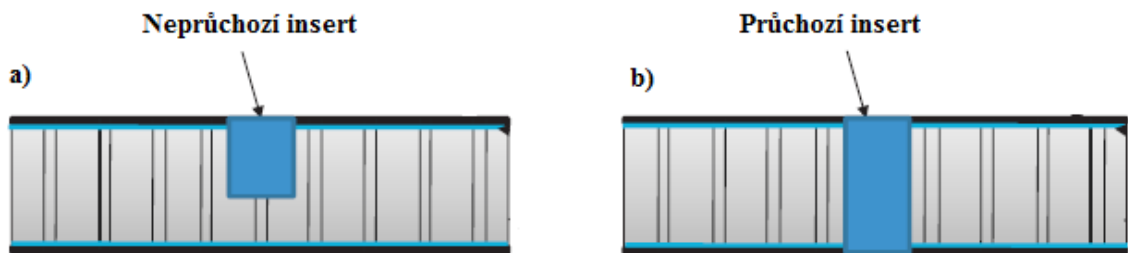
- Pomocí vakua a pece
 - výrobky na které se nekladou vysoké nároky na jakost, pevnost, opakovatelnost.
- Autokláv
 - velmi vysoce kvalitní součástky pro letadla, sportovní monoposty.
- Lisování
 - tvarově nenáročné součástky. [5, 13, 21]

3 INSERTY

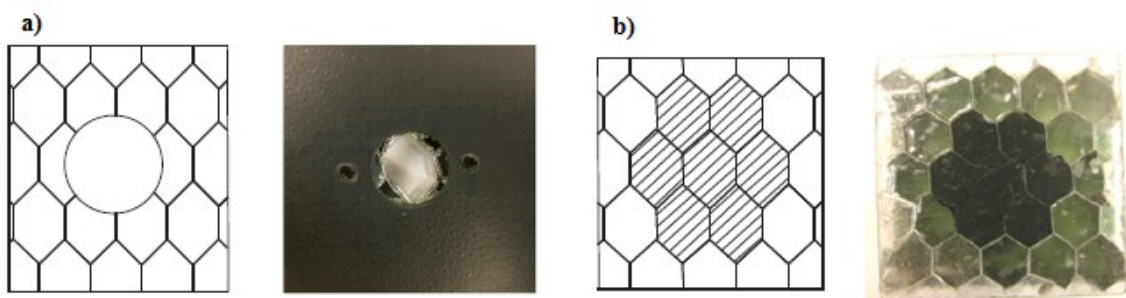
Kovové vložky přenášející vnější síly do sendviče. Inserty umožňují propojení konstrukce panelu s vnějším objektem. Inserty pro menší zatížení se aplikují k upevnění stěn, polic v dopravních prostředcích zpravidla v interiéru, u insertů pro vysoké zatížení je použití u křídel, dveří, podvozku.

Insert se vkládá do předpřipraveného otvoru v sendviči a následně se prostor kolem sendviče plní epoxidovou pryskyřicí, která se nechá vytvrdit. Na Obr. 25 je vyobrazení uložení insertu průchozího sendvičem a insertu neprůchozího. Pro správné upevnění insertů se musí systém spoje skládat ze tří částí:

- Insertu
- Sendvičové struktury
- Upevňujícího materiálu pro insert [35]



Obr. 25. a – Insert neprůchozí sendvičem, b – insert průchozí sendvičem



Obr. 26. a – příprava jádra pro vyplnění pryskyřicí, b – vytvrzená pryskyřice v jádru [40]

3.1 Rozdělení insertů

- A – Inert upevněný při výrobě sendviče

Vyrábí se ve větších rozměrech, převážně z hliníkových slitin a do sendvičů se zcela zapouští.

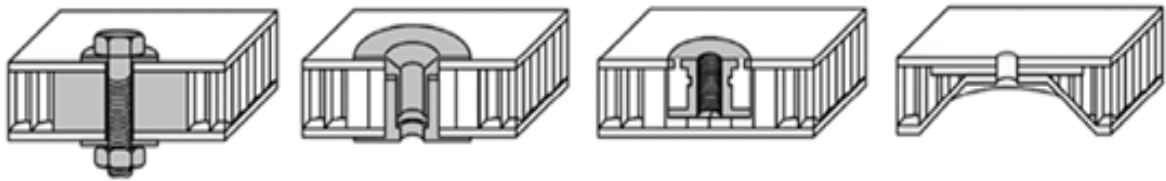
- B – Inert zalitý výplní jádra

Rozměry od 3 do 70mm, vyráběné ze slitin hliníku, titanu a oceli. Zpravidla zapuštěné zcela, někdy pouze částečně a část je vně insertu.

- C – Mechanicky upnutý inert

Zde se můžou projevat nedokonalosti při montáži insertu vyosením, což se projeví nedokonalou soudržností. Inert může být lehčeji ze sendviče vytrhnutý.

Inserty se v sendvičích můžou připravovat za vyšších teplot, to jsou tzv. „Hot bonded“, nebo za normální pokojové teploty „Cold bonded“. Při výběru insertu jsou rozhodující jeho velikost, z jakého je materiálu. Všechny tyto informace jsou k nahlédnutí v normě. [35, 38]

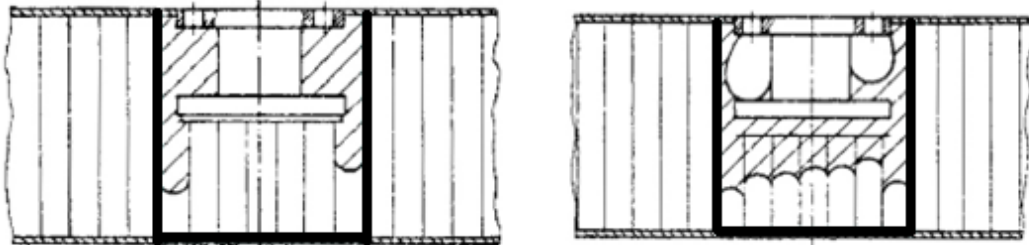


Obr. 27. Různé typy insertů [47]

3.1.1 Vady při montáži insertů

- Neúplné vyplnění jádra pryskyřicí
 - Z důvodu krátké doby plnění.
 - Neperforováním jádra, nebo velkou viskozitou pryskyřice.
 - Malá vzdálenost konce insertu od stěny sendviče.

- Vzduchové bubliny
 - při plnění může vzniknout vzduchová bublina ve výplni jádra, v horším případě na vztyčné ploše s insertem. Tato chyba je zapříčiněna nízkou viskozitou vyplňujícího materiálu. [35, 40]

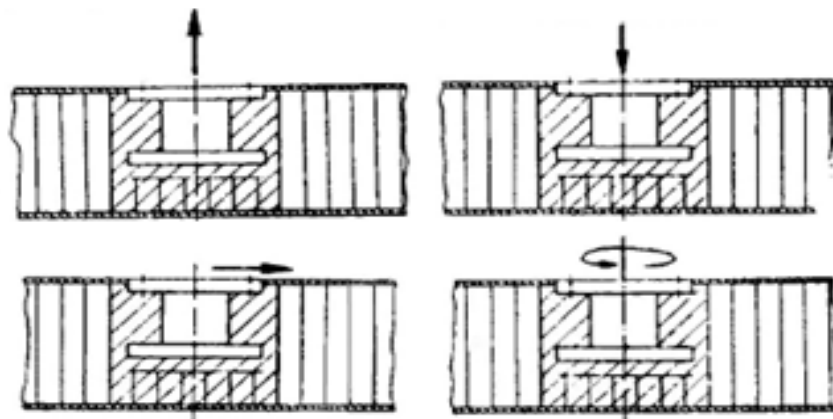


Obr. 28. Nedokonalé vyplnění jádra pryskyřicí

3.2 Síly působící na inserty

Na inserty působí zatížení, které je na obr. 29.

- Tahové – ze sendviče ven, normálově
- Tlakové – normálové zatížení, dovnitř sendviče
- Smykové – namáhání tečné (v rovině)
- Zatížení krutem [35, 38, 40]



Obr. 29. Druhy sil působících na inserty [35]

4 ÚNAVOVÉ CHOVÁNÍ KOMPOZITŮ

Požadavkem na kompozitní sendviče je plnění dané funkce po určitou dobu životnosti. Životností kompozitních sendvičových konstrukcí se zabývá moje práce. Vlivem dlouhodobého cyklického zatěžování může docházet k zahřívání. Důležitý pojem únava materiálu je popsána těmito vztahy:

- Lom součásti vzniká z důvodu opakujícího se zatížení, pro něhož je rozhodující počet změn, nikoli doba provozu.
- Maximální a minimální průhyb ovlivňuje poškození materiálu;
- Životnost materiálu lze znázornit ve Wöhlerově křivce;
- Z experimentálních výsledků lze sestavit takový průhyb, pod kterým nedojde k únavovým lomům.
- Geometrické vruby snižují únavovou pevnost o hodnotu na vrubu a materiálu.

4.1 Životnost kompozitních sendvičů

Konstrukce jsou reálně zatěžovány kmitavým zatížením v průběhu jejich používání. Jedná se o náhodné zatížení, které popisuje S-N křivka. Je to závislost amplitudy průhybu y_a na počtu cyklů N . Křivka je často popsána v (log) a pak se mění na přímku. Šikmá část přímky lze vyjádřit:

$$\log N + b \log \sigma = \log c \quad (1)$$

σ - amplituda napětí [MPa],

N – počet cyklů [-],

b, c – konstanty [-],

Po odlogaritmování má rovnice tvar následující:

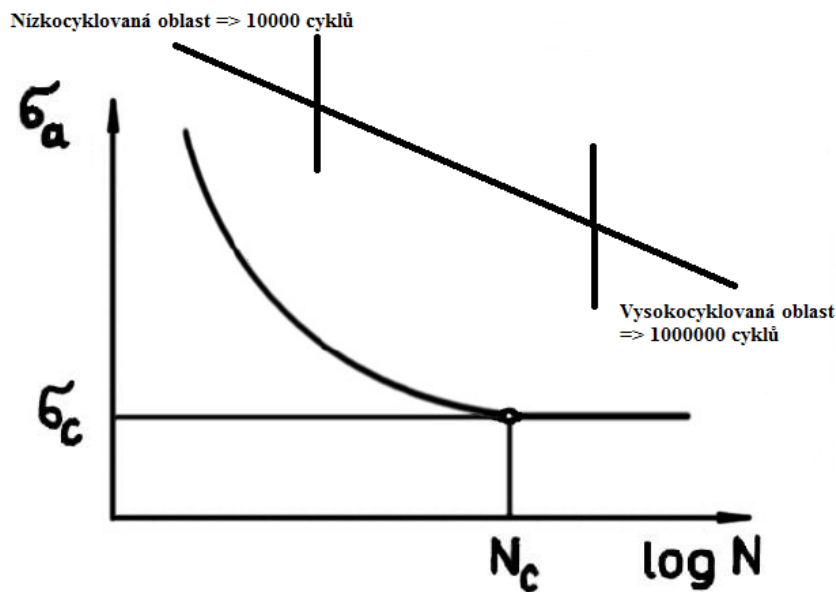
$$N \cdot \sigma^2 = c \quad (2)$$

4.1.1 Únavové křivky

U Wöhlerovy křivky může být svislá osa popsána i jinou jednotkou než napětím, např. poměrná deformace, nebo **průhyb**. S – N diagram si můžeme rozdělit na tři oblasti:

- Nízko cyklovaná – zde je vysoké zatížení při malém počtu cyklů do 10000.
- Střední oblast – oblast mezi nízko a vysoko cyklovanou.
- Vysoko cyklovaná – V této části je malé zatížení a velký počet cyklů, cca. 10^6 [2,19]

Od počtu cyklů, kdy je křivka rovnoběžná s osou x se dosahuje meze únavy sendviče σ_c což je neomezená životnost.



Obr. 30. Wöhlerova křivka pro kompozitní materiál [2]

4.1.2 Proměnlivé zatížení

Cyklování má dvě složky - *deterministickou (systematickou)*
 - *stochastickou (náhodnou)*

Jestliže se podaří deterministickou složku vyloučit, pak máme náhodný proces, který má rozdílný průběh, ale stejné statistické charakteristiky.

- Proces stacionární – statistické charakteristiky v celém rozsahu stále a nezávislé na čase.
- Proces ergodický – hustota pravděpodobnosti v jednom časovém okamžiku rovna hustotě pravděpodobnosti podél zvolené realizace za zvolený časový interval.

Zkušební namáhání z hlediska únavového poškození dělíme na měkké a tvrdé zatěžování.

4.1.2.1 Tvrdé zatěžování

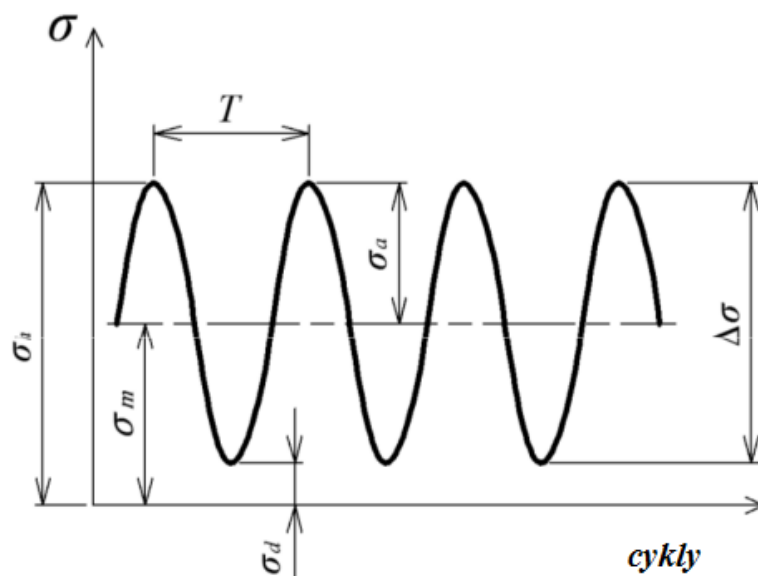
- Když je poměrná deformace závislostí mezi počtem kmitů do poruchy N a amplitudou poměrné deformace ε .
- Základ pro výpočet životnosti při nízko cyklovém namáhání jsou křivky.
- Toto zatížení se používá při experimentech s tlakovými nádobami.

4.1.2.2 Měkké zatěžování

- U měkkého zatížení je řízená - amplituda napětí σ_a [MPa], nebo amplituda průhybu y_a [mm] se kterou pracují já, je konstantní.
- Zkoušky na různých hladinách průhybu y [mm].
- Při experimentech na součástech automobilů.

