

Výzkum únavového chování kompozitních sendvičových struktur v dopravním průmyslu

Bc. Petr Metela

Diplomová práce
2013



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická
Ústav výrobního inženýrství
akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Petr Metela**
Osobní číslo: **T11177**
Studijní program: **N3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Výrobní inženýrství**
Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Výzkum únavového chování kompozitních sendvičových struktur v dopravním průmyslu**

Zásady pro vypracování:

1. Teoretická část:

Přehled nejčastěji používaných druhů materiálů v kompozitních sendvičových strukturách.

Druhy technologií výroby kompozitních konstrukcí.

Základní teorie únavy kompozitních materiálů.

2. Experimentální část:

Výroba zkušebních vzorků.

Studium vlivu druhů použitého materiálu kompozitních sendvičových struktur na počtu cyklů při nízkocyklové únavě pomocí trojbodového ohybu.

Studium vlivu druhů použitého materiálu kompozitních sendvičových struktur na síle potřebné k odlupu vnější vrstvy od jádra pomocí PEEL testu.

Závěrečné zhodnocení naměřených dat a shrnutí všech výsledků.

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

Ehrenstein, G. W.: Polymerní kompozitní materiály. Scientia Praha, 2009.

Jančár, J.: Úvod do materiálového inženýrství kompozitů. Brno, 1999.

Daďourek, K.: Kompozitní materiály – druhy a jejich použití. Liberec, 2007.

Dylšg, Z., Orzos Z.: Únava materiálu a její zkoušení. Praha, 1968.

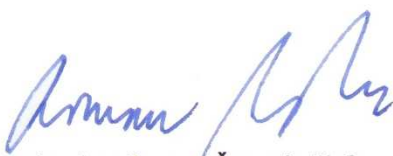
Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Soňa Rusnáková, Ph.D.**

Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce: **8. února 2013**

Termín odevzdání diplomové práce: **10. května 2013**

Ve Zlíně dne 11. února 2013



doc. Ing. Roman Čermák, 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 7. 5. 2013

.....

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 vzdělávacího 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). Odporuje-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

Tato diplomová práce obsahuje literární studii daného tématu a hodnocení únavového chování sendvičových struktur. Skládá se ze dvou samostatných částí.

Teoretická část je zaměřena na celkový přehled kompozitních materiálů s důrazem na sendvičové konstrukce. Kromě toho zde nalezneme technologie výroby těchto sendvičových konstrukcí a popis mechanických zkoušek, které budou v další části použity.

Praktická část obsahuje technologii výroby a složení zkušebních vzorků, dále samotné provedení mechanický zkoušek (statické zkoušky jednoosým tříbodovým ohybem, dynamické únavové zkoušky a peel test).

Závěrem je vyhodnocení naměřených dat v závislosti na použitých materiálech.

Klíčová slova: kompozit, výztuž, tkanina, jádro, laminát, sendvičová konstrukce, únava materiálů

ABSTRACT

This thesis includes a literary study of the topic and ratings fatigue behaviour of sandwich structures. It consists of two separate parts.

The theoretical part is aimed at an overview of composite materials with an emphasis of sandwich structures. We can find here technology such sandwich structures and description of mechanical tests that will be used in the next section.

The practical part contains manufacturing technology and the composition of test samples, next the actual execution of mechanical tests (uniaxial static three-point bending tests, dynamic fatigue tests and peel test).

In conclusion is the evaluation of the measured data depending of the materials used.

Keywords: composite, reinforcement, fabric, core, laminate, sandwich construction, fatigue of materials

Rád bych zde poděkoval vedoucí mé diplomové práce doc. Ing. Soně Rusnákové, Ph.D. za odborné vedení, užitečné rady, připomínky a příjemnou spolupráci při vypracování této diplomové práce. Dále Ing. Vladimíru Rusnákovi za pomoc při výrobě vzorků, Ing. Milanovi Žaludkovi, Ph.D. a Ing. Tomášovi Sedláčkovi, Ph.D. za pomoc při měření a zpracování výsledků.

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

OBSAH

ÚVOD	11
I TEORETICKÁ ČÁST	12
1 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY	13
1.1 SKLADBA SENDVIČOVÉ KONSTRUKCE	13
1.1.1 Vnější vrstva.....	14
1.1.1.1 Vyztužující vlákna	14
1.1.1.2 Matrice	21
1.1.2 Jádra	23
1.2 VLASTNOSTI A POUŽITÍ.....	25
2 TECHNOLOGIE VÝROBY KOMPOZITNÍCH SENDVIČOVÝCH KONSTRUKCÍ	27
2.1 RUČNÍ LAMINOVÁNÍ	28
2.1.1 Ruční kladení (Hand lay-up).....	28
2.1.2 Nástřík (Spray lay-up).....	29
2.2 VYSOKOTLAKÉ VSTRÍKOVÁNÍ (RTM – RESIN TRANSFER MOULDING).....	30
2.3 VAKUOVÁ INFÚZE (VFI – VACUUM FOIL INFUSION).....	31
2.4 VAKUOVÉ LISOVÁNÍ PREPREGŮ	32
2.4.1 Lisování prepregů – Crush Core	33
2.4.2 Výroba prepregů.....	33
2.5 NAVÍJENÍ.....	34
3 ÚNAVA MATERIÁLU	35
3.1 POŠKOZENÍ KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ PŘI DYNAMICKÉM ZATÍŽENÍ.....	35
3.2 MECHANICKÉ CHOVÁNÍ SENDVIČOVÝCH STRUKTUR	38
4 MECHANICKÉ ZKOUŠKY	40
4.1 STATICKÉ ZKOUŠKY	40
4.1.1 Zkouška jednoosým ohybem.....	40
4.1.2 Peel testy	43
4.2 DYNAMICKÉ ÚNAVOVÉ ZKOUŠKY.....	46
4.2.1 Základní charakteristiky cyklického zatěžování	46
4.2.2 Křivka životnosti	49
4.2.3 Stroje pro dynamické únavové zkoušky	50
4.2.4 Současný stav ve světě.....	51
5 ZÁVĚR TEORETICKÉ ČÁSTI A CÍLE ČÁSTI PRAKTICKÉ	52

II PRAKTICKÁ ČÁST	53
6 VÝROBA VZORKŮ	54
6.1 ZÁKLADNÍ TECHNICKÁ SPECIFIKACE POUŽITÝCH MATERIÁLŮ	54
6.2 PŘÍPRAVA POLOTOVARŮ	57
6.3 TECHNOLOGIE VÝROBY	58
6.3.1 Parametry nastavení vytvrzování prepregů	61
6.4 DALŠÍ ÚPRAVA DESEK	62
6.5 MATERIÁLOVÉ SLOŽENÍ SENDVIČOVÝCH VZORKŮ	63
6.5.1 Složení jednotlivých sendvičových vzorků	63
7 STATICKÉ ZKOUŠKY JEDNOOSÝM TŘÍBODOVÝM OHYBEM	70
7.1 NASTAVUJÍCÍ PARAMETRY ZKOUŠKY	71
7.2 NAMĚŘENÁ A VYHODNOCENÁ DATA	71
7.2.1 Vzorek č. 1	72
7.2.2 Vzorek č. 2	73
7.2.3 Vzorek č. 3	74
7.2.4 Vzorek č. 4	75
7.2.5 Vzorek č. 5	76
7.2.6 Vzorek č. 6	77
7.2.7 Vzorek č. 7	78
7.2.8 Shrnutí naměřených dat	79
8 DYNAMICKÉ ÚNAVOVÉ ZKOUŠKY	82
8.1 NASTAVUJÍCÍ PARAMETRY ZKOUŠKY	83
8.2 NAMĚŘENÁ A VYHODNOCENÁ DATA	83
8.2.1 Únavová životnost	83
8.2.1.1 Vzorek č. 1	84
8.2.1.2 Vzorek č. 4	85
8.2.1.3 Vzorek č. 6	86
8.2.1.4 Vzorek č. 7	87
8.2.1.5 Shrnutí naměřených dat	88
8.2.2 Stanovení mechanických vlastností cyklickým ohybem	89
8.2.2.1 Vzorek č. 2	89
8.2.2.2 Vzorek č. 3	90
8.2.2.3 Vzorek č. 5	91
8.2.2.4 Shrnutí naměřených dat	92
9 PEEL TEST	95
9.1 NASTAVUJÍCÍ PARAMETRY ZKOUŠKY	95
9.2 NAMĚŘENÁ A VYHODNOCENÁ DATA	96
9.2.1 Vzorek č. 1	97
9.2.2 Vzorek č. 2	98
9.2.3 Vzorek č. 3	99
9.2.4 Vzorek č. 4	100
9.2.5 Vzorek č. 5	101
9.2.6 Vzorek č. 6	102
9.2.7 Vzorek č. 7	103
9.2.8 Shrnutí naměřených dat	104

10	EKONOMICKÁ BILANCE	106
10.1	MATERIÁLOVÉ NÁKLADY	106
10.2	VÝROBNÍ NÁKLADY	108
10.3	CELKOVÉ NÁKLADY	109
	ZÁVĚR	110
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	112
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	115
	SEZNAM OBRÁZKŮ	118
	SEZNAM TABULEK	122

ÚVOD

Nejběžnější materiály na bázi přírodních polymerů jako je dřevo, vlna, bavlna a slonovina používají lidé už několik tisíc let. Teprve na začátku 20. století (kolem roku 1907) se podařilo Berkelandovi vyrobit synteticky první umělý polymer, který měl technické použití. Tento polymer nazval jako bakelit. Nicméně do inženýrské praxe se polymery dostávají po první světové válce a zejména po druhé světové válce. V průběhu padesátých let vznikají výzkumná pracoviště zabývající se vlastnostmi a strukturou polymerů a vzniká tak věda o polymerech (Physical Polymer Science). Brzy na to se přicházelo na to, že tyto syntetické polymery mohou svými vlastnostmi nahradit často i kovové materiály, keramiku nebo i sklo. Začalo docházet k obrovskému rozvoji polymerních materiálů. Jejich výroba se provádí z relativně levných a dostupných surovin a snadno se zpracovávají. Tyto nové materiály člověku otevírají nové možnosti vývoje. V současné době existuje přes 15 tisíc různých materiálů, která mají stovky modifikací.