4.2 Druhy cyklického zatěžování

U cyklického zatěžování ovlivňuje životnost panelu velikost průhybu, složení sendviče, geometrický tvar výztuže, druh potahu, technologie výroby a v neposlední řadě taky rozměry zkoušeného vzorku. Prvky můžou absorbovat náhodné zatížení, snahou je však nahradit toto náhodné zatížení sinusovým průběhem, jehož základní parametry jsou zobrazeny na Obr. 31, kde jsou vyobrazeny napětí, my však pracujeme s průhyby. [19, 42]



Obr. 31. Zátěžový cyklus

σ_h – horní napětí cyklu

σ_d – dolní napětí cyklu

σ_a – amplituda napětí

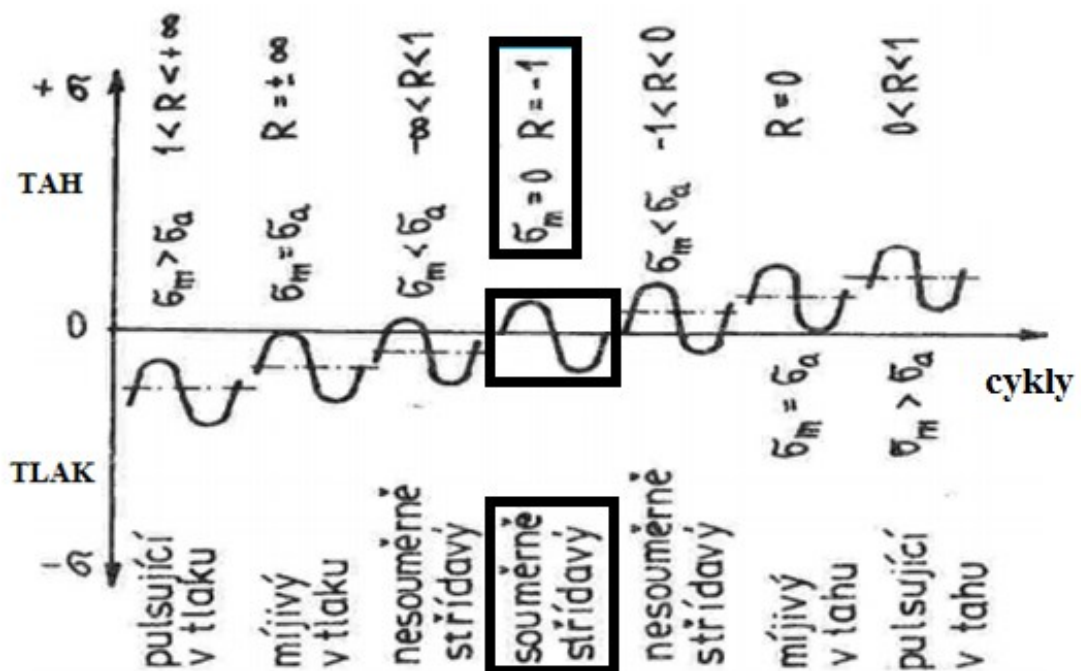
σ_m – střední napětí

$\Delta\sigma$ - rozkmit napětí

T – perioda kmitu [42]

Zatížení vzorku může probíhat konstantním zatížením, nebo průhybem. Druhá varianta je vlivem plynulejšího vzniku vad přijatelnější, po narušení se zatížení zmenšuje, avšak ne vždy dojde k deformaci vzorku. Dle způsobu zatížení probíhá cyklus v kladných a záporných hodnotách (tah/tlak), nebo pouze v jedné z nich. Koeficient R se mění pro různé typy cyklického zatížení. Zatížení dělíme do třech skupin:

- Pulsující zatížení - a) tlakové, b) tahové
- Míjivé zatížení – a) tlakové, b) tahové
- Střídané zatížení – a) souměrné, b) nesouměrné [2, 19, 41]



Obr. 32. Typy cyklického zatížení [41]

4.3 Faktory ovlivňující únavu kompozitů

Poškozování kompozitních materiálů je složitější jako v případě kovů. U kompozitních materiálů je S – N křivka ovlivněna nejrůznějšími materiálovými faktory a dále zkušebními parametry, mezi které hlavně patří:

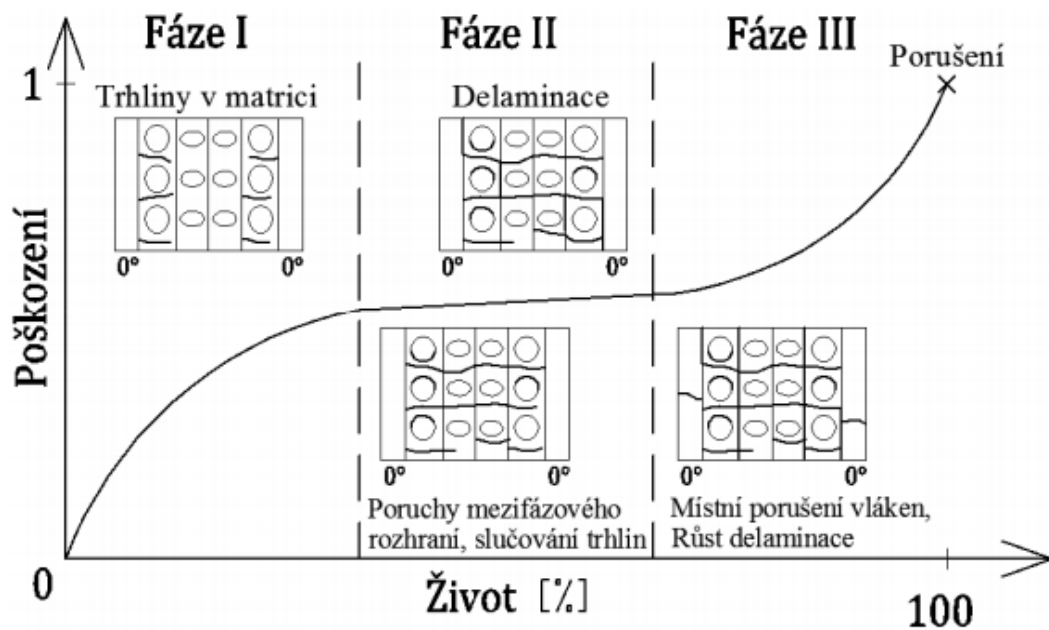
- Materiál matrice a vlákna,
- Tvar součásti
- Orientace vlákna,
- Objemový podíl výztuže,
- Adheze matrice k výztuži,

A zkušební parametry:

- Typ zatížení,
- Průhyb,
- Frekvence,
- Vliv prostředí (vlhkost, teplota),

4.3.1 Módy porušení

V průběhu zatěžování materiál neustále pracuje a dochází k nezvratným změnám, vlivem plastické deformace. Vyobrazení těchto poruch můžeme vidět na Obr. 33. Tyto změny můžeme rozdělit do třech hlavních etap narušování materiálu: [41, 42]



Obr. 33. Průběh poškození kompozitního materiálu [45]

4.3.1.1 Praskání matrice

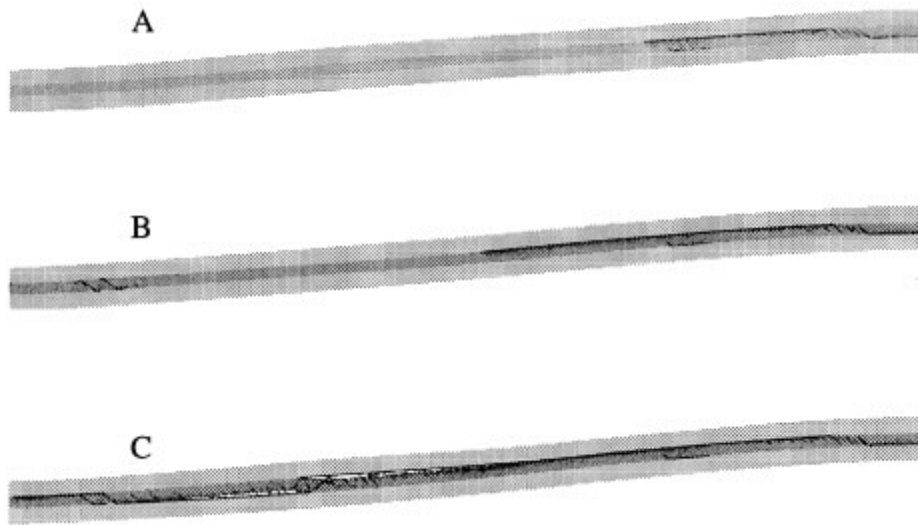
V první fázi dochází k narušení v podobě praskání matrice, které nastává v první čtvrtině životnosti materiálu. Tento druh poškození je však iniciátorem následující etapy narušení a to velmi podpurným. Praskliny nejvíce vznikají vlivem tahového zatížení přes celou šířku.

4.3.1.2 Lámání vláken, spojování prasklin, narušení mezifázového rozhraní, počátek delaminace

Další etapa trvá do přibližně do 75% životnosti laminátu, kde vznik těchto poruch je poněkud pomalejší v porovnání s předchozími. Prasklina matrice končí na vláknu a důsledkem toho se zatížení iniciuje právě na vlákno, které se následně poruší. Vlivem podélného narušení se praskliny seskupují. Následky vnitřního napětí v matrici a vláknech dochází k počátku delaminace materiálu.

4.3.1.3 Delaminace a porušování vláken

V poslední části se zvětšují podélné praskliny a zapříčiní inovaci dalších příčných, které konstruují růst delaminace a poklesu tuhosti. Je – li materiál namáhán vlivem tlaku, materiál se od sebe odděluje vlivem tohoto zatížení nejrychleji. [2, 43]



Obr. 34. A – praskání matrice, B – počátek delaminace, C – delaminace a zvětšování a propojování prasklin [44]

4.4 Únavové vlastnosti kompozitních sendvičů

Sendviče jsou konstruovány tak, aby jejich životnost byla co nejvyšší a ukázaly se jejich přednosti potahů, voštiny. Únavové zatěžování sendvičů není značně prozkoumané a nejsou vyvozené jednoznačné výsledky a závěry na rozdíl od kovových materiálů. Únavové zkoušky popisují některé následující rovnice.

Pro sendvič s PVC jádrem je S – N křivka se souřadnicemi v log – log, popisuje přímky:

$$\log \Delta\sigma = -\frac{1}{m} \log N + C^* \quad (3)$$

$1/m$ – sklon přímky v log-log souřadnicích,

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

$\Delta\sigma$ - rozdíl mezi maximálním a minimálním napětím, který je popsán v rovnici (4)

$$\Delta\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} = (1 - R)\sigma_{\max} \quad (4)$$

$\Delta\sigma$ - rozkmit napětí,

R – součinitel asymetrie cyklu,

$$R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} \quad (5)$$

σ_{\min} – dolní napětí cyklu [MPa]

σ_{\max} – horní napětí cyklu [MPa]

Mezní stav sendvičů

Je to ztráta schopnosti plnit provozní funkci kompozitního sendviče. Pouhým působením ruky můžeme sendvič ohnout a způsobit poruchu vzorku. Nejčastější předpokládané vady:

- Lokální zborcení jádra,
- Zdeformované jádro po celé šířce sendviče,
- Prasklý sendvič,
- Delaminace potahu nebo prasknutí potahu z prepregu.

4.5 Únavové vlastnosti insertů

Při zatěžování může být poškozeno;

- Jádro
- Potah
- Výplň jádra – (hmota okolo insertu)
- Insert

Značně toto ovlivňuje způsob umístění insertu, druh zalévací hmoty, množství zalévací hmoty, druh jádra a jeho rozměry. Nejvíce se porušení předpokládá ve zborcení jádra spíše jako u potahu, nebo porušení insertu. Závislost akumulace poškození při cyklickém zatížení nejvíce ovlivní:

- Zatěžovací sekvence – druh cyklu, počet cyklů, průhyb;
- Druh insertu – materiál, velikost, druh závitu;
- Vliv teploty, vlhkosti. [35, 40]

5 STATISTICKÁ ANALÝZA JEDNOROZMĚRNÝCH DAT

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 odlehlé hodnoty, využívá se robustních odhadů a to hlavně kvantilové odhady. Zda se se naleznou jiné jako normální rozdělení, používají se maximálně věrohodné odhady jeho parametrů.

5.1 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.

Neboli 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 od -2 147 483 648 do 2 147 483 648

5.2 Analýza malých výběrů

Malé výběry jsou ty, které obsahují méně jako dvacet naměřených hodnot. U souborů s méně jako deseti hodnotami, nelze zamítnout normalitu. Analýzu malých výběrů užíváme pouze tam, kde z ekonomických, nebo časových důvodů není možné získat větší počet dat. Tento případ výběrů je značně zatížený mírou nejistoty.

5.2.1 Zvláště malé výběry

Počet naměřených hodnot je $n=2$: $100(1-\alpha)\%$ - interval spolehlivosti střední hodnoty

$$\frac{x_1 + x_2}{2} - T_\alpha \frac{|x_1 - x_2|}{2} \leq \mu \leq \frac{x_1 + x_2}{2} + T_\alpha \frac{|x_1 - x_2|}{2} \quad (6)$$

- Pro normální rozdělení:

$$T_\alpha = \text{ctg}(\alpha\pi/2) \quad (7)$$

$$T_{0,05}=12,71$$

- Pro rovnoměrné rozdělení:

$$T_\alpha = 1/\alpha - 1 \quad (8)$$

$$T'_{0,05}=19$$

Počet naměřených hodnot je $n=3$: $100(1-\alpha)\%$ - interval spolehlivosti střední hodnoty

$$\bar{x} - T_\alpha \frac{s}{\sqrt{3}} \leq \mu \leq \bar{x} + T_\alpha \frac{s}{\sqrt{3}} \quad (9)$$

- Pro normální rozdělení:

$$T'_\alpha \approx 1/\sqrt{\alpha} - 3\sqrt{\alpha}/4 \quad (10)$$

$$T'_\alpha=4,30 \text{ a pro rovnoměrné rozdělení } T_{0,05}=5,74$$

5.2.2 Malé výběry

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

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

$$H = \frac{\left(\text{int} \left(\frac{(n+1)}{2} \right) \right)}{2} \quad (11)$$

- nebo druhá rovnice,

$$H = \frac{\left(\text{int} \left(\frac{(n+1)}{2} \right) + 1 \right)}{2} \quad (12)$$

dle toho se určuje, které číslo vyjde celé a dolní pivot je potom,

$$x_D = x_{(H)} \quad (13)$$

a horní pivot,

$$x_H = x_{(n+1-H)} \quad (14)$$

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

$$P_L = \frac{(x_D + x_H)}{2} \quad (15)$$

- Odhadem parametru rozptýlení je pivotové rozpětí,

$$R_L = x_H - x_D \quad (16)$$

- Náhodná veličina, kterou můžeme použít k testování. Tabulka 3 zobrazuje vybrané kvantily $t_{L,0.975}(n)$. Rozdělená veličina má přibližně symetrické rozdělení.

$$T_L = \frac{P_L}{R_L} = \frac{x_D + x_H}{2(x_H - x_D)} \quad (17)$$

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

Tab. 3. Tabulka Hornových kvantilů

n	$1 - \alpha =$	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

II. PRAKTICKÁ ČÁST

6 CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE

Hlavním cílem diplomové práce je prozkoumat životnost kompozitních sendvičových konstrukcí s voštinovým jádrem, ve kterém bude umístěná insertová vložka, s potahem z prepregu uhlíkového, nebo skelného.

V prvním části je cílem vyrobit vzorky pro cyklickou únavovou zkoušku v ohybu a po dokončení výroby, vložit dovnitř sendvičů insertové vložky. Následně kompozitní sendviče testovat na přístroji pro cyklickou únavovou zkoušku, zaznamenat data a poté je statisticky zpracovat. Poslední částí je ze statisticky vyhodnocených dat sestavit Wöhlerovy křivky, vyhodnotit výsledky a zjistit vady, které vznikly na testovaných vzorcích.

7 VÝROBA ZKUŠEBNÍCH TĚLES

Moje diplomová práce se zabývá výrobou kompozitních sendvičů z hliníkové voštiny a potahy z uhlíkových vláken a vláken skleněných. Následně se do sendvičů zakomponovaly insertové vložky a vzorky se testovaly.

K realizaci vzorků pro praktickou část jsem využíval prostory Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně a to na fakultě technologické U15 v laboratoři mechanických zkoušek 306 a dílen na fakultě aplikované informatiky U5.

7.1 Příprava voštin

Prvním krokem byla příprava nomexových a hliníkových voštin. Voštiny se vyřezávaly na desky o největším možném rozměru pro výrobu sendvičů ve vulkanizačním lisu. Vyřezané tvary byly rozměrů 200 x 180 mm.

Pro jádro byla využita následující voština:

- **Hliníková**
 - Dodavatel: EURO-COMPOSITES
 - Marketingové označení: ECM 6,4-60, pozn: velikost buňky [mm] - hustota [kg/m³]
 - Materiál: Hliníková slitina Alu-Alloy 3003 (AlMnCu)
 - Tloušťka voštiny: 8 [mm]

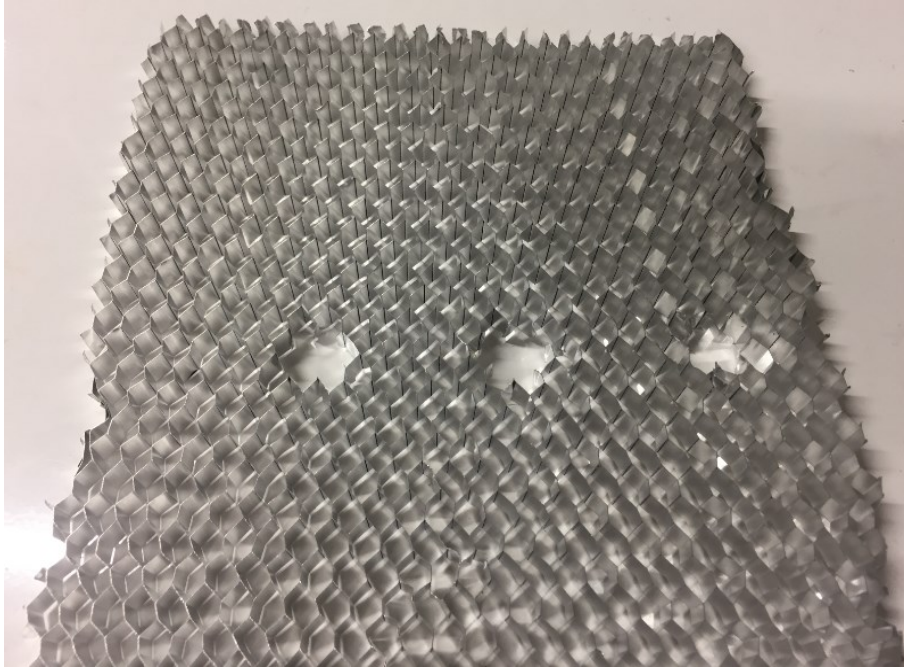
Tab. 4. Vlastnosti hliníkové voštiny

	Hliníková
Pevnost v tahu [MPa]	2,96
Pevnost ve smyku [MPa]	0,95-1,72
Modul ve smyku [MPa]	166-370

Hodnoty se liší dle směru orientace buňky ve směru *W* a *L*. Směry k vidění. na obr. 18.

Následně se hliníkové voštiny zbavily mastnoty pomocí technického benzínu a nechaly se vysušit v laboratorních podmínkách přibližně jeden den. Po tomto úkonu následovala příprava otvoru pro insertovou vložku v jádru. Jednotlivé stěny buněk se vyřízly pomocí vysouvacího nože a zbytky hran se přitlačily ke stěnám popřípadě odstříhly tak, aby nebyla narušena buňka další.

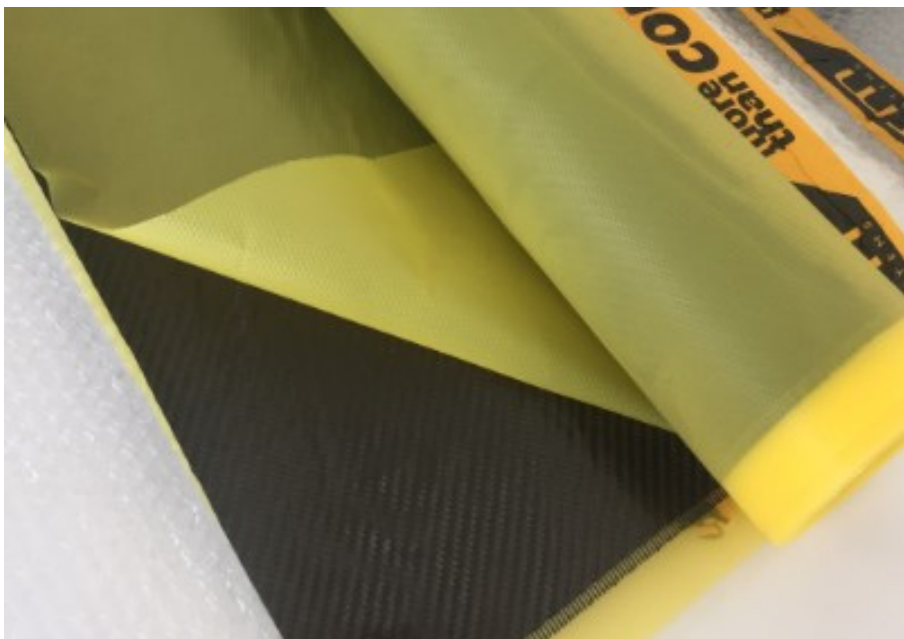
Velikost díry jsem zvolil více jako $\varnothing 9\text{mm}$, a rovněž dostatečně daleko od okraje sendviče. Rozměr je do jisté míry orientační, jelikož při odřezávání materiálu se otevírala díra s ohledem na "nepravidelnost" buněk voštiny, čili v některém místě může dosahovat díra protilehlých konců i přibližně $\varnothing 13\text{mm}$. Tento a další větší rozměry se zpravidla nachází pouze v podélném směru, kde je dostatek materiálu za vytvořenou dírou.



Obr. 35. Hliníková voština s vyřezanými otvory pro inserty

7.2 Příprava potahů

Prepreg vytažený z mrazicího boxu (-18°C) jsem dle předpřipravené šablony rozkreslil a nastříhal na potřebné rozměry, stejné jako voštiny, tedy rozměrů 200x45mm.



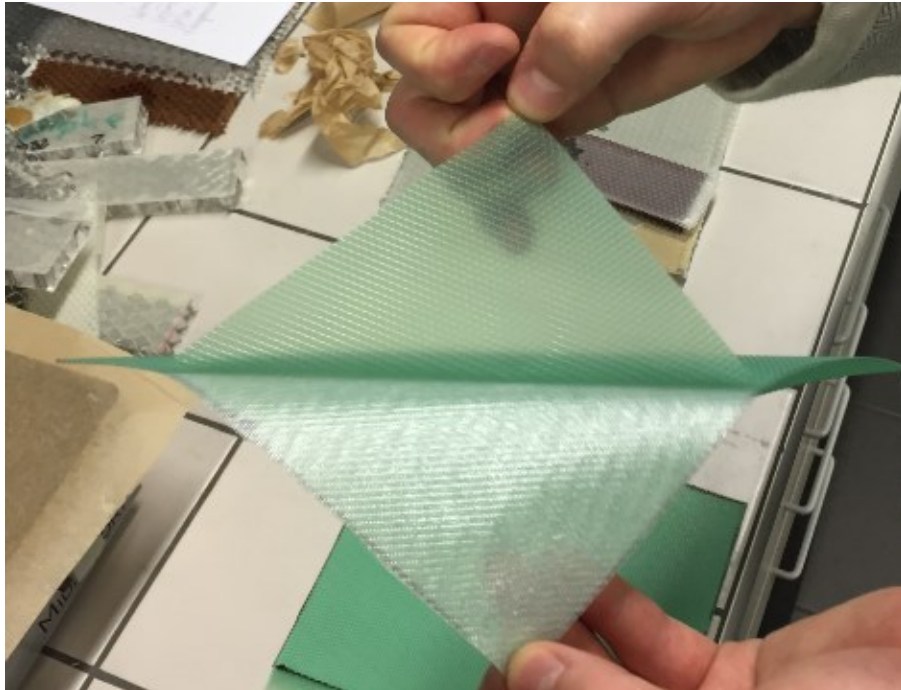
Obr. 36. Uhlíkový prepreg v návinu, po vytažení z mrazicího boxu

Základní informace o použitých prepregích:

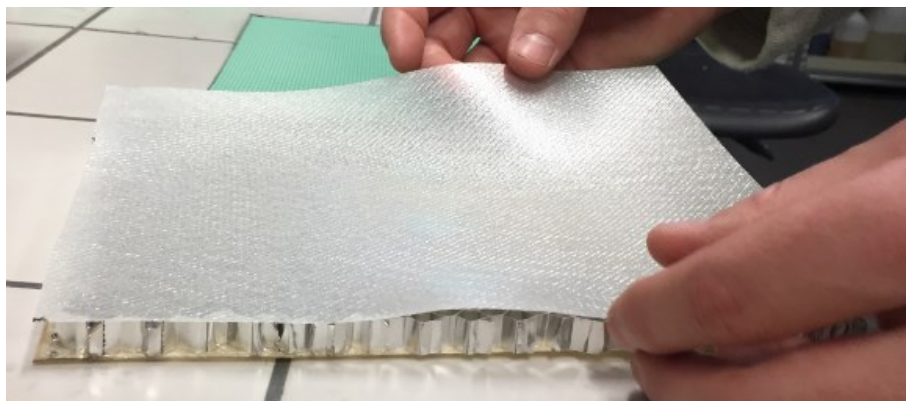
- **Uhlíkový prepreg**
 - Obchodní označení: IMP503Z/GG204 T
 - Výrobce: G. Angeloni s.r.l., Itálie
 - Dodavatel: grm systems s.r.o.
 - Vazba: keprová 2/2
 - Tkanina: uhlíková, 204 [g/m²]
 - Tloušťka: 0,20 [mm]
 - Podíl výztuže: 59%

- **Skelný prepreg**
 - Obchodní označení: IPM503Z/VV192T
 - Výrobce: G. Angeloni s.r.l., Itálie
 - Dodavatel: grm systems s.r.o.
 - Vazba: keprová 2/2
 - Tkanina: skelná, 202 [g/m²]
 - Vytvrzovací teplota: 65 – 140 [°C]
 - Podíl výztuže: 59%
 -

Vše proběhlo v co nejkratším čase, aby pokud možno nedošlo ke ztrátě lepivosti. Po celou dobu práce s potahem jsem pracoval s ošetřenou pokožkou, aby došlo, k minimálnímu kontaktu mastnoty a potu s prepregem. Z prvních třech potahů se sejmuly izolační plastové vrstvy a položily na voštinu.



Obr. 37. Odnímání ochranné vrstvy ze skelného prepregu



Obr. 38. Kladení vrstev skelného prepregu na hliníkovou voštinu

7.3 Výroba sendvičového panelu

Ke spojení prepregu a voštiny došlo ve vulkanizačním lisu. Aby nedošlo k přilepení prepregu ke kovové desce, použil jsem k separaci pečící papír.

- **Parametry vulkanizačního lisu:**

- Rozměry desek: 250x250 [mm]
- Příkon: 2400 [W]
- Maximální teplota lisu: 200 [°C]
- Uzavírací síla: 5 [t]



Obr. 39. Vulkanizační lis

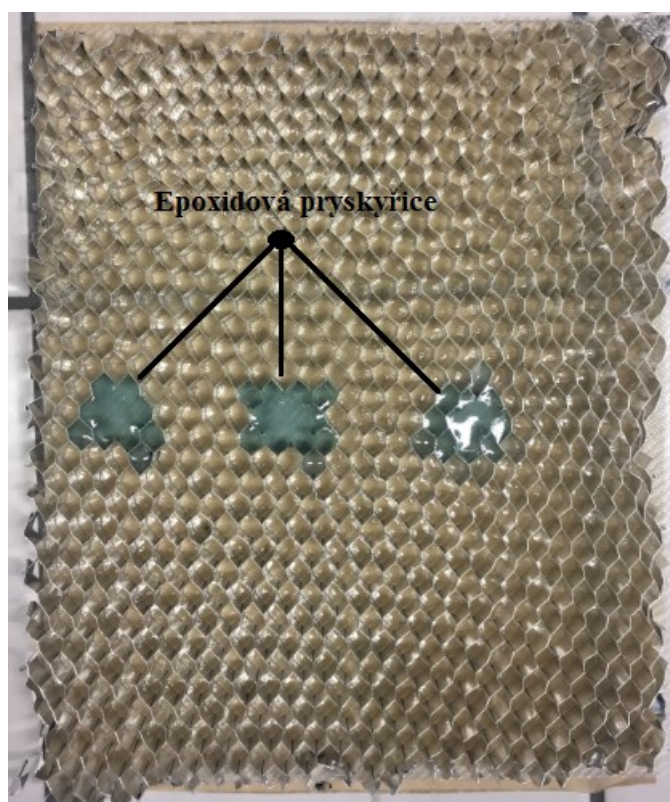
Před použitím se vulkanizační lis vytemperoval na danou teplotu a voština s potahy na jedné straně se vložila dovnitř v kovových deskách, kde došlo ke spojení. Vytvrzování probíhalo po dobu 20 minut při teplotě 135 ± 3 [°C].



Obr. 40. Voština ve formě, vložená do vulkanizačního lisu

Po vyjmutí formy se sendvičem ven z lisu a uplynutí 60 minut, se vyplnila voština epoxidovou pryskyřicí.

- **Epoxidová pryskyřice:**
 - Obchodní označení: Epoxidová pryskyřice L 285 (MGS)
 - Použité tužidlo: H 285
 - Poměr míchání: 100:40
 - Doba zpracovatelnosti: pro 100g, při 25°C je cca. 50 minut



Obr. 41. Epoxidová pryskyřice v hliníkové voštině

Po vytvrzení epoxidové pryskyřice se opět vyndaly potahy z mrazicího boxu, sejmuly ochranné fólie a položily na druhou stranu voštiny. Veliký důraz byl kladen na co nejrychlejší práci a nejmenší kontakt s potahy. Voština se vložila do formy a ve vytemperovaném lisu se opakoval proces při stejné teplotě a čase. Separace sendviče a formy se zajistila opět pečícím papírem.

7.4 Finální příprava sendvičových panelů

7.4.1 Řezání vzorků

Hotové sendviče o rozměrech 200x180 mm, jsem následně řezal na vzorky o rozměrech 200x45 mm pomocí formátovací pily v dílnách U5. Řez se vykonával ve směru L k vidění na obr. 18, tedy podélném směru vzhledem k voštinovému jádru.

7.4.2 Vrtání děr pro insertové vložky

K vrtání jsem využil sloupovou vrtačku Optimum B40 GSM. Před vrtáním jsem nastavil pracovní stůl do potřebné polohy a sendvičové vzorky jsem upnul do ručně ovládaného svěráku pro vrtání. Následně jsem zajistil doraz pro vyvrtání hloubky díry do 8mm v sendviči a posuv prováděl ručně, aby se zamezilo možnému porušení pryskyřice, sendviče. Pomocí vzduchu jsem odváděl třísky z místa řezu, čímž se částečně zajišťovalo taky chlazení. Žádné chladicí kapaliny jsem při vrtání nepoužíval.

- **Parametry sloupové vrtačky:**

- Sloupová vrtačka s převodovým soukolím, strojním posuvem a chlazením;
- Pracovní stůl: 560 x 560 [mm]
- Otáčky: 40 – 450 [ot. /min.]
- Počet rychlostních stupňů: 18

Jelikož jsem neměl podklady pro vrtání děr do vytvrzené pryskyřice, musel jsem mít vzorky navíc, ve kterých jsem otestoval optimální průměry vrtáků. Díru do vytvrzené pryskyřice jsem vrtal $\varnothing 6\text{mm}$ a $\varnothing 4,8\text{mm}$, ale v každém procesu došlo k prasknutí pryskyřice. Proto jsem pro tyto dvě díry zvolil předvrtání vrtákem $\varnothing 3\text{mm}$. Další zjištěné poznatky při vrtání děr pro insertové vložky:

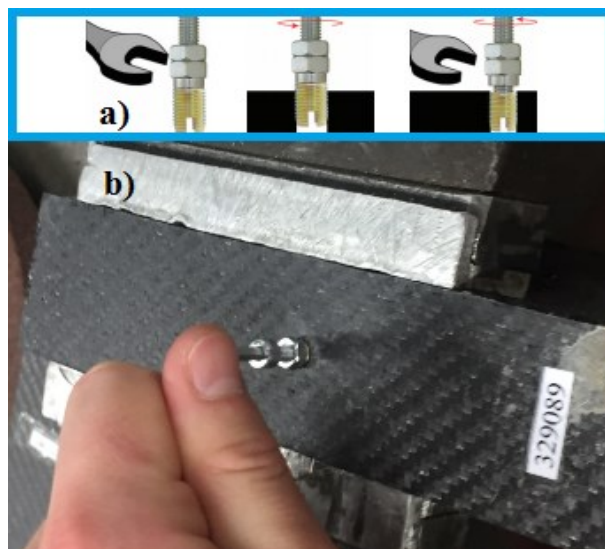
- Praskání vytvrzené pryskyřice při vrtání průměrem vrtáku $\varnothing 6\text{mm}$ a $\varnothing 4,8\text{mm}$, bez předvrtání malým průměrem ($\varnothing 3\text{mm}$).
- Při vyvrtání průměru $\varnothing 5,5\text{mm}$ se insertová vložka nezařezala do díry.
- Jestliže nebyla díra vyvrtána do hloubky 8mm, jak předepisuje technický list, insert vyčníval vně z díry závitovou částí.



Obr. 42. Vrtání díry pro insertovou vložku

7.4.3 Instalace insertových vložek

Samořezné insertové vložky jsem našrouboval na šroub a zajistil maticí a insertovou vložku nainstaloval pomocí imbusového klíče. Kontramatice se uvolnila a vyšrouboval se šroub. Při instalaci se velmi dbalo, aby insertová vložka nebyla mimo osu, což by zaviňovalo porušení závitu, nebo prasknutí vytvrzené pryskyřice.



Obr. 43. a) Vizualní návod montáže, b) Montáž insertové vložky

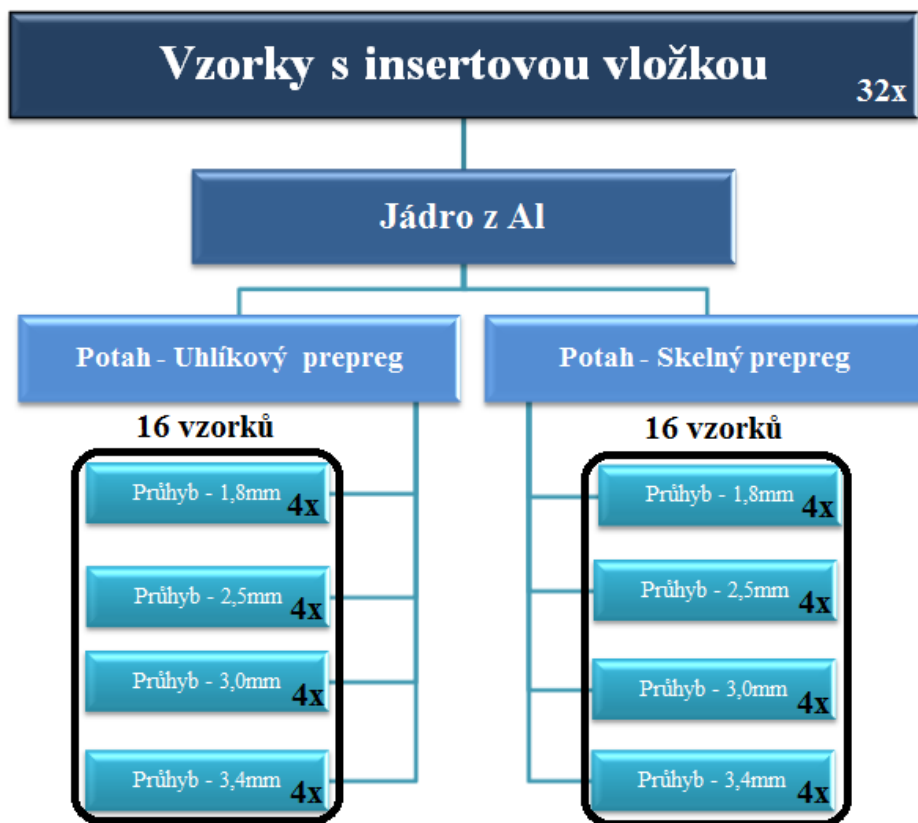
- **Insertová vložka**

Závitové vložky pro vysoce namáhané a vibračně odolné šroubové spojení v materiálech s nízkou pevností ve střihu (hliník, termoplast). Více v příloze IV.