Jestliže do pryskyřice nebo plastu přidáme plnivo ve formě vláken mající velkou tuhost a pevnost, tak získáme skupinu materiálů, které nazýváme vláknové polymerní kompozity. Tyto materiály mají značné množství výhodných vlastností jako nízkou hustotu, vysokou pevnost a tuhost, odolnost proti opotřebení, elektroizolační vlastnosti, malou tepelnou vodivost a jiné.

V nynější době je na konstruktéry vyvíjen tlak, aby navrhovali konstrukce s co nejmenší hmotností, ale stále dostatečně tuhé a pevné. Proto se polymerní materiály začali vyrábět jako sendvičové konstrukce, což je speciální druh laminátu. Skládá se z vnějších vrstev a jádra materiálu. Sendvičové konstrukce mají oproti laminátům až trojnásobně vyšší tuhost, jejich hmotnost je přibližně poloviční a mají dvojnásobně vyšší izolační schopnosti.

I. TEORETICKÁ ČÁST

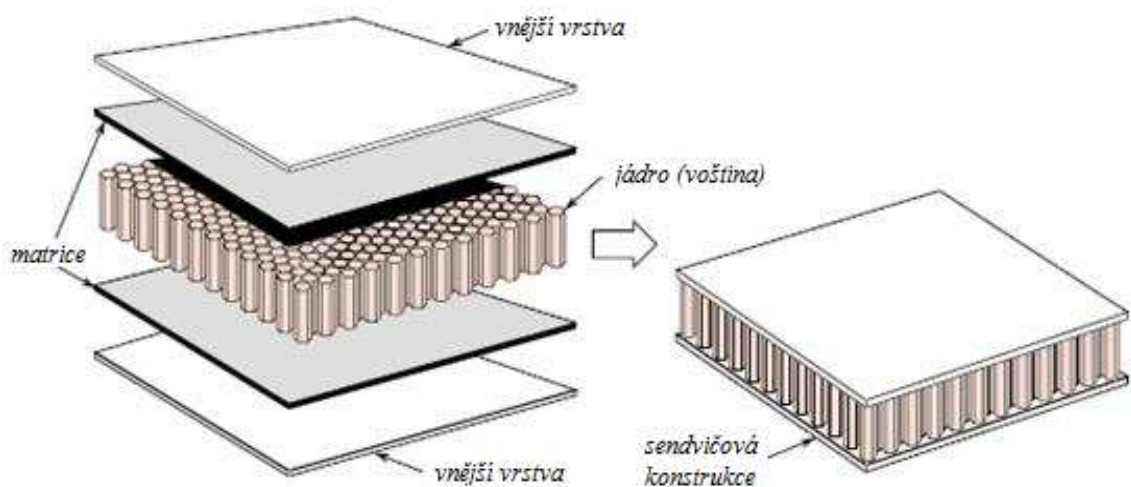
1 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY

Kompozity jsou heterogenní materiály složené minimálně ze dvou různých složek materiálu s rozdílnými vlastnostmi, které ve své kombinaci dodají výslednému výrobku zcela nové vlastnosti, které nemá samostatně žádná z jeho složek. Většinou jedna ze složek dává výrobku pevnost a druhá slouží jako pojivo. [1, 2]

Kompozitní materiály převyšují ostatní materiály především svými tzv. měrnými vlastnostmi, což jsou hodnoty jednotlivých vlastností vztažené na jednotku hmotnosti. Kompozity tedy nejlépe využívají své možnosti hmoty. Dále se kompozitní materiály výrazně nedeformují (mez elasticity přibližně odpovídá mezi pevnosti) a mají vysokou mez únavy. [1, 2]

1.1 Skladba sendvičové konstrukce

Základní složkou kompozitu je matrice, ve které je uložena výztuž a která zásadním způsobem zvyšuje mechanické a fyzikální vlastnosti kompozitu. Matrice může být polymerní, kovová nebo i keramická. Mezi keramiku se v dnešní době zařazuje i sklo, sklokeramika, grafit nebo beton. Největší použití má kompozit s plastovými maticemi. Na obrázku 1 je vidět sendvičová konstrukce složená ze dvou vnějších vrstev, které jsou tenké ale tuhé, a voštinového jádra, které je distanční a zpravidla méně pevné. [2, 10]



Obr. 1: Schéma sendvičové konstrukce [10]

1.1.1 Vnější vrstva

Mezi základní složky kompozitu s plastovou maticí patří termoplast nebo reaktoplast, který tvoří ve většině případů hlavní část kompozitu. V matici je uložena jedna nebo více výztuží, které jsou mnohem pevnější a tužší než samotná matrice. Výztuž je složena z vláken nebo částic. Matrice slouží k přenášení napětí do vláken a k ochraně těchto vláken před okolními účinky. [2]

1.1.1.1 Vyztužující vlákna

V kompozitních materiálech se používají různé typy vláken. Můžeme je rozdělit na následující skupiny:

- *Skelná vlákna*

Textilní skelná vlákna (GF – Glass fiber), která jsou tažena z roztavené skloviny, mají pravidelný kruhový průřez o průměru 3,5 – 24 μm .

Nejčastěji používané druhy sklovin:

Označení E-vlákna se používá pro skelná vlákna z bezalkalické skloviny, které jsou vynikajícím elektrickým izolantem a mají vysokou prostupnost pro záření. Vyrábějí se ze skloviny označující se jako *E-sklovina*, která je nejpoužívanější pro výrobu vláken (až 90% trhu).

O 40 až 70% vyšší pevnost mají vlákna s vyšším obsahem MgO, SiO₂, Al₂O₃ a označují se v Evropě jako *R-sklovina*, v USA jako *S-sklovina* a v Japonsku jako *T-sklovina*.

Dále to může být *C-sklovina*, která má vysokou odolnost proti chemicky agresivním látkám a proti kyselinám. [1]

Tab. 1: Vlastnosti vybraných vláken podle druhu skloviny [1]

Sklovina	E	R, S, T	C
Hustota [$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$]	2,60	2,53	2,52
Mez pevnosti v tahu [MPa]	3 400	4 400	2 400
Modul pružnosti [MPa]	73 000	86 000	70 000
Poměrné prodloužení při přetržení [%]	< 4,8	< 4,6	< 4,8
Součinitel teplotní roztažnosti [K^{-1}]	$5,0 \cdot 10^{-6}$	$4,0 \cdot 10^{-6}$	$5,9 \cdot 10^{-6}$
Teplota měknutí [$^{\circ}\text{C}$]	850	980	750

Skelná vlákna mají amorfní strukturu a jsou izotropní (materiálové vlastnosti jsou v podélném i příčném směru totožné). Mohou se dodávat ve formě přízí, skaných přízí, pramenců, rohoží, krátkých vláken atd. [1]

○ *Aramidová vlákna (AF – Aramid fiber)*

Tato vlákna jsou na bázi lineárně organických polymerů. Jejich hlavní výhodou je vysoká pevnost a tuhost. Odhadovaná teoretická pevnost se pohybuje kolem 200 000 MPa. Nicméně jediné komerčně vyráběné vlákna, které se blíží této hodnotě, jsou vlákna na bázi aromatických polyamidů, kde dosahujeme hodnot pevnosti v tahu 3 600 MPa a modulu pružnosti 125 000 MPa při průměru vlákna 12 μm .

Aramidová vlákna můžeme bez problémů zpracovávat se všemi běžnými reaktivními pryskyřicemi i termoplasty. Používají se hlavně jako náhrada azbestu v třecích a brzdových obloženích, dále jako výztuž pro pneumatiky aj.

Vyrábějí se v několika druzích, které se od sebe liší svými mechanickými vlastnostmi (Tab. 2). Mohou být ve formě pramenců, přízí, tkanin nebo povrchových rohoží. [1]

Tab. 2: Mechanické vlastnosti vybraných druhů aramidových vláken [1]

Aramid	vysokotažný	s vysokou tuhostí	ultratučný
Hustota [$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$]	1,45	1,45	1,45
Průměr [μm]	12	12	12
Modul pružnosti [MPa]	80 000	131 000	186 000
Mez pevnosti v tahu [MPa]	3 600	3 800	3 400
Tažnost [%]	4,0	2,8	2,0

Jak nám ukazuje tabulka 3, tak aramidové vlákno je silně anizotropní materiál (jeho vlastnosti nejsou v podélném a příčném směru totožné). Mez pevnosti v tahu je výrazně vyšší než mez pevnosti v tlaku ve směru vláken. [1]

Tab. 3: Vlastnosti jednosměrného vyztuženého laminátu aramidovým vláknem (obsah 65 až 70 objem. %) s epoxidovou maticí [1]

Vlastnosti	Ve směru vláken		Kolmo na vlákna	
	Tah	Tlak	Tah	Tlak
Modul pružnosti [MPa]	80 000	80 000	6 500	5 100
Mez pevnosti [MPa]	1 800	230	8	53
Tažnost [%]	2,2	0,5	0,16	1,4
Příčné smrštění	0,3	0,3	0,025	0,02
Součinitel teplotní roztažnosti [K^{-1}]	$-2 \cdot 10^{-6}$		$70 \cdot 10^{-6}$	

Protože aramidová vlákna absorbují vlhkost, je nutné je před použitím vysoušet, jinak by se mohlo stát, že se nám značně sníží pevnost spoje mezi maticí a vláknem nebo i pevnost samotných vláken.