- Dodavatel: HEINRICH KIPP WERK KG
- Materiál: Ocel – cementovaná, pozinkovaná
- Vnitřní závit M4, Vnější závit M6,5;
- Délka insertu L=8 [mm]
- Obchodní označení: K0978.04

7.5 Rozdělení vzorků

Pro praktickou část bylo potřeba celkem 32 vzorků kompozitních sendvičů plus dalších 8 vzorků pro nastavení optimálních podmínek při výrobě, zkoušení a testování vytržení insertu, nastavení cyklovacího stroje. Vytvořené vzorky dvou druhů s potahem uhlíkovým a skelným prepregem. V každé této skupině byly další čtyři podskupiny, které měly různé hladiny zatížení, jak je na obr. 44.



Obr. 44. Rozdělení vzorků pro praktickou část

8 TESTOVÁNÍ ZKUŠEBNÍCH TĚLES

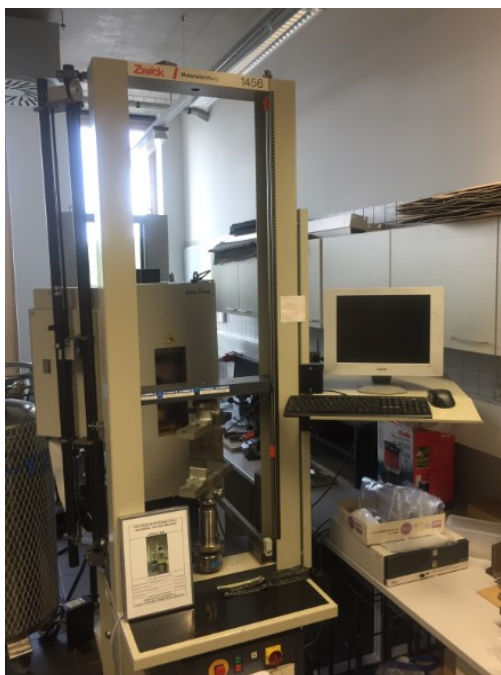
8.1 Statická zkouška ohybem

Tato zkouška se provedla pro získání zátěžových parametrů pro zkoušku únavovou, jako je maximální průhyb y_{max} , dále ohybové síly F_{max} , či zjištění nejvyšší přípustné síly pro vytržení insertu. Zkouška se prováděla dle normy ASTM C393. Z vyhodnocených dat a dalších souvisejících důvodů jsem sestavil hladiny zatěžování sendvičů s inserty k vidění v tab. 5.

Testování probíhalo v laboratoři mechanických zkoušek na fakultě technologické na přístroji ZWICK 1456 na obr. 45, který kromě ohybové zkoušky vykonává taky zkoušky tahové a tlakové.

Parametry stroje ZWICK 1456:

- Zkušební síla: 2,5 / 20 [kN]
- Maximální posuv příčnicku: 800 [mm/min]
- Teplotní komora: -80 / +250 [°C]
- Hmotnost stroje: 150 [kg]
- Rozměry stroje výška/šířka: 2012 / 630 [mm]



Obr. 45. Trhací stroj ZWICK 1456

Při testování byla vzdálenost podpěr nastavena na 180 mm, stejná jako u následující zkoušky při cyklickém zatížení. Rychlost posuvu příčnicku se stanovila na 5 mm/min. Zkouška proběhla při laboratorní teplotě 22°C a relativní vlhkosti 60%. Přístroj je propojený s vyhodnocovacím softwarem *TestXpert v2.1.*, který zaznamenal hodnoty a vykreslil graf při zkoušce vytržení insertu.

8.2 Únavová zkouška

Únavová zkouška se vykonala na cyklovacím stroji, který se nachází v laboratoři mechanických zkoušek. Vzorky rozměru 200x45 se umístily do podpěr, které byly ve vzdálenosti 180mm od sebe.

Parametry cyklovacího stroje:

Pohon:	Elektromotor s říditelnými otáčkami
Maximální otáčky:	2000 [ot/min]
Převodový poměr:	7,1
Maximální frekvence stroje:	4,7 [Hz]

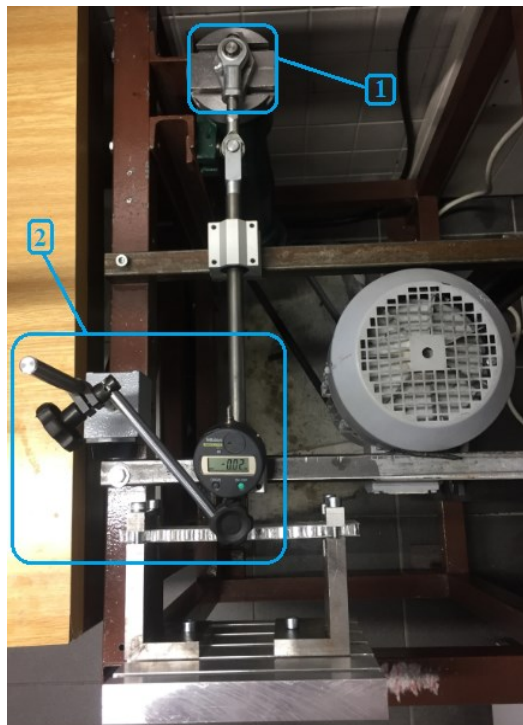


Obr. 46. Stroj na únavovou zkoušku cyklickým zatížením v ohybu

- Změnou polohy ojnice můžeme změnit nastavení amplitudy průhybu y_a [mm].
- Stroj není propojený s vyhodnocovacím programem, čili veškeré měření probíhalo pod neustálou kontrolou.
- Dle otáček, převodového poměru a času měření lze vypočíst počet cyklů.
- Hladiny průhybů y_a se určily procentuálně ze síly, která porušila sendviče při statické zkoušce třibodovým ohybem.

Tab. 5. Hladiny zatížení a rozřazení vzorků do hladin

Hladina zatížení	Průhyb y_a [mm]	Vzorky se skelným potahem	Vzorky s uhlíkovým potahem	Celkem vzorků v hladině
Hladina A	1,8	4	4	8
Hladina B	2,5	4	4	8
Hladina C	3,0	4	4	8
Hladina D	3,4	4	4	8

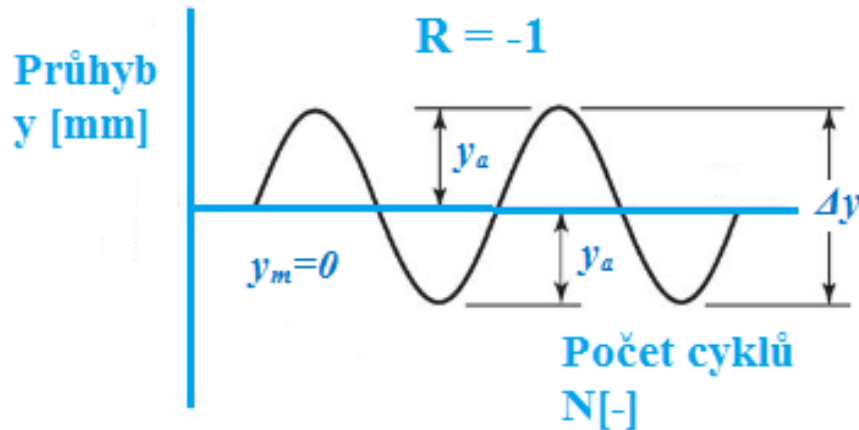


Obr. 47. Nastavování amplitudy průhybu na cyklovacím stroji

Vysvětlivky k obr. 47

Poloha 1 – V tomto místě povolením dvou šroubů imbusovým klíčem lze změnit amplitudu průhybu y_a [mm].

Poloha 2 – Pomocí elektronického úchylkoměru Mitutoyo, jsem seřizoval amplitudy průhybu y_a [mm] na potřebné hladiny, které jsou uvedeny v tab. 7. Úchylkoměr se upevnil na konstrukci stroje, pomocí magnetu.



Obr. 48. Souměrně střídavý cyklus - počet cyklů N na průhybu y

Δy – rozkmit průhybu

y_m – střední průhyb

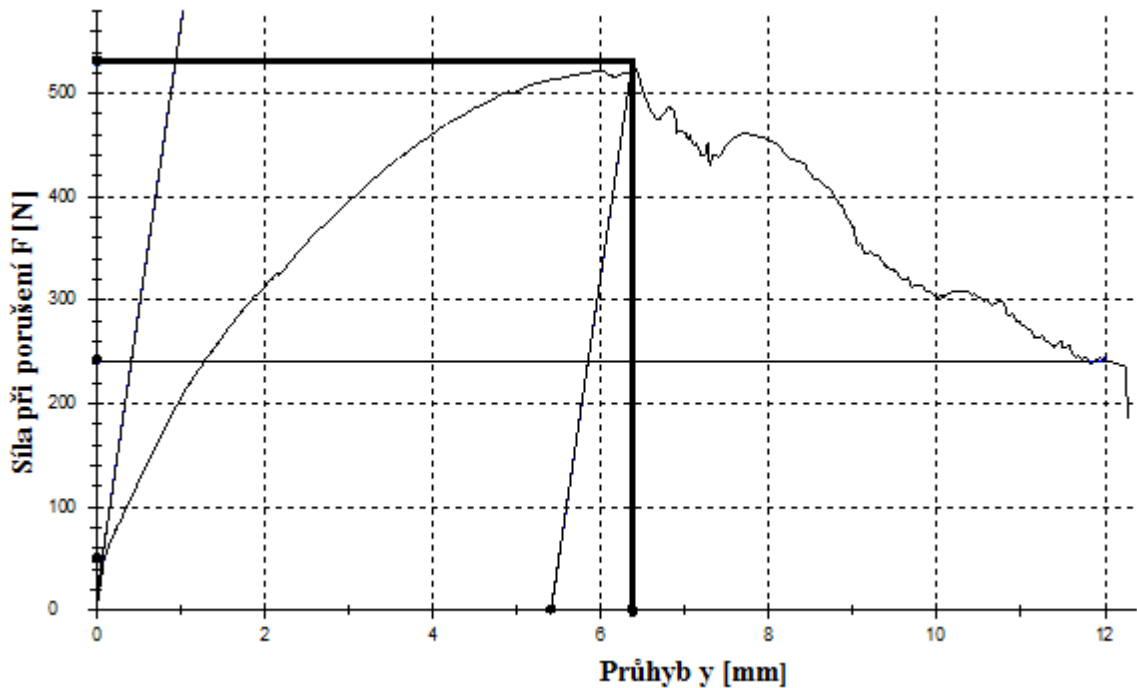
y_a – amplituda průhybu

Při únavové zkoušce kompozitních sendvičů s inserty jsem zatěžoval vzorky souměrně střídavým cyklem, který má závislost počtu cyklů N [-] na průhybu y [mm], s koeficientem nesouměrnosti $R=-1$ a středním průhybem $y_m=0$ jak je uvedeno na obr. 48.

9 VYHODNOCENÍ NAMĚŘENÝCH DAT

9.1 Výsledky zkoušky tříbodovým ohybem pro vytržení insertu

Při této zkoušce se použil jeden vzorek, kde nedošlo k vytržení insertu, ale k porušení sendviče v podobě zborcení jádra sendviče v krajní poloze.



Obr. 49. Graf statické zkoušky tříbodovým ohybem na vytržení insertu

Hodnoty z grafu jsou uvedeny v tab. 6, které jsou získány díky vyhodnocovacímu programu *TestXpert v2.1* na přístroji ZWICK 1456.

Tab. 6. Vyhodnocená data při zkoušce vytržení insertu

Síla při porušení F [N]	531,0
Průhyb y [mm]	6,4

Požadovaný cíl této zkoušky byl zjistit, zda insert vydrží vně sendviče a nedojde k jeho vytržení. Výsledek se naplnil a k porušení vzorku došlo v jiné části v podobě zborcení voštinového jádra a částečné delaminaci potahu.

V tomto případě byla jistota, že při měření únavové zkoušky nebude docházet k předčasným ukončováním měření z důvodu nevhodného finálního dokončování vzorků, myšleno operací při instalaci insertu. Tedy díra pro insert se vyvrtala ve vhodném průměru, množství pryskyřice v jádru je dostačující.

9.2 Zpracování únavových zkoušek pro sendviče s inserty

Dle výsledku v kapitole 8.1 a podle možností nastavení průhybu y [mm] na plně mechanickém cyklovacím stroji, byly stanoveny čtyři hladiny průhybu. Hodnoty hladin ovlivnilo obtížné nastavování amplitudy průhybu y_a [mm] a střední průhyb $y_m=0$, jelikož hřídel, která přenáší cyklovací pohyb se vysunula/zasunula po každém měření, na rozdíl od měření vzorků pro současně tvořenou práci, která ještě není publikována. Ve které se nachází vzorky bez insertů a problém se středním průhybem y_m [mm] se nemusel řešit z důvodu, že se jednalo o zatížení míjivé v tlaku.

9.2.1 Naměřené data

Naměřené hodnoty jsem si zaznamenával v časových údajích a následně přepočítal. Jelikož cyklovací stroj není propojený se žádným vyhodnocovacím programem, vyhodnocení počtu cyklů se muselo vypočítat ze známých charakteristik stroje a z celkové doby testování vzorku na stroji.

Maximální frekvence stroje: $f_{\max} = 4,7$ [Hz]

Počet cyklů za 1 hodinu:

$$4,7 \times 3600 = 16920 \text{ cyklů za hodinu} \quad (18)$$

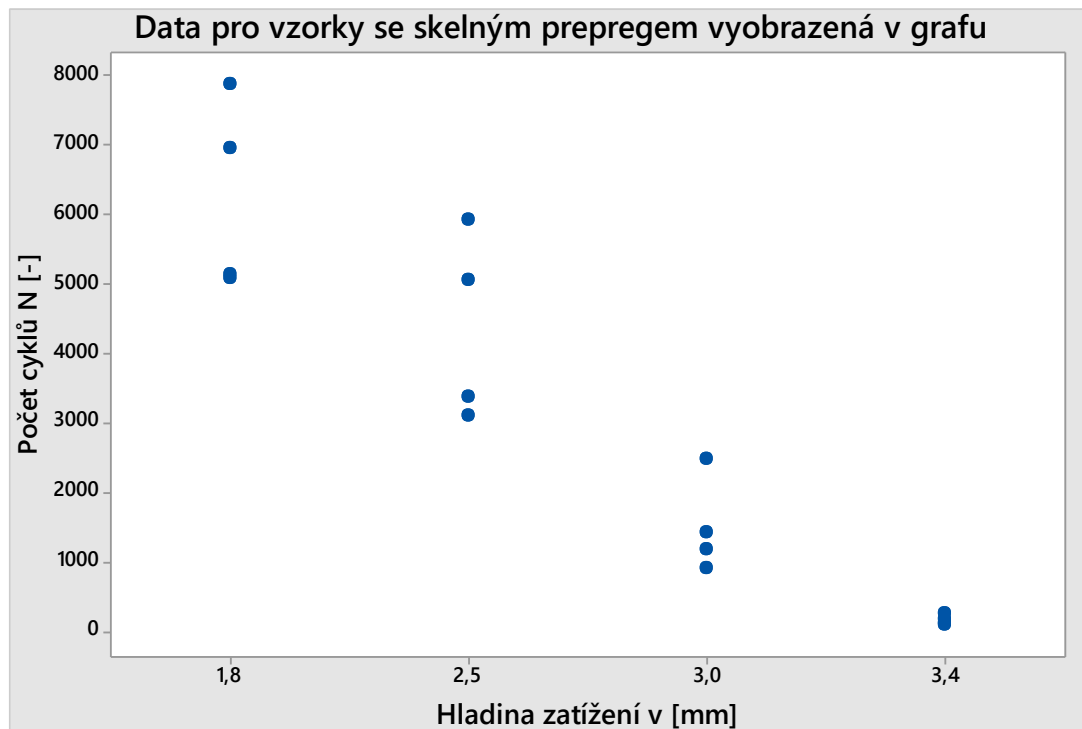
Jestli se vzorek cykloval po dobu 15 minut, pak se přepočet provedl přes počet cyklů za 1 minutu, což je 282 cyklů:

$$282 \times 15 = 4230 \text{ cyklů} \quad (19)$$

Takto se přepočítaly všechny hodnoty časových údajů. Výsledné počty cyklů jsou uvedeny v tabu. 7 a tab. 8, ze které je i vzorově vypočítaná hodnota 4230 cyklů z hladiny amplitudy průhybu $y_a=1,8$ mm.