Aramidové kompozity nacházejí využití především jako lehké konstrukce s převážně tahovým zatížením, nikoli však pro konstrukce, které jsou namáhány tlakem či ohybem. [1]

○ *Uhlíková vlákna (CF – Carbon fiber)*

Tato vlákna se vyznačují značně vysokou pevností a tuhostí, ale nízkou tažností. [1]

Vstupní surovina pro výrobu uhlíkových vláken:

- a) *celulóza* – vlákna mají méně dokonalou strukturu, proto se používají nejčastěji jako izolační materiál
- b) *polyakrylonitril (PAN)* – nejčastěji používaná surovina na výrobu uhlíkových vláken, které se pak označují jako standardní vlákna
- c) *smola* – tyto vlákna mají vysoký modul pružnosti a velice dobré elektrické a tepelné vlastnosti, nicméně na trhu zaujímají pouze malý podíl [1]

Uhlíková vlákna mají průměr od 5 do 10 μm a jsou silně anizotropní. Modul pružnosti ve směru vlákna je až 28násobně vyšší než modul pružnosti kolmo na osu vlákna. Jejich modul pružnosti a pevnost se může měnit v širokém rozsahu, jenž je závislý na orientaci uhlíkových vrstev a na výskytu vadných míst ve vláknech. Mají vysokou odolnost proti dlouhodobému dynamickému namáhání. [1]

○ *Přírodní vlákna*

Nejčastěji se používají vlákna rostlinná, jako je konopí, juta, len, bavlna atd. Jejich hlavní výhodou je odolnost proti stárnutí, nízká hustota, snadná likvidace pomocí spalování. Bohužel jejich mechanické vlastnosti závisejí na podmínkách jejich růstu a na působení vlhkosti. [1]

Tab. 4: Porovnání mechanických vlastností přírodních a skelných vláken [1]

Vlastnosti	Sklo	Konopí	Juta	Len
Modul pružnosti [MPa]	75 000	70 000	55 000	30 000
Mez pevnosti v tahu [MPa]	3 500	600	550	750
Tažnost [%]	4,0	1,6	2,0	2,0
Hustota [$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$]	2,54	1,45	$\approx 1,40$	1,48

Na vnější vrstvy sendvičů se nejčastěji používají lamináty vyztužené skelnými nebo uhlíkovými vlákny, pro některé účely také kovové folie. Tato vlákna jsou ve formě tkanin. [10]

Tkanina je zpracovaná vrstva dlouhých vláken, ať už uhlíkových, aramidových, skelných nebo jejich kombinace. Tyto vrstvy jsou spojeny pohromadě buď mechanickým blokováním vláken samotných, nebo sekundárním materiálem, který jim dává dostatečnou integritu. [15]

Mezi hlavní druhy orientace vláken patří:

○ *Jednosměrné tkaniny*

Většina vláken je uložena v jednom směru. Malé množství vláken či jiného materiálu může být uloženo v jiných směrech (max. 10%). Hlavním záměrem sekundárních vláken je udržet primární vlákna v jejich pozici. Sekundární vlákna však mohou mít i různé strukturní vlastnosti.

○ *0°/90° tkaniny*

Používají se pro aplikace, kde je požadován více než jeden druh orientace vláken. Tyto tkaniny se vyrábějí nejčastěji prošitím ale i tkaním.

○ *Víceosé tkaniny*

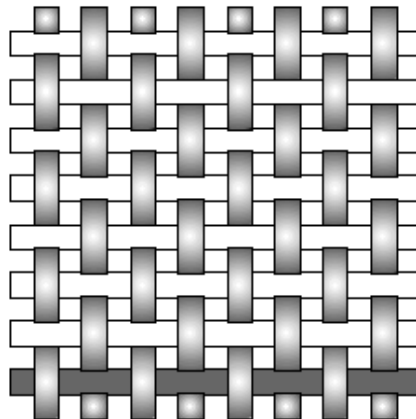
Orientace vláken je pod jinými úhly než 0°/90°.

○ *Ostatní tkaniny*

Vlákna mohou v tkanině tvořit nejčastěji následující osnovy:

○ *Plátnová osnova*

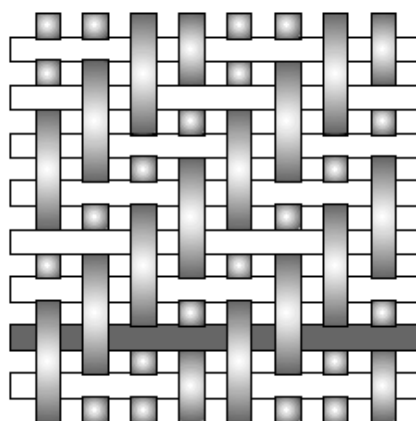
Každé vlákno osnovy prochází střídavě nad a pod útkem vlákna. Tkanina je symetrická, s dobrou stabilitou a přiměřenou pórovitostí. Tento druh osnovy má relativně nízké mechanické vlastnosti ve srovnání s ostatními druhy osnov.



Obr. 2: Plátnová osnova

○ *Keprová osnova*

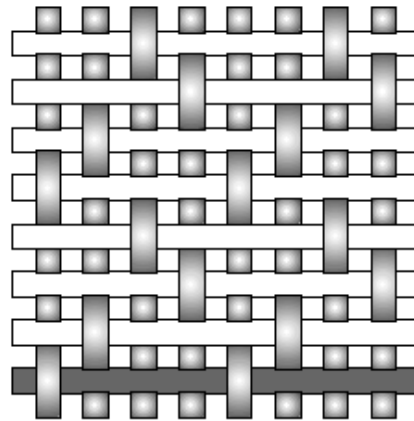
Více vláken osnovy se střídavě splétá nad a pod útky vláken. Tkanina má hladší povrch než v plátnové osnově a i mírně vyšší mechanické vlastnosti.



Obr. 3: Keprová osnova

- *Atlasová osnova*

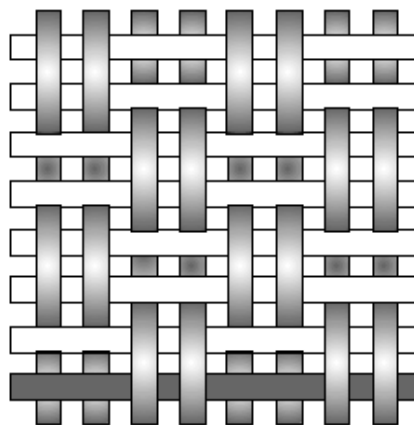
Jeto v podstatě keprová osnova upravená tak, aby měla méně opakování vzoru. Atlasová vazba je velmi plochá, má dobrou nasákavost a vysoký stupeň překrytí. Nicméně jedná se o osnovu, která je méně stabilní a asymetrická.



Obr. 4: Atlasová osnova

- *Košíková osnova*

Je podobná plátnové osnově s tím rozdílem, že dvě nebo více vláken je střídavě prokládaných s dvěma nebo více útky vláken. Uspořádání vláken nemusí být symetrické. Košíková osnova je plošší, ale ještě méně stabilní.



Obr. 5: Košíková osnova [15]

1.1.1.2 *Matrice*

Matrice má za úkol zaručit správný geometrický tvar výrobku a jeho tvarovou stálost, ochránit vlákna před okolními vlivy, přenášet zatěžující síly na vlákna atd. Matrice může být jako termoset (reaktoplast) nebo termoplast. Dnes se nejčastěji používají reaktivní pryskyřice, které jsou ve výchozím stavu většinou v tekutém stavu. [1]

Reaktivní pryskyřice se vytvrzují přidáním tvrdidla (iniciátory, urychlovače, katalyzátory,...) nebo dodáním další energie (záření, teplo,...). Vytvrzování je často spojeno s exotermní reakcí (uvolňování tepla), zvýšením viskozity a smrštění. [1]

Některé typy reaktivních pryskyřic:

- *Nenasycené polyesterové pryskyřice (UP-R)*

Jedná se o bezbarvé, až slabě nažloutlé roztoky v reaktivních rozpouštědlech. Je možné je vytvrzovat za běžné nebo i zvýšené teploty. Dochází zde k objemovému smrštění o 5 až 9%. Vzhledem ke své nízké viskozitě, vysoké rychlosti vytvrzování a nízké ceně jsou tyto pryskyřice jedním z nejčastěji používaných materiálů. Nevýhodou těchto pryskyřic je problém vysoké emise styrenu na životní prostředí. [1]

- *Vinylesterové (VE-R) nebo fenakrylátové (PFA-R) pryskyřice*

Vinylesterové pryskyřice jsou oproti UP-R reaktivnější, houževnatější, odolnější vůči vyšším teplotám, dražší a mají nižší viskozitu. Tyto pryskyřice se používají nejčastěji pro velkorozměrové trouby pro odvod čistého plynu v odsiřovacích zařízeních, chladičích věže, nádrže a chemicky odolné rošty. Největší oblastí použití jsou čistírny odpadních vod. [1]