Tab. 7. Naměřené data pro vzorky se skelným prepregem

Sendviče se skelným prepregem	
Jádro	AI
Hladiny amplitudy průhybu y_a [mm]	Počet naměřených cyklů N [-]
A: 1,8 [mm]	5076
	6946
	5123
	7859
B: 2,5 [mm]	3384
	4922
	3096
	5060
C: 3,0 [mm]	1181
	2470
	902
	1433
D: 3,4 [mm]	174
	253
	108
	130

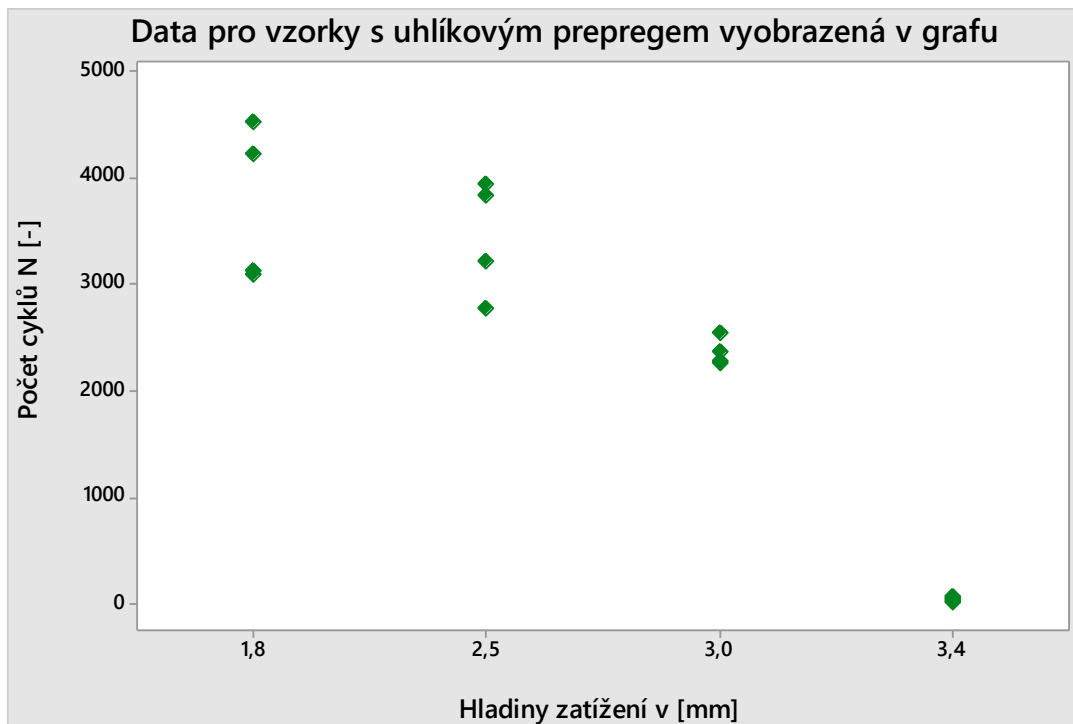


Obr. 50. Naměřené data u vzorků se skelným prepregem

Ve výše uvedené tab. 7; jsou naměřené data pro vzorky s potahem ze skelných vláken ve čtyřech různých hladinách zatížení. Pro lepší orientaci jsem zaznamenal data také do grafu individuálních hodnot v programu Minitab17.

Tab. 8. Naměřené data pro vzorky s uhlíkovým prepregem

Sendviče s uhlíkovým prepregem	
Jádro	AI
Hladiny amplitudy průhybu y_a [mm]	Počet naměřených cyklů N [-]
A: 1,8 [mm]	4230
	4517
	3096
	3133
B: 2,5 [mm]	3942
	3218
	3838
	2774
C: 3,0 [mm]	2377
	2279
	2542
	2261
D: 3,4 [mm]	74
	28
	43
	57



Obr. 51. Naměřené data u vzorků s uhlíkovým prepregem

Stejně jako u vzorků, které mají potah ze skelného prepregu, tak i pro vzorky s uhlíkovým prepregem jsou naměřené data v tab. 8 a k lepší přehlednosti taky v grafu individuálních hodnot obr. 51. Osa x nám rozděluje hodnoty do hladin zatížení amplitudy průhybu y_a [mm] a osa y vyobrazuje počty cyklů, které vzorky vydržely.

9.2.2 Zpracování dat

Naměřené data se zpracovaly pomocí počítačového programu ve studentské verzi Minitab17 a QC.Expert. Po přepsání dat do Minitab17 se hodnoty převedly do software QC.Expert, kde se pomocí funkce základní analýza dat, provedla celková statistická analýza. Ve vyhodnoceném data sheet využijeme pouze potřebná data – analýzy malých výběrů pro Hornovu metodu zpracování malých souborů pro $n \Rightarrow 4 \leq n \leq 20$.

Tyto vyhodnocené data se přenesly zpět do statistického software Minitab17 a vytvořily se grafy, jako Wöhlerovy křivky. V příložené tabulce jsou vyhodnocené hodnoty, ze kterých se vytvořily Wöhlerovy křivky závislosti amplitudy průhybu y_a [mm] na počtu cyklů N [-].

Tab. 9. Analýza malého výběru pro sendviče s potahem ze skelného prepregu

Amplituda průhybu y_a [mm]	3,4	3,0	2,5	1,8
Střední hodnota:	6467,5	4078,0	1686,0	180,5
Spodní mez (5%) :	4922,9	2988,0	815,8	100,0
Horní mez (95%) :	8012,1	5168,0	2556,2	261,0
Spodní mez (2.5%) :	4413,6	2628,6	528,8	73,5
Horní mez (97.5%) :	8521,4	5527,4	2843,2	287,5
Pivotové rozpětí :	2783,0	1964,0	1568,0	145,0

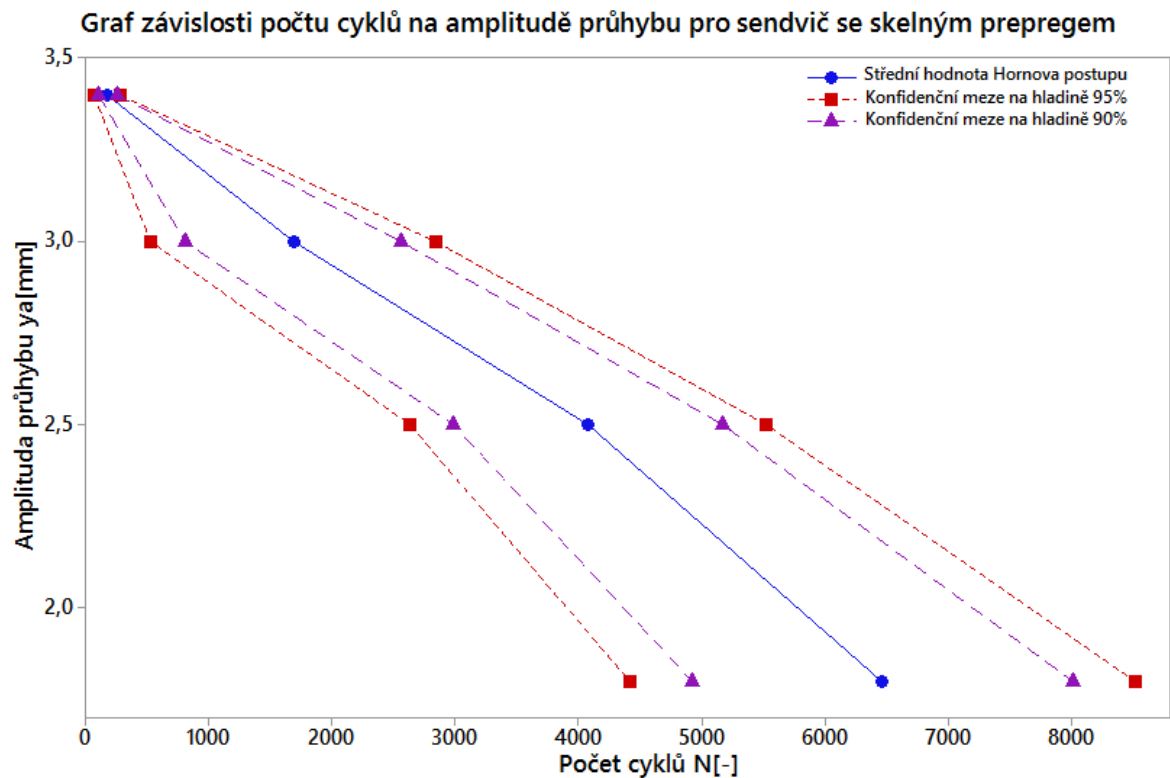
Tab. 10. Analýza malého výběru pro sendviče s potahem z uhlíkového prepregu

Amplituda průhybu y_a [mm]	3,4	3,0	2,5	1,8
Střední hodnota:	3806,5	3358,0	2401,5	51,0
Spodní mez (5%) :	3017,8	2709,8	2245,5	25,5
Horní mez (95%) :	4595,2	4006,2	2557,5	76,5
Spodní mez (2.5%) :	2757,8	2496,0	2194,1	17,1
Horní mez (97.5%) :	4855,2	4220,0	2608,9	84,9
Pivotové rozpětí :	1421,0	1168,0	281,0	46,0

V uvedených tabulkách 9 a 10 jsou vyhodnocené analýzy výběrů pomocí software QC.Expert, které jsem si ještě roztřídil pro lepší práci při zpracování v software Minitab17. Střední hodnoty jsou hlavní body na výsledné Wöhlerově křivce. Dále spodní a horní meze (2,5; 5; 95; 97,5) tvoří pivotové rozpětí k těmto křivkám. Vše je vyobrazeno v obr. 52 a obr. 53.

9.2.3 Vyhodnocení výsledků únavové zkoušky

Výsledné Wöhlerovy křivky jsou v této práci závislostí počtů cyklů na amplitudě průhybu. Amplituda se měnila ve čtyřech různých hladinách. Zjišťovala se životnost kompozitního sendviče, jinými slovy kolik vydrží vzorek cyklů do porušení. To je shrnuto v následující kapitole, kde na konci je porovnání s daty vzorků bez insertů.

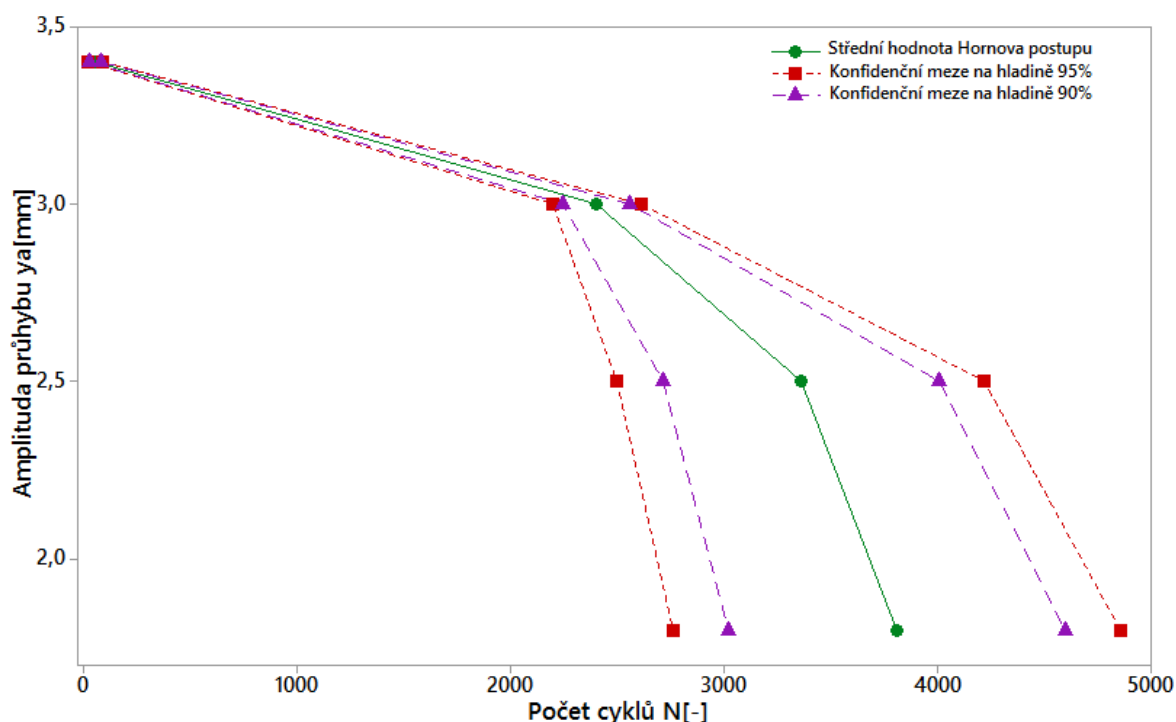


Obr. 52. Wöhlerova křivka pro vzorky se skelným prepregem

Na základě čtyřech hodnot je dle Hornova postupu zjištěno, že neznámá střední hodnota μ , jejíž odhad byl určen na 6467,5 s pravděpodobností; $(1 - \alpha = 0,9)$, leží v intervalu 4922,9 a 8012,1 nebo $(1 - \alpha = 0,95)$ leží v intervalu 4413,6 a 8521,4. Dále bylo určeno pivotové rozpětí (obdoba interkvartilového rozpětí), dle Horna na hodnotu 2783,0. U dalších čtyř hodnot z hladiny druhé je dle Hornova postupu zjištěno, že neznámá střední hodnota μ , jejíž odhad byl určen na 4078,0 s pravděpodobností; $(1 - \alpha = 0,9)$, leží v intervalu 2988,0 a 5168,0 nebo $(1 - \alpha = 0,95)$ leží v intervalu 2628,6 a 5527,4. Pivotové rozpětí (obdoba interkvartilového rozpětí), dle Horna na hodnotu 1964,0.

Na předposlední hladině bylo opět dle čtyř hodnot dle Hornova postupu zjištěno, že neznámá střední hodnota μ , jejíž odhad byl určen na 1686,0 s pravděpodobností; $(1 - \alpha = 0,9)$, leží v intervalu 815,8 a 2556,2 nebo $(1 - \alpha = 0,95)$ leží v intervalu 528,8 a 2843,2 a pivotové rozpětí, dle Horna je 1568,0. Také na poslední hladině na základě čtyř hodnot se dle Hornova postupu zjistilo, že neznámá střední hodnota μ , jejíž odhad byl určen na 180,5 s pravděpodobností; $(1 - \alpha = 0,9)$, leží v intervalu 100,0 a 261,0 nebo $(1 - \alpha = 0,95)$ leží v intervalu 73,5 a 287,5. A poslední pivotové rozpětí pro tuto hladinu dle Horna je 145,0.

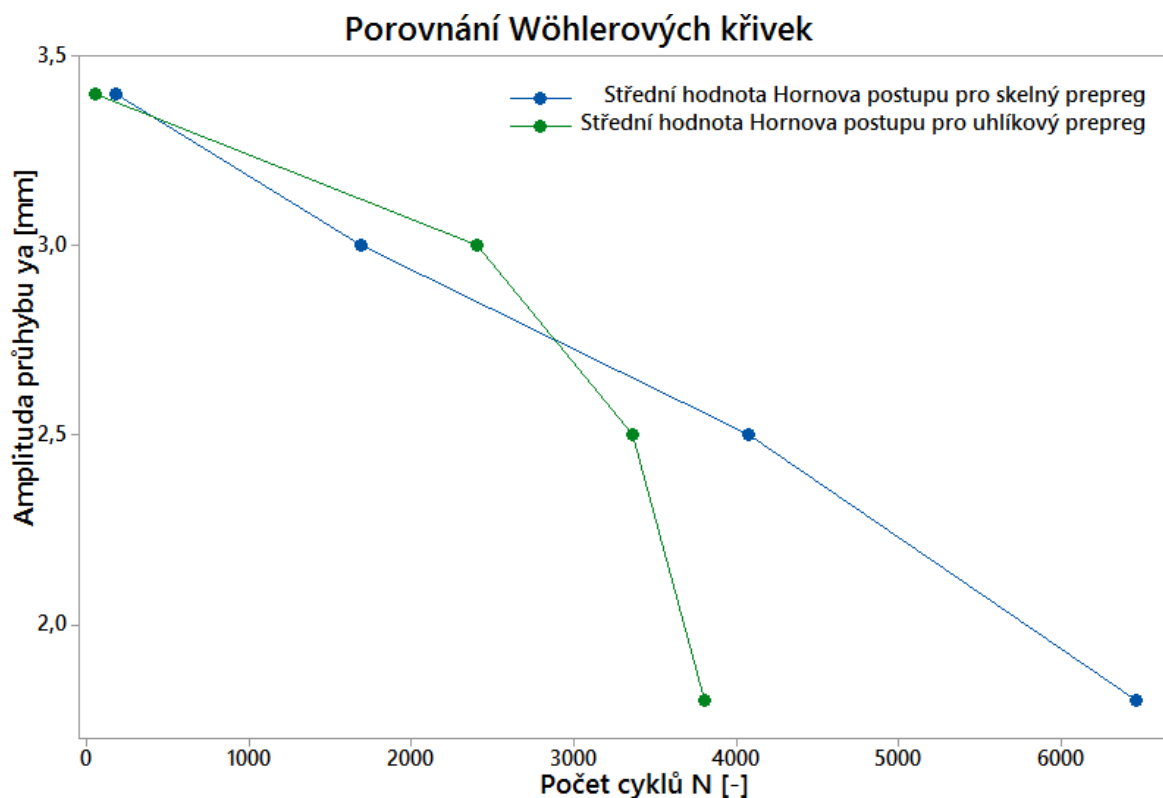
Graf závislosti počtu cyklů na průhybu pro sendviče s uhlíkovým prepregem



Obr. 53. Wöhlerova křivka pro vzorky s uhlíkovým prepregem

Podle naměřených čtyř hodnot v hladině zatížení je dle Hornova postupu zjištěno, že neznámá střední hodnota μ , jejíž odhad byl určen na 3806,5 s pravděpodobností; $(1 - \alpha = 0,9)$, leží v intervalu 3017,8 a 4595,2 nebo $(1 - \alpha = 0,95)$ leží v intervalu 2757,8 a 4855,2. Dále bylo určeno pivotové rozpětí (obdoba interkvartilového rozpětí), dle Horna na hodnotu 1421,0. V případě dalších čtyř hodnot je dle Hornova postupu zjištěno, že neznámá střední hodnota μ , jejíž odhad byl určen na 3358,0 s pravděpodobností; $(1 - \alpha = 0,9)$, leží v intervalu 2709,8 a 4006,2 nebo $(1 - \alpha = 0,95)$ leží v intervalu 2496,0 a 4220,0.

Pivotové rozpětí vychází, dle Horna 1168,0. Na předposlední hladině bylo ze stejného počtu hodnot dle Hornova postupu zjištěno, že neznámá střední hodnota μ , jejíž odhad byl určen na 2401,5 s pravděpodobností; $(1 - \alpha = 0,9)$, leží v intervalu 2245,5 a 2557,5 nebo $(1 - \alpha = 0,95)$ leží v intervalu 2194,1 a 2608,9 a pivotové rozpětí, dle Horna na hodnotu 281,0. V poslední hladině se díky Hornovu postupu zjistilo, že neznámá střední hodnota μ , jejíž odhad byl určen na 51,0 s pravděpodobností; $(1 - \alpha = 0,9)$, leží v intervalu 25,5 a 76,5 nebo $(1 - \alpha = 0,95)$ leží v intervalu 17,1 a 84,9. A poslední pivotové rozpětí dle Horna je 46,0.



Obr. 54. Porovnání Wöhlerových křivek

Při porovnání výsledných Wöhlerových křivek na obr. 54, je vidět, že při výzkumu v této práci vydrží oba druhy sendvičů v nejvíce zatěžující hladině velmi malý počet cyklů. Tyto hodnoty se však očekávaly, neboť tato oblast je blízká maximálnímu statickému zatížení a tento stav se v praxi (např. závodní automobil) vyskytuje velmi výjimečně po velmi krátkou dobu a v této práci se cykluje dlouhodobě. Čili zde je směřovatná oblast druhé, třetí a nejvíce čtvrté hladiny.

U hladiny s průhybem $y_a = 3,0$ [mm], dosahovaly lepších výsledků vzorky s potahem z uhlíkového prepregu a hladiny třetí tomu bylo naopak ve prospěch vzorků s potahem ze skelných prepregů. V nejvíce sledované hladině byl předpoklad, že vzorky vydrží více jak 10^4 cyklů, jak je vidět v obr. 54, bohužel to tak není a výdrž byla nižší jak předpokládaná hranice, která se také u obou typů sendvičů značně odlišuje.

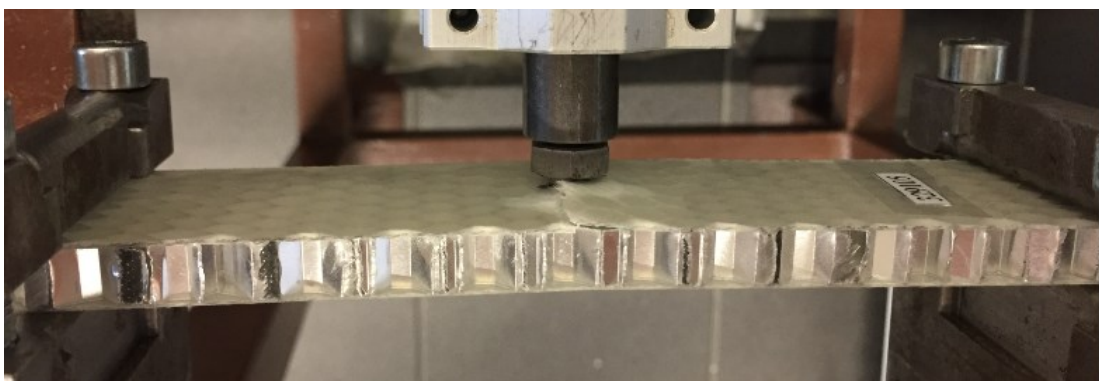
9.2.4 Porovnání naměřených hodnot se vzorky bez insertů

Souběžně s touto DP se zpracovává práce, která ještě není publikována. Zde se měří kompozitní sendviče bez insertů a k porovnání můžeme nahlédnout do přílohy I lze vidět, že vzorky kompozitních sendvičů bez insertů vydržely v nejvíce sledované oblasti nejnižšího zatížení o dva řády více cyklů než vzorky, které jsou náplní mojí práce. Proč tomu nastalo je vysvětlitelné několikrát. U vzorků bez insertů je zatížení míjivé v tlaku, takže zvolená hladina průhybu je konečná, na rozdíl od souměrného střídavého zatížení u vzorků s inserty, kde se střídá tlakové a tahové zatížení. Amplituda průhybu je tedy jak v tlaku i tahu, čili vzorek je v každé hladině téměř dvakrát více zatížený na celkovém průhybu. Další možný faktor je vyplnění jádra pryskyřicí pro umístění insertu. Díry v jádru mají být pravidelného kruhovitěho tvaru jak je na obr. 26. U vzorků v této práci je díra nepravidelná a přes ostré konce vytvrzené hmoty byl potah více namáhaný při ohýbání a docházelo zde často k odlepování potahu.

9.2.4.1 Vady u vzorků při únavových zkouškách

Druhy porušení kompozitních sendvičových konstrukcí se často opakovaly. Níže jsou uvedené vybrané vzorky s fotodokumentací vad, které vznikly při únavové zkoušce.

- **Poruchy sendvičů u amplitudy průhybu $y_a = 1,8$ mm**



Obr. 55. Porucha sendviče s potahem ze skelného prepregu na 1. hladině zatížení

Jak je vidět na obr. 55. vada u tohoto sendviče je na straně insertové vložky a to jako delaminace všech tří vrstev a trhlina potahu od insertu ke kraji. Dále je zde ve střední části částečná delaminace potahu od jádra.



Obr. 56. Porucha sendviče s potahem z uhlíkového prepregu na 1. hladině zatížení

Na obr. 56. Je sendvič s potahem z uhlíkového prepregu, kde došlo k částečné delaminaci a odlepení potahu pouze na straně insertové vložky, ale po celé šířce sendviče. Na rozdíl od předešlého vzorku, zde není potah prasknutý.

- **Poruchy u amplitudy průhybu $y_a = 2,5$ mm**



Obr. 57. Porucha sendviče s potahem ze skelného prepregu na 2. hladině zatížení

Vzorek na obr. 57. je poškozený odlepením, avšak na straně, kde není insertová vložka. Poruchu sendviče lze odůvodnit možnou nedokonalostí výroby, jelikož nejčastěji vznikají vady okolo insertové vložky.



Obr. 58. Porucha sendviče s potahem z uhlíkového prepregu na 2. hladině zatížení

Uhlíkový prepreg je na tomto vzorku z obr. 58. Odlepen a částečně delaminovaný na straně, kde se tyto vady objevovaly u 80% testovaných vzorků. Po uvolnění vzorku z čelistí se naměřilo odlepení od insertu do vzdálenosti téměř 50mm.

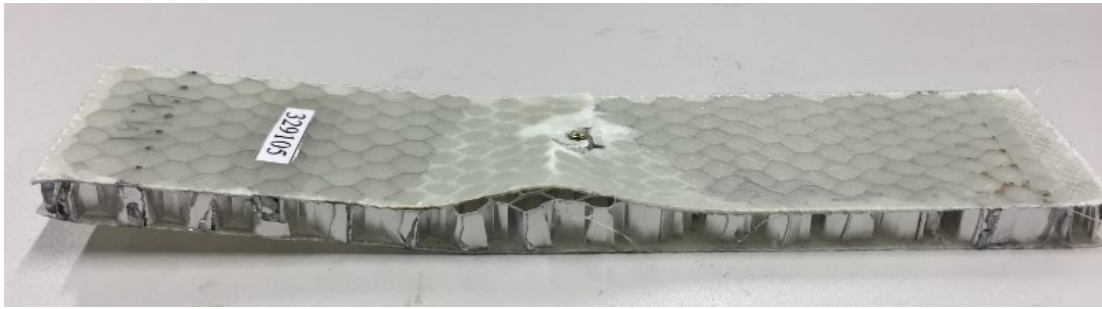
- **Poruchy u amplitudy průhybu $y_a = 3,0$ mm**



Obr. 59. Porucha sendviče s potahem ze skelného prepregu na 3. hladině zatížení

U tohoto sendviče došlo k lokálnímu zborcení voštinového jádra sendviče na pravé straně, hned za insertovou vložkou. Tato vada nebyla jediná, v místě zborcení sendviče se potah odlepil od jádra na obou stranách. Delaminace nebyla tak značná jako u vzorku na obr. 60

- Poruchy u amplitudy průhybu $y_a = 3,4$ mm



Obr. 60. Porucha sendviče s potahem ze skelného prepregu na 4. hladině zatížení

V případě tohoto vzorku došlo k delaminaci potahové vrstvy v okolí insertové vložky a k uvolnění insertové vložky. Po vyjmutí sendviče z cyklovacího stroje, vypadla z vytvrzené hmoty, která má tuto vložku držet uvnitř jádra.



Obr. 61. Porucha sendviče s potahem z uhlíkového prepregu na 4. hladině zatížení

ZÁVĚR

Pro prozkoumání životnosti kompozitních sendvičových konstrukcí s insertovou vložkou umístěnou v jádru bylo nutné vyrobit dva druhy kompozitních sendvičových konstrukcí. K výrobě zkušebních těles jsem využil prostory laboratoře mechanických zkoušek v budově U15 a dílen na U5.

Obě skupiny zkušebních vzorků měly voštinové jádro z hliníkové slitiny Alu-Alloy 3003 o velikosti buňky 6,4 mm a tloušťce voštiny 8 mm. Rozdílnost mezi vzorky byla v potahu, který byl u první skupiny sendvičů z uhlíkového prepregu typu IMP503Z/GG 204 T a druhá skupina má potah ze skelných vláken typu IMP503/VV 192 T. Potah se na voštinovém jádru skládá ze třech vrstev prepregu, který se na jádro kladl v krátkém časovém horizontu po vyjmutí z chladicího boxu. Spojení prepregových vrstev s voštinou probíhalo ve vytemperovaném vulkanizačním lisu. Vylisované desky rozměrů 200 x 180 x 9 se následně rozřezaly na formátovací pile na konečné rozměry testovacích vzorků 200 x 45 x 9. Posledním krokem bylo vyvrtání děr pro insertové vložky a jejich nainstalování do kompozitních sendvičů.

Zkoušení probíhalo obdobně jako výroba na ÚVI Fakulty technologické UTB ve Zlíně v laboratoři mechanických zkoušek na U5. Nejprve se provedla statická zkouška ohybem na přístroji ZWICK1456 pro test vytržení insertu z jádra. Výsledek zkoušky dopadnul dobře, jelikož insertová vložka nebyla vytržena, vada u vzorku nastala ve zborcení jádra. Poté následovala únavová zkouška cyklickým zatížením na stroji speciální konstrukce pro toto testování na čtyřech hladinách amplitudy průhybu y_a [mm]. Po každé únavové cyklické zkoušce se analyzovaly poruchy u kompozitních sendvičů. Ve většině případu se poruchy opakovaly, kdy se zejména jednalo o odlepení potahu od jádra u 80 % testovaných zkušebních vzorků, delaminaci potah a zborcení jádra.

Ke zpracování naměřených hodnot bylo použito Hornova postupu k vyhodnocení malých souborů $4 \leq n \leq 20$ ve statistickém softwaru QC.Expert. Následně se data převedly do software Minitab17, kde se dále zpracovaly a vytvořily se Wöhlerovy křivky závislosti počtu cyklů N [-] na amplitudě průhybu y_a [mm] pro skupinu sendvičů s uhlíkovým i skelným prepregem.

Nakonec se tyto dva druhy testovaných vzorků vzájemně porovnaly, které nám ukázaly, že hladina o největším zatížení je pro vzorky v této práci nesměrodatná, jelikož se zatížení blížilo maximálnímu statickému zatížení v ohybu, což se v praxi vyskytuje výjimečně a zde se požadují výsledky dlouhodobého cyklického zatížení od 10^4 cyklů. Pro zhodnocení je více specifická druhá, třetí a čtvrtá hladina, avšak ani zde se nedosáhlo očekávaného výsledku. Což můžeme přisoudit nepravidelnému tvaru vytvrzené pryskyřice v jádru, kdy ostré rohy iniciovaly dřívější odlepení potahu.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] REINHART, Theodore J. *Composites: Engineered materials handbook*. Metals Park, OHIO 44073: ASM International, 1987. ISBN 0-87170-279-7.
- [2] EHRENSTEIN, Gottfried W. Polymerní kompozitní materiály. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009, 351 s. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [3] JANČÁŘ, CSC., Prof. RNDr. Josef. *Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitů*. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická: Vysoké učení technické v Brně, 2003. ISBN 80-214-2443-5.
- [4] Doc. Ing. Karel Daďourek. *Kompozitní materiály definice a rozdělení: Rozdělení materiálů* [online]. 2008 [cit. 2018-03-13]. Dostupné z: http://www.kmt.tul.cz/edu/podklady_kmt_magistri/KM/Kompozity%20Dad/02defrozdz.pdf
- [5] Military handbook - MIL-HDBK-17-1F: Composite materials handbook, Volume 1 - Polymer matrix composites guidelines for characterization of structural materials, U.S. Department of defense, 2002. 586 s. electronic ISBN 978-1-59124-509-4
- [6] T.J. PINNAVAIA, G.W. BEALL. Polymer-clay nanocomposites, John Wiley & Sons Ltd, 2000, p.349. ISBN 0-471-63700-9.
- [7] Bareš, R. A.: Kompozitní materiály, Praha, SNTL, 1988
- [8] Bianchi, G.; Aglietti, G.S.; Richardson, G.: "Static and Fatigue Behaviour of Hexagonal Honeycomb Cores under In-plane Shear Loads", Applied Composite Materials, Springer, 2011
- [9] SAVAGE, G. Formula 1 composites engineering. *Engineering Failure Analysis*, 2010, 17.1: 92-115.
- [10] *TRANSFER: Nové poznatky a výsledky v oblasti materiálů, technologií, zkoušek a aplikací kompozitů v leteckém průmyslu ČR* [online]. Praha 9, Letňany: Výzkumný a zkušební letecký ústav, a.s.© 2010 VZLÚ, 2012, 8(17) [cit. 2018-03-19]. ISSN 1801 - 9315. Dostupné z: <http://docplayer.cz/4111863-Transfer-vyzkum-a-vyvoj-pro-letecky-prumysl-c-17-2012.html>
- [11] PTÁČEK L. a kol. *Nauka o materiálu II*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s r.o. 1999. 350 s. ISBN 80-7204-130-4