- *Epoxidové pryskyřice (EP-R)*

Za normálních teplot se jedná o kapalné až pevné látky, které mohou obsahovat přídavné látky (rozpouštědla,...). Je nutné dodržet přesný stechiometrický poměr mísení mezi pryskyřicí a tvrdidlem. Epoxidové pryskyřice mají velmi dobré mechanické a izolační vlastnosti, vysokou rozměrovou stálost a přilnavost. Tyto vlastnosti jsou značně ovlivněny různými typy tvrdidel a přísad. Nejčastěji se používají jako zalévací hmoty pro elektroniku, pro výrobu forem nebo nástrojů, na různé povlaky, zejména pro práškové nanášení. Díky své vysoké kvalitě jsou EP-R využívány také jako matri-

ce pro drahé výztuže (uhlíková vlákna,...). Pro speciální aplikace a přesné zaručení skladby laminátu se používají většinou epoxidové prepregy. [1]

○ *Fenolické pryskyřice (PF-R)*

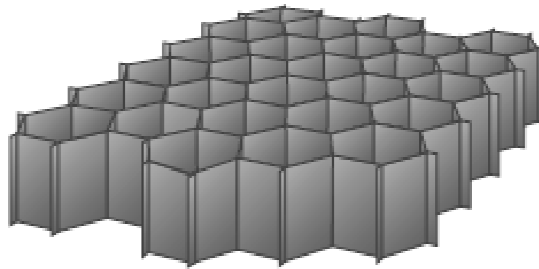
PF-R jsou vysoce tepelně a chemicky odolné a tvarově stálé. Pro konstrukční aplikace musejí být modifikovány z důvodu své křehkosti pro velkorozměrové díly. Podíl těchto pryskyřic ve výrobě je poměrně nízký, protože se při vytvrzování uvolňuje řada těkavých látek. Díky svému příznivému chování při požáru (nízká hořlavost, malá toxicita kouře) a vysoké zbytkové pevnosti se používají pro vnitřní vybavení v dopravních prostředcích. [1]

Termosety jsou za normální teploty nízkoviskozní a proto dobře smáčejí a prosycují vlákna výztuže. Naopak termoplasty jsou za normální teploty pevné látky a do tekutého stavu se dostanou až po zahřátí na teplotu většinou nad 200°C. U termoplastů probíhá tedy pouze roztavení a ztuhnutí matrice, nikoliv chemický proces jako u termosetů, který může ovlivnit jakost výrobku nebo narušovat životní prostředí. Nejčastěji používané termoplasty jsou PS, PVC, PE, PP, PA 6, PA 66, PBT, PC, POM, atd. [1]

1.1.2 Jádra

Mezivrstva sendvičového kompozitu může být např. z voštin, z lehkého dřeva (balsa) nebo z polymerních pěn (PVC, PET, PUR aj.)

Voština je druh materiálu, který má různou velikost, tloušťku a tvar buněk. Mezi nejpoužívanější tvary patří šestihranný (Obr. 6), křížový, kruhový, spirálový nebo například čtvercový. Voština se vyrábí nejčastěji z papíru, termoplastu (PUR, PP, PC,...), hliníku aj.



Obr. 6: Voština (šestihranný tvar) [13]

V následující tabulce 5 můžeme vidět hlavní výhody a nevýhody použitých druhů materiálu ve voštině sendvičového kompozitu. [14, 35]

Tab. 5: Výhody a nevýhody použitých druhů materiálu voštin [14]

Materiál jádra	Výhody	Nevýhody
Sulfátový papír	<i>dobré izolační vlastnosti, nízká cena, k dispozici ve velkém množství</i>	<i>relativně nízká pevnost, velmi citlivý na vlhkost</i>
Polymery (PUR, PP, PC aj.)	<i>dobré izolační vlastnosti, vynikající absorpce energie, dobrá odolnost vůči vlhkosti, relativně nízká cena</i>	<i>náchylné k tečení</i>
Hliník (5052, 5056, 2024, 3003, 3104)	<i>nejlepší poměr mezi pevností a hmotností, vynikající absorpce energie, dobře tepelně vodivý, nejtenčí buněčné stěny, obrobitelný, relativně nízká cena</i>	<i>galvanická koroze s uhlíkovými materiály</i>
Ocel (uhlíková ocel, nerezová ocel)	<i>vysoká pevnost, dobře tepelně vodivá, tepelně odolná</i>	<i>vysoká hmotnost, u některých druhů galvanická koroze</i>
Speciální kovy (titan, slitiny niklu, slitiny kobaltu)	<i>relativně vysoký poměr mezi pevností a hmotností, dobře tepelně vodivé, chemicky odolné, dobrý tepelně vodivý při vysokých teplotách</i>	<i>relativně vysoká hmotnost</i>
Aramidová vlákna	<i>dobrá odolnost proti ohni, dobré izolační vlastnosti, dobrá tvarovatelnost, nízká hmotnost</i>	<i>nízká komprese a smykové vlastnosti, odolnost vůči vlhkosti</i>
Skelná vlákna	<i>dobré dielektrické vlastnosti, dobré izolační vlastnosti, dobrá tvarovatelnost</i>	<i>nejtěžší z vláken</i>
Uhlíková vlákna	<i>dobrá rozměrová stabilita, vynikající vysokoteplotní vlastnosti, velmi vysoká tuhost, nízká teplotní roztažnost, nízká hmotnost</i>	<i>velmi drahé</i>
Keramika	<i>tepelná odolnost při vysokých teplotách, dobré izolační vlastnosti</i>	<i>velmi drahé</i>

1.2 Vlastnosti a použití

Vláknové kompozity se používají hlavně kvůli své značné měrné hmotnosti a velkému měrnému modulu pružnosti, ale také pro svou vysokou odolnost proti korozi, různým chemikáliím nebo UV záření. Nevýhodou kompozitních materiálů s epoxidovou matricí může být citlivost na ředidla. Dále mají sendvičové konstrukce výborné tepelně izolační vlastnosti. Kompozity stárnou v závislosti na teplotě a vlhkost.

Použití je velmi mnohostranné - od trupu lodí, letadel a automobilů, přes konstrukční díly ve stavebnictví k rotorům větrných elektráren. Laminární kompozity se často používají zejména tam, kde je požadována odolnost proti korozi a abrazi. [2, 10]



Obr. 7: Kenworth T2000 [17]

Kenworth T2000 (Obr. 7) je nový koncept dálkových tahačů, které v sobě spojuje nové materiály, technologii a design s nesrovnatelným luxusem. Využívá pokročilé kompozitní materiály s cílem maximalizovat sílu a minimalizovat zbytečnou váhu. Jeho zcela ploché dveře jsou vyrobeny z odolného, lehkého speciálního balsového laminátového sendviče, který izoluje hluk a tepelné ztráty pro pohodlnější jízdu a lepší životní prostředí. [16]

Velmi zajímavou alternativou ke klasickým hliníkovým sendvičovým deskám představují kompozitní sendvičové panely. V tomto materiálu je kombinováno skelné vlákno (karbo-nové vlákno) jako krycí vrstva a lehká voština z plástů jako jádro. Toto složení zajišťuje navíc nízkou hmotnost a možnost lepení do panelu bez použití další vložky. Výrobní technologií lze vyrábět i prostorové tvarované panely například pro letectví (sedadla, boční panely, podlahy, dveře, kryty, vztlakové klapky,...) Na obrázku 8 lze vidět například inte-

riér letounu L-410 a na obrázku 9 řez stolkem letadla, který je vyrobený ze sendvičové konstrukce s hliníkovým voštinovým jádrem. [18, 30, 36]



Obr. 8: Vnitřní vybavení letounu [18]



Obr. 9: Řez stolkem do letadla [30]

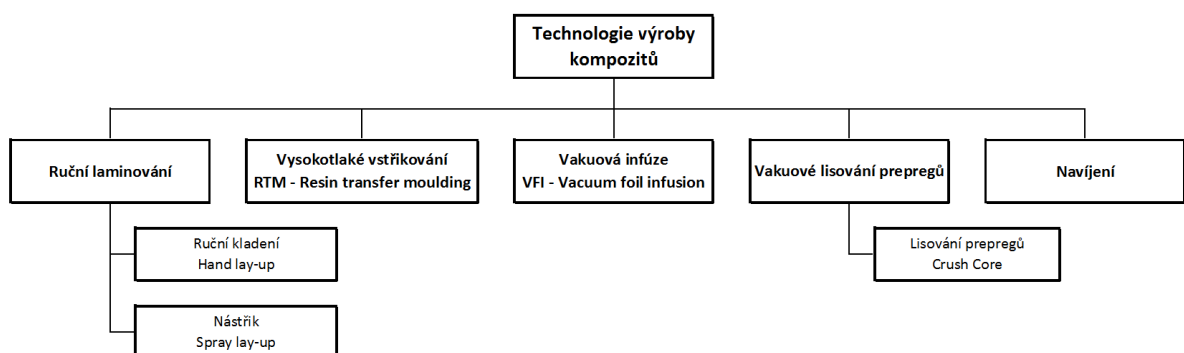
Na obrázku 10 je znázorněn přehled materiálů, které jsou použity na dopravním letounu Boeing B787. Kompozitní materiály zabírají přibližně polovinu všech použitých materiálů. Tento letoun má díky tomu až o 20% nižší spotřebu paliva než letouny podobné třídy.



Obr. 10: Přehled materiálů použitých v konstrukci letadla Boeing B787 [32]

2 TECHNOLOGIE VÝROBY KOMPOZITNÍCH SENDVIČOVÝCH KONSTRUKCÍ

Výrobní technologie spojení nosné části (vlákna) a pojiva (matrice) závisí do značné míry na druhu materiálu matrice. Tyto technologie ve své podstatě zahrnují přípravu pryskyřičných hmot, prosycení vyztužujících vláken, tvarování polotovaru a následné vytvrzení. Po vytvrzení může následovat dodatečné opracování výrobku. Správná volba výrobní technologie nám dokáže do značné míry ovlivnit požadované vlastnosti hotového výrobku. [1, 4]



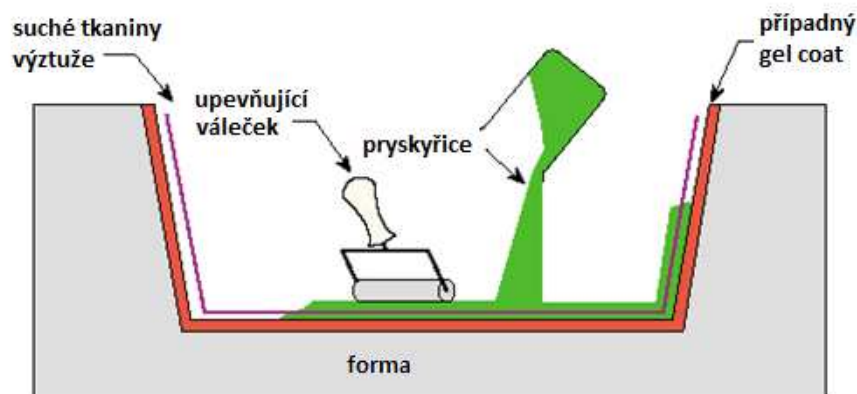
Obr. 11: Rozdělení technologií výroby kompozitů

2.1 Ruční laminování

Ruční laminování je manuální postup výroby, kdy je vlákna impregnována kapalnou matricí přímo ve formě. Matrice může být nanášena buďto štětcem (válečkem,...) nebo stříkačí pistolí. Tvrdivadlo se přidává do pryskyřice těsně před samotnou aplikací. Kvalita povrchu výrobku se odvíjí od povrchu formy. Pouze jedna strana výrobku má kvalitní povrch. Nevýhodou této technologie je poměrná nehomogenita struktury. [4, 9]

2.1.1 Ruční kladení (Hand lay-up)

Nejjednodušší pracovní postup pro malé série, prototypy a složité velkoplošné díly. Výhodou této technologie jsou minimální náklady na nástroje, prakticky neomezená variabilita tvarů a velikostí výrobků. Nevýhodou je velké množství odpadu, které je špatně zpracovatelné. Kvalita zhotoveného dílu závisí na zkušenostech a schopnostech zpracovatele.



Obr. 12: Schéma ručního kladení

Používané materiály:

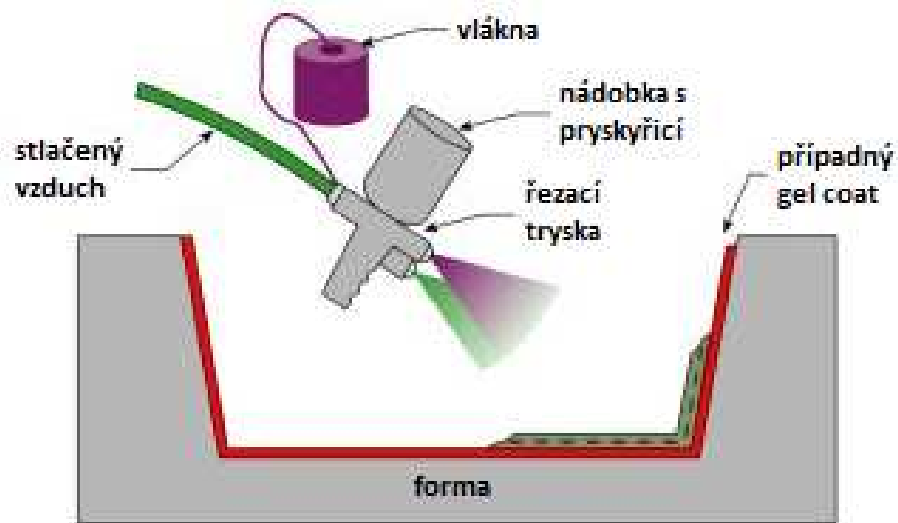
- pryskyřice: libovolné (např. epoxidové, polyesterové, vinylesterové, fenolické)
- tkaniny: libovolné
- jádra: libovolné

Nejčastější používaná technologie na výrobu karosérií dopravních prostředků (autobusy, tramvaje, vlaky,...), skladovacích nádrží, bazénů, krytů přístrojů a zařízení atd. [1, 9, 15]

2.1.2 Nástřík (Spray lay-up)

Vlákna jsou nasekána v ruční pistoli a následně zpracovány sprškou pryskyřice na formu. Takto nanosená hmota vytvrzuje za standardních atmosférických podmínek.

Bohužel takto vyrobené lamináty jsou relativně těžké oproti ostatním technologiím díky velkému obsahu pryskyřice.



Obr. 13: Schéma nástříku vláken s pryskyřicí [19]

Používané materiály:

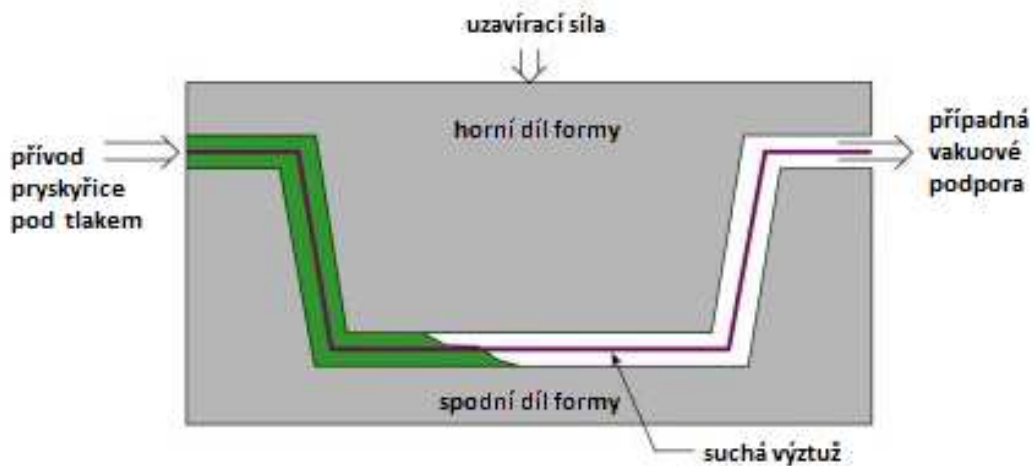
- *pryskyřice:* nejčastěji polyesterové
- *vlákna:* pouze skelné vlákna
- *jádra:* jádra se přidávají dodatečně

Tato technologie se používá například na sprchové a jiné vany, lehce zatěžované konstrukční panely, malé čluny, aj. [3, 15, 19]

2.2 Vysokotlaké vstřikování (RTM – Resin transfer moulding)

Jde o výrobní proces, při kterém se používají tekutá pryskyřice na impregnaci tkanin. Během procesu RTM je tkanina umístěna do dutiny formy, následně je forma uzavřena a pryskyřice je vstříknuta do dutiny pod tlakem. Pryskyřice vytvrzuje při standardních atmosférických podmínkách nebo je dutina formy vyhřívána na teplotu 40°C – 60°C.

Forma bývá často ve vakuu, aby se odstranil veškerý vzduch. Pomocí vakua se urychluje i samotný proces. Technologie s využitím vakua se nazývá VARI – Vacuum assisted resin infusion.



Obr. 14: Schéma RTM/VARI [15]

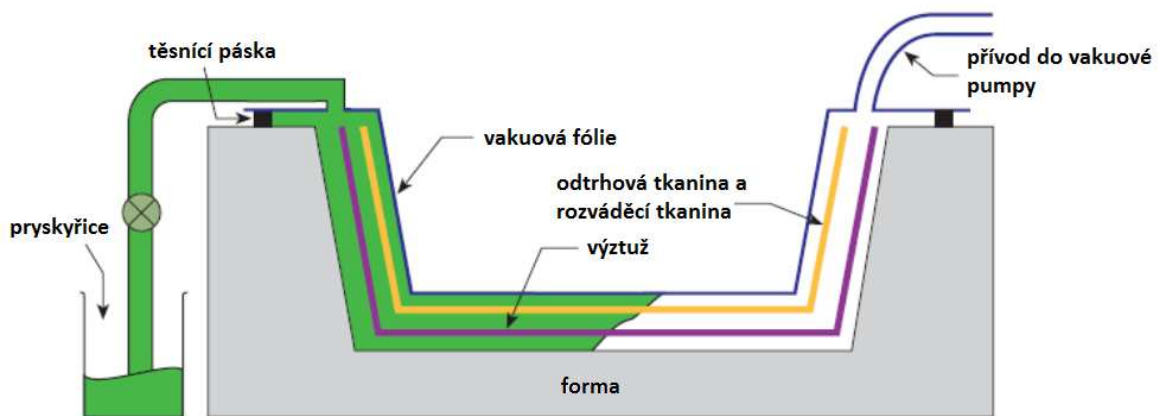
Používané materiály:

- *pryskyřice:* libovolné (např. epoxidové, polyesterové, vinylesterové, fenolické)
- *tkaniny:* libovolné
- *jádra:* libovolné, kromě voštin, kde by došlo k zaplnění buněk pryskyřicí a dále kromě některých druhů pěn, které by nevydržely pracovní tlak ve formě

Využití najdeme například ve výrobě automobilových, leteckých nebo železničních komponentů. [15, 20]

2.3 Vakuová infúze (VFI – Vacuum foil infusion)

Vyztužující tkaniny jsou rozloženy ve formě podobně, jako v technologii RTM. Na tyto tkaniny je položena rozváděcí a odtrhová tkanina. Celá sestava je ve vakuovém pytli, nebo je zakryta vakuovou fólií, která je k formě přilepena pomocí těsnící pásky, která brání přístupu vzduchu. Po vytvoření vakua začne proudit pryskyřice pomocí čerpadla a vakuové pumpy do formy.