- [12] SAVAGE, Gary. Sub-critical crack growth in highly stressed Formula 1 race car composite suspension components. *Engineering Failure Analysis*, 2009, 16.2: 608-617.
- [13] Gibson, L.J.; Ashby, M.F.: "Cellular solids, Structure and properties", Second edition, Cambridge University Press, 1997
- [14] Janovec J., Cejp J., Steidl J.: Perspektivní materiály. ČVUT Praha, 2008. 1. vyd. 143 s. ISBN 978-80-01-04167-3.
- [15] *Aviation Maintenance Technician Handbook—Airframe Volume 1 U.S. Department of Transportation FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION Flight Standards: Aircraft Structures* [online]. P.O. Box 25082, Oklahoma City, 2012 [cit. 2018-03-19].
- [16] ASM International. (2001). *ASM handbook: Volume 21*. Materials Park, OH: ASM International.
- [17] *Mmspektrum: Sendvičové konstrukce* [online]. 1/2001 [cit. 2018-03-29]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/sendvicove-konstrukce.html>
- [18] *HexWeb™ HONEYCOMB SANDWICH DESIGN TECHNOLOGY: Failure modes* [online]. December 2000, , str. 5-9. [cit. 2018-03-13]. Dostupné z: http://www.hexcel.com/user_area/content_media/raw/Honeycomb_Sandwich_Design_Technology.pdf
- [19] 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.
- [20] *Formula1-Dictionary: Racing car Suspension* [online]. 2013 [cit. 2018-03-18]. Dostupné z: <http://www.formula1-dictionary.net/suspension.html>
- [21] *HexPly® Prepreg Technology: PREPREG TECHNOLOGY* [online]. Leden 2013 [cit. 2018-03-07]. Dostupné z: http://www.hexcel.com/user_area/content_media/raw/Prepreg_Technology.pdf
- [22] XU, Zhiwei, et al. Nano-structure and property transformations of carbon systems under γ -ray irradiation: a review. *Rsc Advances*, 2013, 3.27: 10579-10597.
- [23] *Plascore: HoneyComb Cores* [online]. [cit. 2018-03-08]. Dostupné z: <https://www.plascore.com/honeycomb/honeycomb-cores/thermoplastic/>

- [24] *GLASSCON: Titanium Honeycomb Panels "GLASSCON GHP ALU-TITANIUM"* [online]. [cit. 2018-03-08]. Dostupné z: <https://www.glasscon.com/products/honeycomb-panels-for-cladding-solar-shading/titanium-honeycomb-panels-%E2%80%9Cglasscon-ghp-alu-titanium>
- [25] *Teijin: Carbon Fibers & Composites* [online]. [cit. 2018-03-13]. Dostupné z: <https://www.teijin.com/products/composites/>
- [26] YUAN, Ying, et al. Effects of Content of Chopped Glass Fibers on the Properties of Silica Filled PTFE Composites. *Journal of Materials Science and Chemical Engineering*, 2017, 5.07: 36.
- [27] *Honeycomb Attributes and Properties: A comprehensive guide to standard Hexcel honeycomb materials, configurations, and mechanical properties*. HexWeb®. United States of America, 2016. Dostupné také z: <http://www.hexcel.com>
- [28] *Technology: Spread Tow Technology* [online]. [cit. 2018-03-14]. Dostupné z: <https://www.thinplytechnology.com/technology/spread-tow-technology>
- [30] OU, Yunfu, et al. Mechanical characterization of the tensile properties of glass fiber and its reinforced polymer (GFRP) composite under varying strain rates and temperatures. *Polymers*, 2016, 8.5: 196.
- [31] Aluminium Honeycomb. In: *Corex-honeycomb.co.uk* [online]. United Kingdom [cit. 2018-03-05]. Dostupné z: <https://corex-honeycomb.co.uk/product/hc-3-7-38-3003pc/>
- [32] ZHOU, Zhiwei, et al. Experimental investigation on the yield behavior of Nomex honeycombs under combined shear-compression. *Latin American Journal of Solids and Structures*, 2012, 9.4: 515-530.
- [33] ING. BOHUSLAV CABRNOCH, PH.D. *Kompozitní materiály a jejich vlastnosti* [online]. Výzkumný a zkušební letecký ústav, a. s. Praha, 2011 [cit. 2018-03-05].
- [34] SCHWINGEL, Dirk, et al. Aluminium foam sandwich structures for space applications. *Acta Astronautica*, 2007, 61.1-6: 326-330.
- [35] *Space engineering: Insert design handbook*. ESA Requirements and Standards Division. 2200 AG Noordwijk: ESTEC, 2011. ISBN ECSS-E-HB-32-22A

- [36] BRAMESHUBER, Wolfgang (ed.). *Report 36: textile reinforced concrete-state-of-the-art report of RILEM TC 201-TRC*. RILEM publications, 2006.
- [37] Crupi, Vincenzo; Epasto, Gabriella; Guglielmino, Eugenio. 2011. "Impact Response of Aluminum Foam Sandwiches for Light-Weight Ship Structures." *Metals* 1, no. 1: 98-112.
- [38] SEEMANN, Ralf; KRAUSE, Dieter. Virtual testing of Nomex honeycomb sandwich panel inserts. In: *Proceedings of the 20th international conference on composite materials ICCM-20. Copenhagen, Denmark*. 2015.
- [39] *Fibre Glast: Prepreg Fabrics* [online]. [cit. 2018-03-15]. Dostupné z: https://www.fibreglast.com/category/PrePreg_Fabrics.
- [40] KIM, Byoung Jung, et al. Characteristics of joining inserts for composite sandwich panels. *Composite Structures*, 2008, 86.1-3: 55-60.
- [41] Růžička, Milan, Miroslav Hanke a Milan Rost.: "Dynamická pevnost a životnost. Praha: Nakladatelství ČVUT, 1987, 212 s.
- [42] Černošek, J.: Úvod do problematiky kompozitních materiálů, VUT v Brně, Fakulta technologická, Zlín, 1992
- [43] Stinchcomb, W. W. and Bakis, C. E.: *Fatigue Behaviour of Composite Laminates, Composite Materials Series: Fatigue of Composites*, Vol 4, 1991, p 105–178.
- [44] GEUBELLE, Philippe H.; BAYLOR, Jeffrey S. Impact-induced delamination of composites: a 2D simulation. *Composites Part B: Engineering*, 1998, 29.5: 589-602.
- [45] REIFSNIDER, R. L.: *Composite Materials Series: Fatigue of Composite Materials*, Vol 4, Elsevier Science Publishing Company, New York, 1991.
- [46] LAŠ, Vladislav. *Mechanika kompozitních materiálů*. Plzeň: Západočeská univerzita, 2004. ISBN 80-7043-273-X
- [47] HEIMBS, Sebastian; PEIN, Marc. Failure behaviour of honeycomb sandwich corner joints and inserts. *Composite Structures*, 2009, 89.4: 575-588.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbol	Jednotka	Popis
C^*	[-]	Materiálová konstanta
F_{\max}	[N]	Maximální ohybová síla
f_{\max}	[Hz]	Maximální frekvence stroje
H	[-]	Hloubka pivotu
n	[ot/min.]	maximální otáčky stroje
N	[-]	Počet cyklů
N_c	[-]	Neomezený počet cyklů
P_L	[-]	Pivotová polosuma
R_L	[-]	Pivotové rozpětí
R	[-]	Součinitel asymetrie cyklu
T	[s]	Perioda kmitu
s	[-]	Směrodatná odchylka
y	[mm]	Průhyb
y_a	[mm]	Amplituda průhybu
y_m	[mm]	Střední průhyb
ρ	[kg/m ³]	Hustota
σ	[MPa]	Napětí
σ_a	[MPa]	Amplituda napětí
σ_m	[MPa]	Střední napětí
σ_{\min}	[MPa]	Minimální napětí
σ_{\max}	[MPa]	Maximální napětí
$\Delta\sigma$	[MPa]	Rozkmit napětí
Δy	[mm]	Rozkmit průhybu

μ	[-]	Hornova střední hodnota
\tilde{x}	[-]	Medián, kvantil (Q2)
x_D	[-]	Dolní pivot
x_H	[-]	Horní pivot
$1-\alpha$	[-]	Konfidenční hladina spolehlivosti
$1/m$	[-]	Sklon přímky v log-log souřadnicích

Zkratka **Význam zkratky**

Al	Hliník
ASTM	International standards organization
FIA	Federation international automobile
F1	Formula one
kg	Kilogram
kGy	Kilogray
mm	milimetr
int	integer
NASA	National Aeronautics and Space Administration
PAN	Polyakrylonitrilové vlákno
PE	Polyetylén.
PET	Polykarbonát
PC	Polykarbonát.
PP	Polypropylen.
PS	Polystyren.
PUR	Polyuretan
PVC	Polyvinylchlorid
SEM	Scanning electron microscope

UP Polyesterové pryskyřice

W Watt

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1. Rozdělení materiálů [4]</i>	12
<i>Obr. 2. Rozdělení kompozitů</i>	15
<i>Obr. 3. Dělení kompozitů podle vláknové výztuže [46]</i>	17
<i>Obr. 4. Typy vazeb výztuží [36]</i>	20
<i>Obr. 5. Hustota vláken [21]</i>	20
<i>Obr. 6. a) SEM snímek neupraveného E-skelného vlákna, b) SEM snímek upraveného E-skelného vlákna, c) Tkaná struktura ze skelného vlákna, d) Mikroskopický snímek tkaniny ze skelného vlákna [26], [30]</i>	21
<i>Obr. 7. Uhlíkové vlákno – a) SEM snímek bez ozáření, b) SEM snímek s ozářením 100kGy, c) uhlíkové vlákno v návinech [22],[25]</i>	22
<i>Obr. 8. Aplikace kompozitních materiálů v letounech Airbus [10]</i>	23
<i>Obr. 9. Aplikace sendviče z kompozitu v křídle letounu [15]</i>	24
<i>Obr. 10. Aplikace kompozitů v moderní hromadné dopravě [15]</i>	24
<i>Obr. 11. Moderní monokok závodního monopostu [9]</i>	25
<i>Obr. 12. První vyrobený monokok vozu Formule 1 [12]</i>	26
<i>Obr. 13. Zavěšení a odpružení z kompozitního materiálu [20]</i>	26
<i>Obr. 14. Konstrukce kompozitního sendviče [8]</i>	27
<i>Obr. 15. Vady u sendvičových konstrukcí</i>	29
<i>Obr. 16. Druhy poruch při ohybovém zatížení a) zlomení sendviče b) lokální ztráta stability a delaminace c) zvlnění potahu d) lokální stlačení jádra [18]</i>	30
<i>Obr. 17. Závislost ceny na výkonových vlastnostech kompozitních jader [33]</i>	30
<i>Obr. 18. Konstrukce voštiny [13]</i>	31
<i>Obr. 19. Tvary buněk u voštin [16]</i>	32
<i>Obr. 20. Hliníkové voštinové jádra [31]</i>	33
<i>Obr. 21. Nomexové voštinové jádro [32]</i>	33
<i>Obr. 22. Hliníková pěna [37]</i>	34
<i>Obr. 23. a - uhlíkový prepreg, b - prepreg z e-vlaken [39]</i>	35
<i>Obr. 24. Výroba prepregu [28]</i>	36
<i>Obr. 25. a – Insert neprůchozí sendvičem, b – insert průchozí sendvičem</i>	37
<i>Obr. 26. a – příprava jádra pro vyplnění pryskyřicí, b – vytvrzená pryskyřice v jádru [40]</i>	37
<i>Obr. 27. Různé typy insertů [47]</i>	38

<i>Obr. 28. Nedokonalé vyplnění jádra pryskyřicí.....</i>	39
<i>Obr. 29. Druhy sil působících na inserty [35]</i>	39
<i>Obr. 30. Wöhlerova křivka pro kompozitní materiál [2]</i>	41
<i>Obr. 31. Zátěžový cyklus.....</i>	42
<i>Obr. 32. Typy cyklického zatížení [41]</i>	43
<i>Obr. 33. Průběh poškození kompozitního materiálu [45]</i>	45
<i>Obr. 34. A – praskání matrice, B – počátek delaminace, C – delaminace a zvětšování a propojování prasklin [44]</i>	46
<i>Obr. 35. Hliníková voština s vyřezanými otvory pro inserty</i>	56
<i>Obr. 36. Uhlíkový prepreg v návínu, po vytažení z mrazicího boxu.....</i>	56
<i>Obr. 37. Odnímání ochranné vrstvy ze skelného prepregu</i>	58
<i>Obr. 38. Kladení vrstev skelného prepregu na hliníkovou voštinu.....</i>	58
<i>Obr. 39. Vulkanizační lis.....</i>	59
<i>Obr. 40. Voština ve formě, vložená do vulkanizačního lisu.....</i>	59
<i>Obr. 41. Epoxidová pryskyřice v hliníkové voštině</i>	60
<i>Obr. 42. Vrtání díry pro insertovou vložku.....</i>	62
<i>Obr. 43. a) Vizualní návod montáže, b) Montáž insertové vložky</i>	62
<i>Obr. 44. Rozdělení vzorků pro praktickou část</i>	64
<i>Obr. 45. Trhací stroj ZWICK 1456.....</i>	65
<i>Obr. 46. Stroj na únavovou zkoušku cyklickým zatížením v ohybu.....</i>	66
<i>Obr. 47. Nastavování amplitudy průhybu na cyklovacím stroji</i>	67
<i>Obr. 48. Souměrně střídavý cyklus - počet cyklů N na průhybu y.....</i>	68
<i>Obr. 49. Graf statické zkoušky tříbodovým ohybem na vytržení insertu</i>	69
<i>Obr. 50. Naměřené data u vzorků se skelným prepregem</i>	71
<i>Obr. 51. Naměřené data u vzorků s uhlíkovým prepregem</i>	73
<i>Obr. 52. Wöhlerova křivka pro vzorky se skelným prepregem</i>	75
<i>Obr. 53. Wöhlerova křivka pro vzorky s uhlíkovým prepregem</i>	76
<i>Obr. 54. Porovnání Wöhlerových křivek</i>	77
<i>Obr. 55. Porucha sendviče s potahem ze skelného prepregu na 1. hladině zatížení.....</i>	78
<i>Obr. 56. Porucha sendviče s potahem z uhlíkového prepregu na 1. hladině zatížení</i>	79
<i>Obr. 57. Porucha sendviče s potahem ze skelného prepregu na 2. hladině zatížení.....</i>	79
<i>Obr. 58. Porucha sendviče s potahem z uhlíkového prepregu na 2. hladině zatížení</i>	80
<i>Obr. 59. Porucha sendviče s potahem ze skelného prepregu na 3. hladině zatížení.....</i>	80

-
- Obr. 60. *Porucha sendviče s potahem ze skelného prepregu na 4. hladině zatížení 81*
- Obr. 61. *Porucha sendviče s potahem z uhlíkového prepregu na 4. hladině zatížení 81*

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1. Porovnání vlastností termoplastů a termosetů</i>	18
<i>Tab. 2. Porovnání tuhosti s nárůstem pevnosti a hmotnosti [21]</i>	28
<i>Tab. 3. Tabulka Hornových kvantilů</i>	51
<i>Tab. 4. Vlastnosti hliníkové voštiny</i>	55
<i>Tab. 5. Hladiny zatížení a rozřazení vzorků do hladin</i>	67
<i>Tab. 6. Vyhodnocená data při zkoušce vytržení insertu</i>	69
<i>Tab. 7. Naměřené data pro vzorky se skelným prepregem</i>	71
<i>Tab. 8. Naměřené data pro vzorky s uhlíkovým prepregem</i>	72
<i>Tab. 9. Analýza malého výběru pro sendviče s potahem ze skelného prepregu</i>	74
<i>Tab. 10. Analýza malého výběru pro sendviče s potahem z uhlíkového prepregu</i>	74

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha PI	Naměřené hodnoty při testování u vzorků bez insertových vložek
Příloha PII	Materiálový list epoxidového prepregu IMP 503Z
Příloha PIII	Materiálový list hliníkové voštiny ECM 6,4-60
Příloha PIV	Materiálový list insertové vložky K0978.04

**PŘÍLOHA P I: NAMĚŘENÉ HODNOTY PŘI TESTOVÁNÍ U
VZORKŮ BEZ INSERTOVÝCH VLOŽEK**

Sendviče bez insertu					
Jádro		Al		No	
Potah		Sv	Uv	Sv	Uv
		Počty naměřených cyklů N [-]			
Hladina:	A: y = 2,1 mm	1015200	998280	786780	321480
		1015200	1015200	549900	507600
		693720	1015200	642960	360548
		795240	1015200	1015200	520498
	B: y = 3,0 mm	59220	2825	14100	67680
		93060	2250	11285	62028
		50760	1134	47934	67680
		59220	1692	23688	67108
	C: y = 4,0 mm	1658	67	615	1810
		7563	150	499	2707
		3350	108	237	1357
		3570	41	356	1472
	D: y = 4,9 mm	1007	17	246	73
		1354	21	306	62
		710	16	309	69
		2487	15	310	57

**PŘÍLOHA P II: MATERIÁLOVÝ LIST EPOXIDOVÉHO PREPREGU
IMP 503Z**

MATRIX PRODUCT DATA

IMP503Z

ST-130213-rev7-09/01/2015

DESCRIPTION

Modified epoxy resin IMP503Z is suitable for prepregging of carbon/glass and aramid fabrics. IMP503Z with his high transparency is suitable for "carbon look" composite part where high cosmetical requirements are needed. IMP503Z can be used with carbon or metallic mould with the standard technologies: Hot Press, Wrapping, Autoclave and Vacuum Bag.