Obr. 15: Schéma vakuové infúze [15]

Používané materiály:

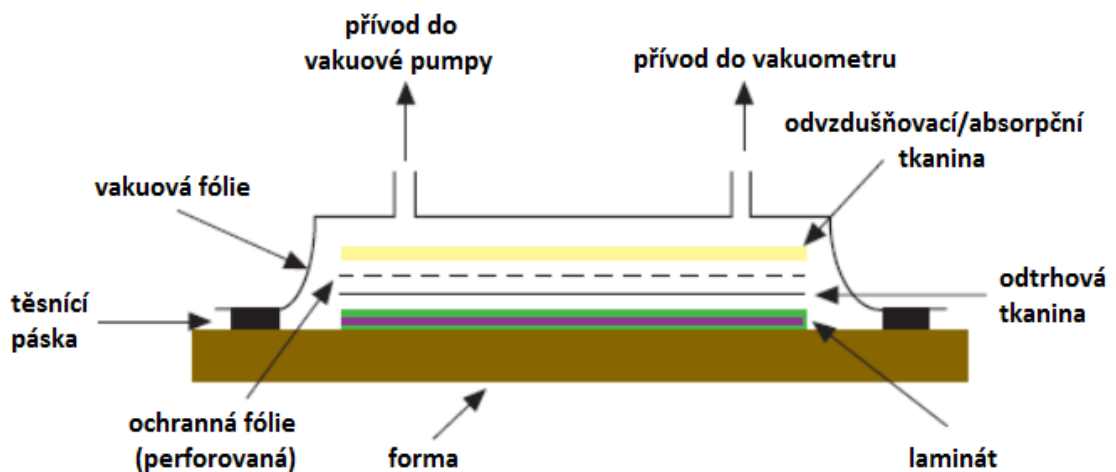
- *pryskyřice:* libovolné (např. epoxidové, polyesterové, vinylesterové)
- *tkaniny:* libovolné
- *jádra:* libovolné, kromě voštin, kde by došlo k zaplnění buněk pryskyřicí

Vakuová infúze je vhodná na výrobu malých jachet, vlakových panelů, či lopatek větrných elektráren. [15]

2.4 Vakuové lisování prepregů

V případě vakuového lisování prepregů se využívá předimpregnovaných materiálů tekutou matricí včetně tvrdidla, takže může dojít už i k částečné polymeraci. Prepregy se uchovávají zmražené, aby se prodloužila jejich trvanlivost.

Tyto prepregy se kladou do dutiny formy nejčastěji ve více vrstvách. Naskládané předimpregnované výztuže se postupně pokrývají dalšími technologickými materiály (odtrhová tkanina, odvzdušňovací tkanina, absorpční tkanina a vakuová fólie). Takto připravená forma s materiály se pomocí vakua slisuje a přemísť do vyhřívané pece nebo do autoklávu. V autoklávu dosáhneme i zvýšení tlaku (5 atm). Prepregy při zvýšené teplotě zcela vytvrdnou a zajistí nám tak konečný tvar výrobku.



Obr. 16: Schéma vakuového lisování prepregů [15]

Používané materiály:

- *pryskyřice:* nejčastěji epoxidové a fenolické
- *tkaniny:* libovolné
- *jádra:* libovolné, které odolají pracovnímu tlaku

Upotřebení najde tato technologie převážně na výrobu částí interiéru v leteckém průmyslu nebo u závodních automobilových dílů. [15]

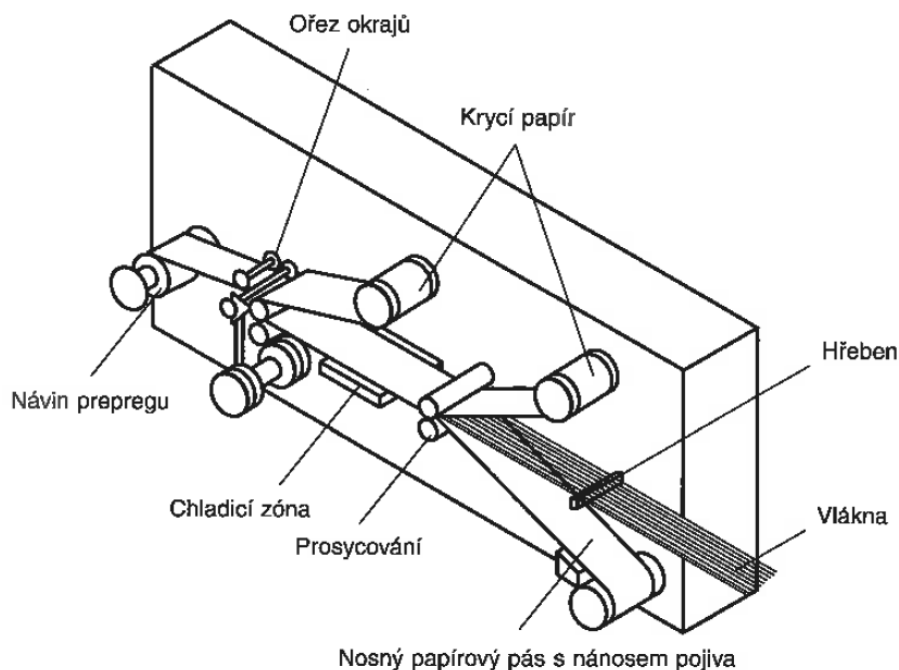
2.4.1 Lisování prepregů – Crush Core

Lisování sendvičových kompozitů technologií Crush Core je mnohem rychlejší a ekonomičtější. Kompozit je umístěn za běžných atmosférických podmínek v lisu, kde za působení teploty a tlaku lisu dojde k stlačení na předem stanovenou tloušťku, která je zajištěna pomocí distančních vložek. U této technologie je zaručena konstantní tloušťka v celém průřezu desky a dobrá povrchová úprava. [11]

2.4.2 Výroba prepregů

Využití prepregů je výhodnější z toho důvodu, že je oddělen složitý proces prosycování výztuže pojivem od další technologie zpracování. Výroba prepregů se provádí na speciálních zařízeních, kde jsou přesně stanoveny a kontrolovány technologické podmínky výroby.

Na obrázku 17 je schéma výroby jednosměrně vyztuženého prepregu. Z cívky se odvíjejí pramence vláken, která se vedou do stavitelného hřebenu, kde jsou rovnoběžně vyrovnány. Tyto vlákna se dále ukládají na nosný papírový pás se silikonovou vrstvou a nánosem pryskyřice. Pás je veden na válec kalandru, kde dochází tlakem k prosycení výztuže pojivem. Následuje chladicí zóna, kde dojde k zastavení vytvrzovací reakce. Nakonec dojde k ořezání okrajů a návinu prepregu.

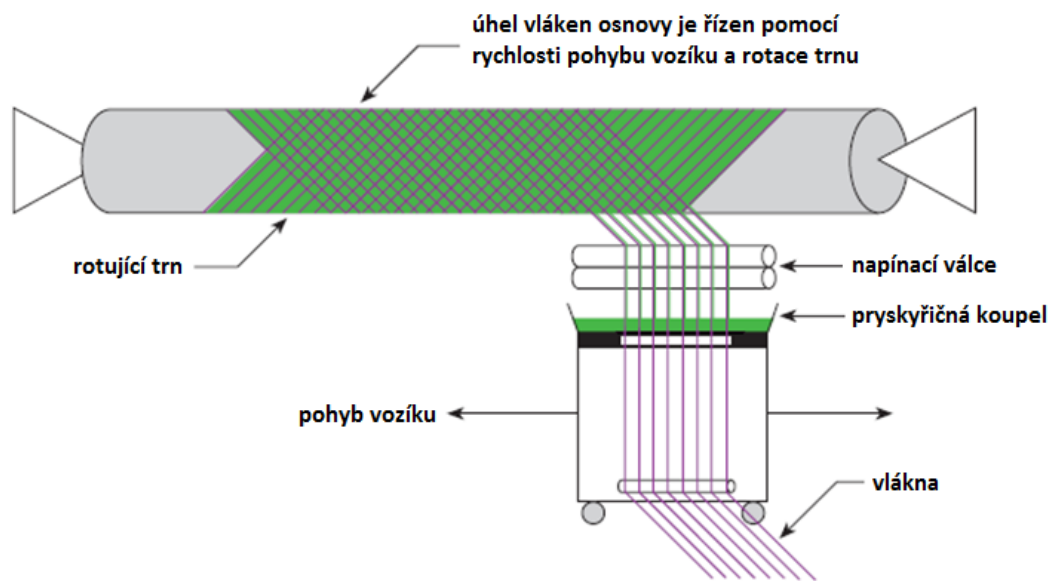


Obr. 17: Výroba jednosměrně orientovaného prepregu[1]

Výroba tkaninového prepregu je obdobná. Tkanina je vedena přes roztok pryskyřice, kde dojde k jejímu prosycení. Následuje uložení na nosný a krycí papír. Další postup výroby je shodný s výrobou jednosměrně orientovaného prepregu. [1, 27, 35]

2.5 Navíjení

Výztuž, která je ve formě nekonečného vlákna, je vedena přes pryskyřičnou koupel a následně je navíjena v různých směrech pomocí podávacího mechanismu na rotující trn (v případě výroby trubek), nebo jiný tvar většinou válcovitěho charakteru. Pryskyřice vytvrzuje při zvýšené teplotě, která je dosažena ohřevem trnu externím vyhřívacím zařízením.



Obr. 18: Schéma navíjení [15]

Používané materiály:

- *pryskyřice*: libovolné (např. epoxidové, polyesterové, vinylesterové, fenolické)
- *tkaniny*: libovolné
- *jádra*: libovolné

Technologie vhodná především pro výrobu trubek a speciálních nádob. [15]

3 ÚNAVA MATERIÁLU

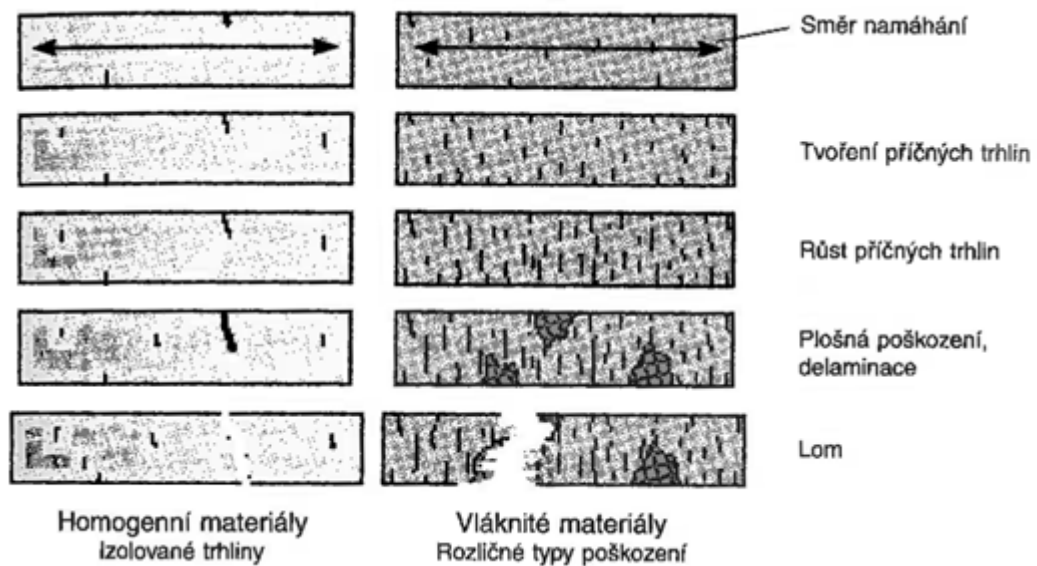
Jedná se o proces, kdy se mění strukturní stavy a vlastnosti vyvolané kmitavým (cyklickým) zatěžováním, kde nejvyšší napětí je menší než pevnosti R_m a většinou i menší než mez kluzu R_e . Z tohoto důvodu dochází k hromadění poškození v materiálu, které se nakonec projeví růstem makroskopických trhlin a únavovým lomem. Únava materiálu nám nepříznivě ovlivňuje trvanlivost konstrukce a v mnoha případech může vést i k nebezpečným haváriím. [21, 22]

Únavu můžeme rozdělit do dvou hlavních kategorií:

1. Součásti bez trhlin (mohou obsahovat vrub) – probíhá stádium iniciace trhlin
 - a) vysokocyklová únava – měkké zatěžování
 - popisuje ji např. Wöhlerova křivka
 - počet cyklů do lomu $> 10^4$
 - b) nízkocyklová únava – tvrdé zatěžování
 - popisuje ji např. Mansonova-Coffinova křivka
 - počet cyklů do lomu $< 10^4$
2. Součásti s trhlínami – šíření únavových trhlin
 - popisuje ho Parisův zákon
 - trhlina již existuje [22]

3.1 Poškození kompozitních materiálů při dynamickém zatížení

Při dynamickém zatížení u kompozitů vyztužených vlákny vznikají různé typy poruch ve velkém objemu materiálu. Během únavy kompozitních materiálů poškození začíná nejprve oddělováním vláken od matrice (ztráta adheze). Ke vzniku trhlin vedou velké koncentrace přetvoření a vysoké napětí v místě styku vláken a matrice. Trhlina se poté šíří obvykle mezi vlákny, především podél styku vlákna s matricí. [1, 25]



Obr. 19: Průběh poškození u homogenních a vláknitých materiálů [1]

V příčné vrstvě mohou trhliny vzniknout již během prvního cyklu zatěžování, kdy působící napětí je vyšší než místní pevnost vrstvy, což může být při napětí dosahující pouze 20% pevnosti v závislosti na uspořádání laminátu. Se zvyšujícím se počtem cyklů nebo se zvýšením zatížení roste počet trhlin v příčné vrstvě. Tyto trhliny přecházejí přes celou šířku vrstvy, ale nemohou se rozšiřovat do sousedních vrstev. Vrchol trhliny vyvolává před sebou koncentraci dalších napětí, které vedou k počátku tvorby delaminačních trhlin podél styku vrstev. S počtem cyklů roste počet delaminačních trhlin a tyto trhliny se dále rozšiřují. Zároveň se také začnou přetrhávat vlákna v podélných vrstvách a dochází ke ztrátě soudržnosti (oddělování vláken od matrice) a ke vzniku trhlin v podélných vrstvách. Trhliny v podélné vrstvě nemají určitý směr, na rozdíl od trhlin v příčných vrstvách, které jsou nejčastěji kolmé na směr zatížení.

Ke konečnému porušení dojde, pokud je kompozit dostatečně zeslaben trhlínami v podélných vrstvách a delaminačními trhlínami. Trhliny ve vrstvách s podélnými vlákny zeslabují ty části kompozitu, které přenášejí největší část zatížení, a existence delaminačních trhlin brání rozložení zatížení mezi další vrstvy. Nejslabší z podélných vrstev se přeruší a následně způsobí porušení zbývajících podélných vrstev.

Tvorba vnitřních trhlin vede ke snížení tuhosti a pevnosti kompozitů. Zbytková pevnost a tuhost se snižuje s rostoucí hustotou trhlin. [25]

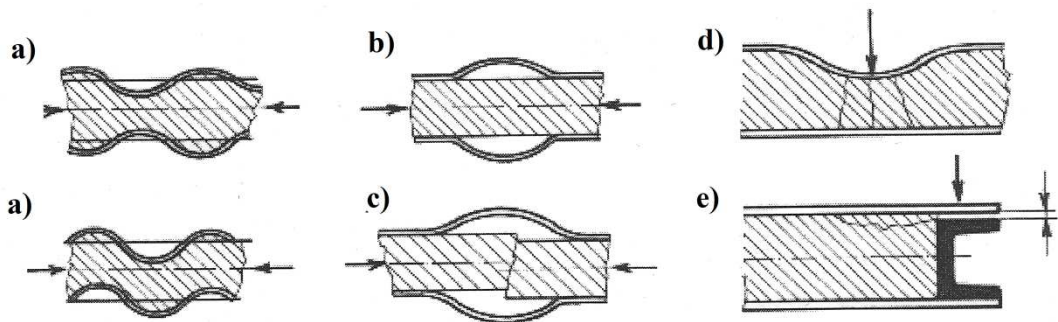
Mohou tedy nastat různé typy poškození, které se dělí do těchto skupin:

- porušení soudržnosti vlákna a matrice
- trhliny v matrici
- lom vlákna
- porušení soudržnosti mezi jednotlivými vrstvami (u vrstvených materiálů při postupujícím procesu únavy)

Posloupnost jednotlivých typů poškození závisí na vlastnostech jednotlivých složek kompozitu a na druhu a směru působícího napětí (tlak, tah, smyk). [1]

Na obrázku 20 jsou některé další typy poškození, které mohou nastat u sendvičových konstrukcí, plynou ze spojení vnější vrstvy a jádra:

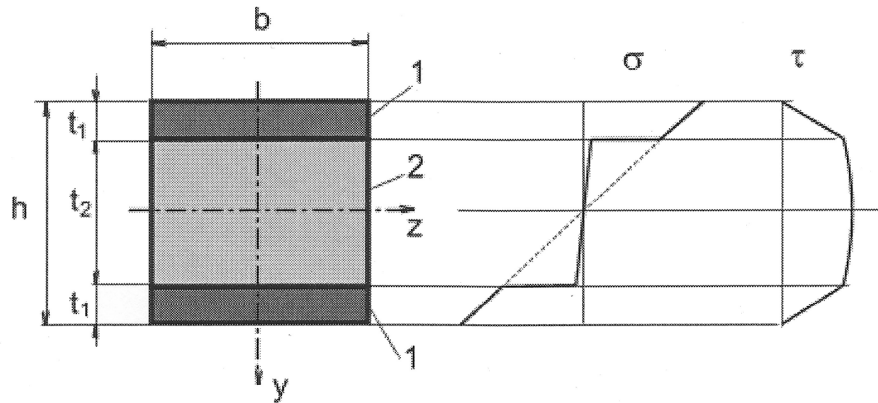
- a) ztráta stability
- b) separace
- c) separace s následným porušením jádra
- d) místní zatížení
- e) nevhodné tolerance vložených prvků



Obr. 20: Typy poškození u sendvičových konstrukcí [23]

3.2 Mechanické chování sendvičových struktur

Na obrázku 21 je mezi dvě vnější vrstvy 1 vloženo lehčené jádro 2. Oblast kolem neutrální plochy je namáhána nepatrně oproti oblasti v krajních vláknech průřezu.