BENEFITS AND FEATURES

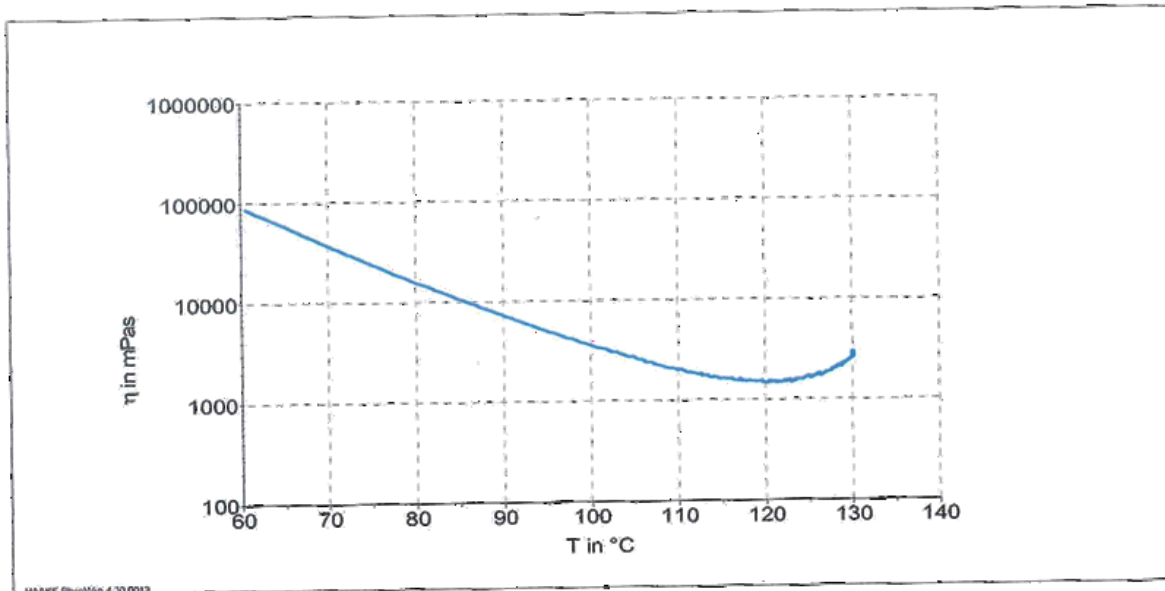
- Field of applications: automotive, sporting goods, marine, industrial
- Different curing cycles are possible
- Good mechanical properties
- UV resistance improved

RESIN PROPERTIES

TYPE		TOUGHENED
Cured resin density	gr/cm ³	1,15 + 1,25
Gel Time at 125 °C (257 °F)	minuti	6'-9'
Gel Time at 110 °C (221 °F)	minuti	20 + 26
TACK		MEDIUM/HIGH
Resin VOC on prepreg	%	< 1
Tg fully cured (Tan Delta DMA)	°C (°F)	120 (248)
Shelf life at room temperature (23 °C)	weeks	5
Shelf Life (-18°C approx)	years	1

VISCOSITY VS TEMPERATURE BEHAVIOUR

The plot under depicted below is performed with cone-plate rehometer starting from 60°C until viscosity kick off.
Parameters: frequency 0.2 Hz and heating rate 3 °C/ min.



CURING CYCLES SUGGESTED

TEMPERATURES	TIME	Tg (TanDelta DMA, °C)
110	2h	120-125
125	1h	120-125

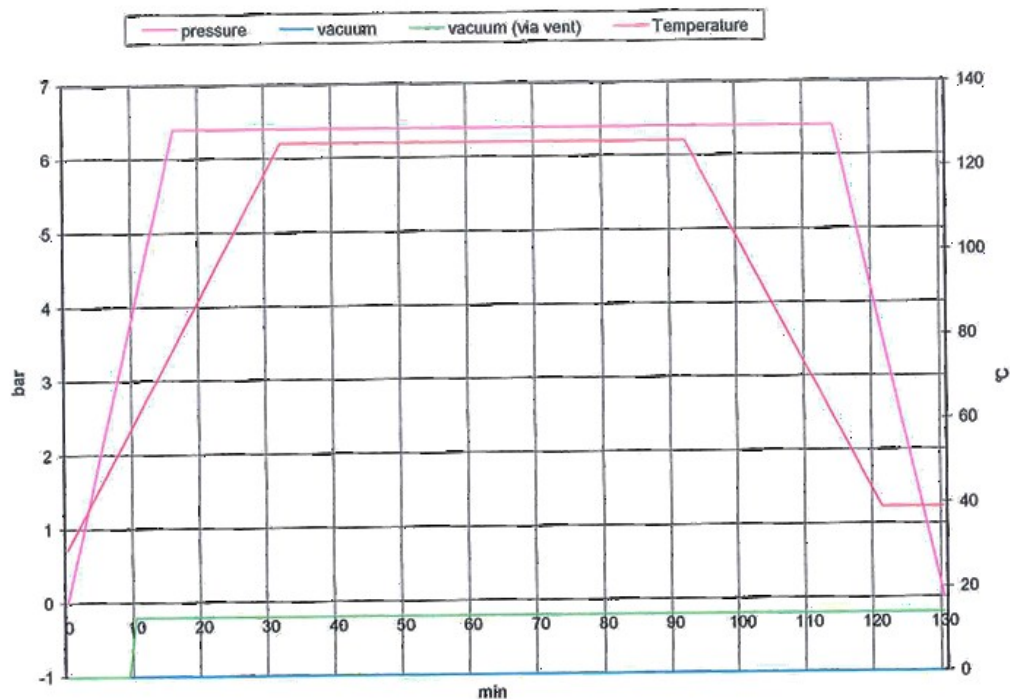
PROCESS DESCRIPTIONS

Autoclave:

125°C cycle

1. After making the bag put it in the autoclave and apply -0.9 ÷ -1.0 bar vacuum
2. Heat to 125°C at 1-3 min/°C rate
3. Apply the pressure, with quick increment slope, in order to reach the maximum possible value (ex. 4-7 bar) before 80°C. Reached the process pressure is possible reduce the vacuum value to -0.2 bar (via vent). This option depend on the evaluations of the autoclave driver.
4. When 125°C temperature is reached dwell it and the pressure for 1h
5. Cool to 60°C under pressure, then release the pressure
6. At room temperature get the part out of the autoclave

AUTOCLAVE CYCLE



Hot Press:

125°C cycle:

1. Put the prepreg material into the mould at room temperature and close the mould at 1Bar pressure
2. Heat to 125°C a 1-3°C/min (3-5°C/min for small part if possible)
3. When 100-110°C is reached apply 2-3 Bar or over if the flow can be controlled
4. When 125°C temperature is reached dwell it and the pressure for 1h
5. Cool to 40-50°C under pressure and pull the part out

IMP503 Z is a reactive epoxy formulation, too high heat up rate and/or too high temperature dwell can give out of control temperature inside the stack lay up when thick laminate are processed (thickness over 1 cm)

These autoclave and hot press cycle are only suggestions based on Impregmatex Compositi experiences and are not absolute way to process properly the material. Different equipments may need different curing cycle conditions.

TYPICAL MECHANICAL PROPERTIES

The mechanical data below were performed on laminate cured by hot press technology at 125°C curing cycle (see above).

FABRIC	Flexural Strength ASTM D790 [Mpa]	Flexural Modulus ASTMD790 [GPa]	G1c mod. ASTM D5528 [J/m ²]	ILSS ASTM 2344 [N/mm ²]	Volume of fibre [%]
GG630T	730	57	800	56	64
GG428T	800	52	-	64	59
GG204T-V (1)	800	54	-	64	59
GG205T	810	55	750	68	58
GG245T	800	54	760	65	56
GG380T	800	55	730	64	62
GG90P	655	52	-	70	65
GG204P	810	53	-	66	59
CX400	938	56	-	54	62 (provini ricavati in direzione +45°)
GG800T	822	60	-	52	64
GG285T4	805	51	-	61	65
VV290T	630	27	-	57	64.8
VV380	710	23	-	64	60

FABRIC	Flexural Strength ASTM D790 [Mpa]	Flexural Modulus ASTM D790 [GPa]	G1c mod. ASTM D5528 [J/m ²]	ILSS ASTM 2344 [N/mm ²]	Volume of fibre [%]
VV580T	760	30	1160	60	56
VV700	750	25	-	56	64
KK300	440	21	-	44	56
GV330UD	1150	115	700	73	66
GV335UD	650	250	-	62	54

The values are to be understood as the average of the experimental values observed.

- (1) is also available as stabilized WF1, for exposed areas where high aesthetic of textile construction must be maintained during the process.

These mechanical data were obtained by hot press technology. With different curing cycle technology these data can be different.

PREPREG STORAGE LIFE

This prepreg should be stored as received in a cool dry place or in a refrigerator. Storage life at different temperatures:

- 12 Months at -18 °C
- 5 weeks at +23 °C

After removal from refrigerator storage, prepreg should be allowed to reach room temperature before opening the polythene bag to prevent water condensation.

PRECAUTIONS FOR USE

To handle properly the prepreg product observe the established precautions.

Operators working with this prepreg should wear clean and impervious gloves to reduce the possibility of skin contact and to prevent the prepreg contamination
Safety data sheet is available for this product.

NOTE

The above mentioned technical informations are based on our actual knowhow and accurate, reproducible laboratories tests but due to the product complexity and its further processing, is not possible guarantee these.
Impregnatex Compositi will reserve to made further modification to this paperwork

**PŘÍLOHA P III: MATERIÁLOVÝ LIST HLINÍKOVÉ VOŠTINY ECM
6,4-60**



EURO-COMPOSITES®

Aluminum Honeycomb Core

Technical Data Sheet for all types

Material: Alu-Alloy 3003 (AlMnCu)

Corrosion protection: zirconium oxide coated

Mechanical Properties	Unit	Test method	Typical values							
			ECM 3.2-130	ECM 4.8-77	ECM 6.4-60	ECM 6.4-82	ECM 9.6-41	ECM 9.6-55	ECM 12.7-42	ECM 19.2-29
Foil Thickness	µm	ECP 231-04	60	60	60	80	60	80	80	80
Cell Size, Nominal	mm	DIN 29970	3.2	4.8	6.4	6.4	9.6	9.6	12.7	19.2
Density, Nominal	kg/m³	DIN 29970	130	77	60	82	41	55	42	29
Compression Strength Unstab.	N/mm²	DIN 53291	7.00	3.94	2.96	4.25	1.73	2.24	1.00	0.69
Compression Strength Stab.	N/mm²	DIN 53291	-	-	3.55	4.50	-	2.75	-	-
Crush strength	N/mm²	NHTSATP-24-214D-02**	3,380	1,679	-	1,665	0,574	0,891	-	0,263
Plate Shear Strength/ L-Dir.	N/mm²	DIN 53294	4.00	2.29	1.72	2.40	1.13	1.48	1.00	0.66
Plate Shear Modul/ L-Dir.	N/mm²	DIN 53294	550	456	370	430	227	253	193	201
Plate Shear Strength/ W-Dir.	N/mm²	DIN 53294	2.50	1.52	0.95	1.40	0.60	0.88	0.46	0.32
Plate Shear Modul/ W-Dir.	N/mm²	DIN 53294	350	265	166	220	98	170	87	54
Service Temperature	°C	-	-55°C up to 177°C							

Micro-Perforated: All Honeycomb ECM core types can be delivered, if required, as micro-perforated

Honeycomb: Aluminum core types ECM-P

*- Thickness of test sheet: 15.87 mm

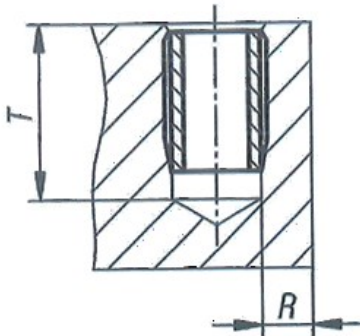
** - Thickness of test sheet: 25.40 mm

PŘÍLOHA P IV: MATERIÁLOVÝ LIST INSERTOVÉ VLOŽKY

K0978.04

Závitové vložky samořezné s řeznou drážkou

Popis zboží/obrázky produktu



Popis

Materiál:

Ocel nebo nerezová ocel 1.4305.

Provedení:

Ocel cementovaná, pozinkovaná.

Nerezová ocel bez povrchové úpravy.

Upozornění:

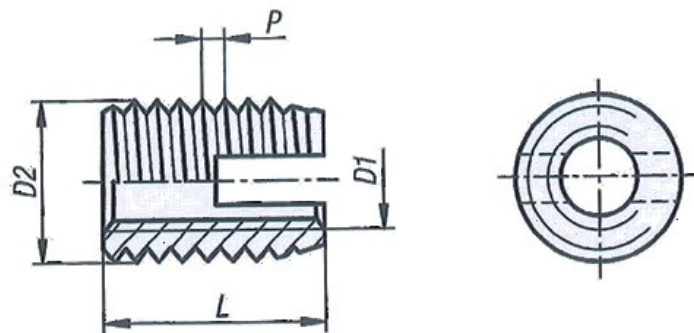
Samořezné závitové vložky pro výrobu vysoce namáhaných, ořezuvzdorných a vibračně odolných šroubových spojů v materiálech s nízkou pevností ve střihu, jako je např. hliník a jeho slitiny, mosaz, bronz, litina, duroplasty a termoplasty.

Závitové vložky jsou na spodním konci zakončeny kuželovitě a mají řeznou drážku. Při zašroubování do úchytného otvoru si svůj úchytný závit vyříznou samy. To zaručuje absolutně bezpečné a pevné ukotvení v úchytném materiálu.

Vnitřní závit D1 podle ISO 6H.

Závitové vložky s řeznou drážkou pruží v mnohých materiálech v oblasti řezné drážky mírně směrem dovnitř. Vzniká tím jistý efekt zajištění šroubu. Není-li to žádoucí, doporučujeme závitové vložky s řezným otvorem.

Výkresy



Přehled zboží

Objednáací číslo	Materiál Základní těleso	D1	D2	P	L	T min.	R min. u lehkých kovů	R min. u litiny	R min. u plastů	Objednáací číslo ruční montážní nářadí	Objednáací číslo strojní montážní nářadí
K0978.03	Ocel	M3	5	0,5	6	8	1	1,5	1,25	K0978.803	K0978.903
K0978.04	Ocel	M4	6,5	0,75	8	10	1,3	1,95	1,6	K0978.804	K0978.904
K0978.05	Ocel	M5	8	1	10	13	1,6	2,4	2	K0978.805	K0978.905
K0978.06	Ocel	M6	10	1,5	14	17	2	3	2,5	K0978.806	K0978.906
K0978.08	Ocel	M8	12	1,5	15	18	2,4	3,6	3	K0978.808	K0978.908
K0978.10	Ocel	M10	14	1,5	18	22	2,8	4,2	3,5	K0978.810	K0978.910
K0978.12	Ocel	M12	16	1,5	22	26	3,2	4,8	4	K0978.812	K0978.912
K0978.16	Ocel	M16	20	1,5	22	27	4	6	5	-	K0978.916
K0978.103	Nerezová ocel	M3	5	0,5	6	8	1	1,5	1,25	K0978.803	K0978.903
K0978.104	Nerezová ocel	M4	6,5	0,75	8	10	1,3	1,95	1,6	K0978.804	K0978.904
K0978.105	Nerezová ocel	M5	8	1	10	13	1,6	2,4	2	K0978.805	K0978.905
K0978.106	Nerezová ocel	M6	10	1,5	14	17	2	3	2,5	K0978.806	K0978.906
K0978.108	Nerezová ocel	M8	12	1,5	15	18	2,4	3,6	3	K0978.808	K0978.908

Závitové vložky samořezné s řeznou drážkou

Přehled zboží

Objednací číslo	Materiál Základní těleso	D1	D2	P	L	T	R min. u lehkých kovů	R min. u litiny	R min. u plastů	Objednací číslo ruční montážní nářadí	Objednací číslo strojní montážní nářadí
K0978.110	Nerezová ocel	M10	14	1,5	18	22	2,8	4,2	3,5	K0978.810	K0978.910
K0978.112	Nerezová ocel	M12	16	1,5	22	26	3,2	4,8	4	K0978.812	K0978.912
K0978.116	Nerezová ocel	M16	20	1,5	22	27	4	6	5	-	K0978.916