Obr. 21: Průběh napětí v sendvičové struktuře [23]

Průběh a velikost ohybového napětí:

$$\sigma_i(y) = E_i \cdot \frac{1}{r} \cdot y = \frac{E_i}{E_1} \cdot \frac{M}{J_R} \cdot y \quad (1)$$

kde křivost je:

$$\frac{1}{r} = \frac{M}{E_1 \cdot J_R} \quad (2)$$

a kvadratický moment redukovaného průřezu složeného prutu je:

$$J_R = J_1 + \frac{E_2}{E_1} \cdot J_2 + \frac{E_3}{E_1} \cdot J_3 + \dots + \frac{E_n}{E_1} \cdot J_n \quad (3)$$

Ohybová tuhost:

$$K_0 = E_1 \sum_{i=1}^n \frac{E_i}{E_1} \cdot J_i = E_1 \cdot \frac{b \cdot h^3}{12} \left[1 - \frac{E_1 - E_2}{E_1} \cdot \left(1 - 2 \cdot \frac{t_1}{h} \right)^3 \right] \quad (4)$$

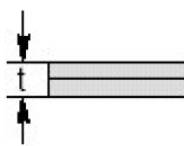
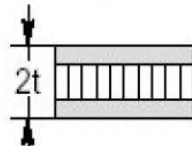
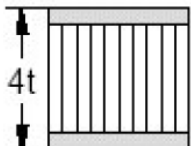
pro $E_1 \gg E_2$ a $t_1 \ll t_2$ je pak ohybová tuhost zjednodušena:

$$K_0 = E_1 \cdot \frac{b \cdot h^2 \cdot t_1}{2} \quad (5)$$

[23]

Z následující tabulky 6 je vidět, jak se mění tuhost a pevnost v ohybu u sendvičových konstrukcí. Všimněme si až třicetisedminásobného zvýšení tuhosti a zhruba devítinásobného zvýšení pevnosti v ohybu u sendvičového materiálu, který má přibližně stejnou hmotnost jako homogenní materiál, ale je čtyřikrát silnější. Pokud tedy nepotřebujeme výrazně šetřit místem, tak jsou sendvičové konstrukce ideální náhradou. [28]

Tab. 6: Porovnání tuhosti a pevnosti v ohybu homogenních a sendvičových materiálů

Materiál	Homogenní materiál	Síla jádra - t	Síla jádra - $3t$
Schéma			
Tuhost	1,0	7,0	37,0
Pevnost v ohybu	1,0	3,5	9,2
Hmotnost	1,0	1,03	1,06

4 MECHANICKÉ ZKOUŠKY

Rozvoj výroby kompozitních materiálů a jejich další použití vedl ke vzniku značnému množství zkušebních metod, které většinou odrážejí specifika v dané oblasti. Protože jsou s kompozitními materiály poměrně krátkodobé zkušenosti, tak jsou některé metody zkoušení zcela nové a například u kovů nebo jiných tradičních materiálů se nepoužívají.

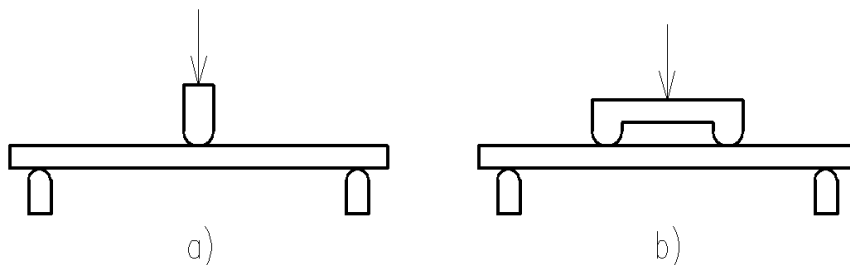
Pokud chceme získat relevantní data pro další konstrukční výpočty, tak je třeba provádět zkoušky při přesně definovaných zatíženích a přesných a čistých napěťových poměrech ve zkušebním tělese. Základním předpokladem správné funkčnosti kompozitů je rovnoměrné zatížení výztuže, kde by nemělo docházet k lokálnímu hromadění defektů a poruch v místě, kde by bylo nerovnoměrného zatížení. [9]

4.1 Statické zkoušky

Statické zkoušky znázorňují chování materiálu při působení klidných spojitých vnějších sil. Nejčastěji se provádějí za normální teploty, méně za zvýšené nebo snížené teploty.

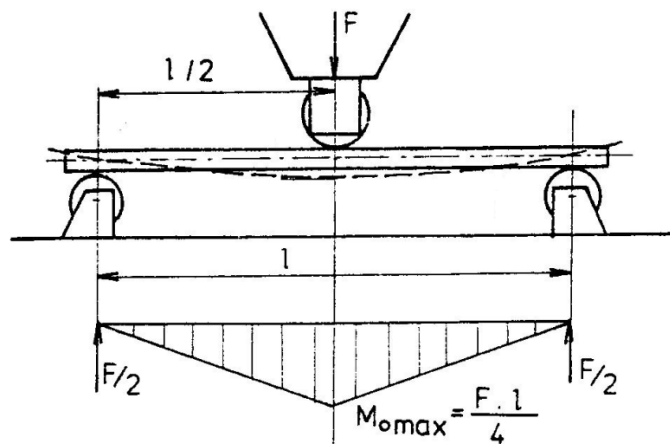
4.1.1 Zkouška jednoosým ohybem

Nejběžnějším typem jednoosé ohybové zkoušky jsou tříbodový a čtyřbodový ohyb, které jsou znázorněny na obrázku 22. Plochý vzorek se podepře na obou koncích a následně zatíží v místě středu vzorku (tříbodový ohyb), nebo ve dvou symetricky rozložených místech (čtyřbodový ohyb).



Obr. 22: Zkouška jednoosým ohybem – a) tříbodový, b) čtyřbodový

V případě zatížení ve středu nosníku je vyvolán ohybový moment, který se lineárně mění od nuly u podpor k maximální hodnotě uprostřed. Současně vzniká po celé délce vzorku rovnoměrné interlaminární smykové napětí, které může způsobit předčasné porušení kompozitů vlivem nízké interlaminární smykové pevnosti. Při čtyřbodovém ohybu je vyvolán ohybový moment rostoucí od nuly u podpor k maximální hodnotě pod zatěžujícím břemenem. Mezi břemeny je ohybový moment konstantní. U čtyřbodového ohybu nevzniká interlaminární smykové napětí mezi břemeny a tato část nosníku je tedy namáhána pouze čistým ohybem. Smykové napětí vzniká pouze v místě mezi břemenem a podporami. Z tohoto hlediska je tedy čtyřbodová ohybová zkouška vhodnější, ale třibodová ohybová zkouška je lépe proveditelná (obrázek 23). [25]



Obr. 23: Zatěžování při třibodovém ohybu [12]

Ohybové napětí je teoretická hodnota napětí na povrchu vzorku při porušení. Její výpočet vychází z největšího ohybového momentu a z předpokladu, že jde o přímkový pracovní diagram až do lomu vzorku. Pro vzorek obdélníkového průřezu je dána vztahem:

$$\sigma_o = \frac{M_o}{W_o} = \frac{6 \cdot M_o}{b \cdot h^2} \quad (6)$$

kde

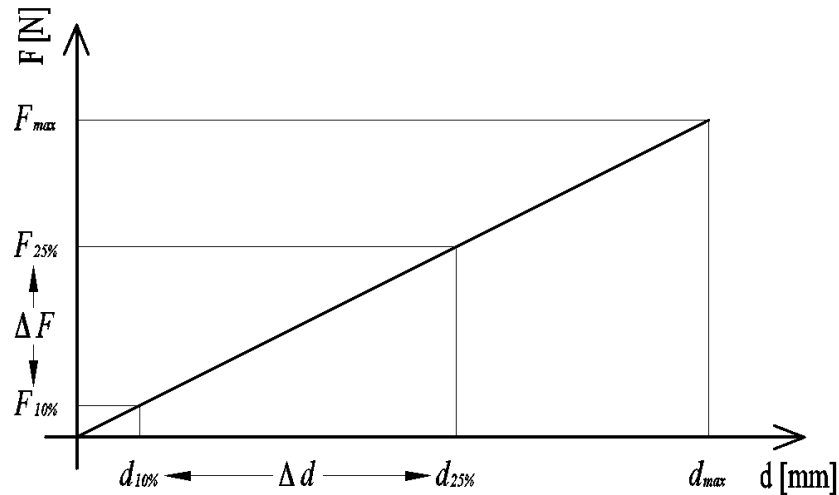
σ_o – ohybové napětí [MPa]

M_o – ohybový moment při porušení [Nmm]

b – šířka vzorku [mm]

h – výška (tloušťka) vzorku [mm]

Modul v ohybu neboli směrnice tečny křivky napětí/deformace se vypočte z počáteční přímé části křivky závislosti – působící síla/průhyb. Pokud tato část není lineární, tak se proloží přímka mezi 10 % a 25 % maximální hodnoty působící síly (obrázek 24).



Obr. 24: Křivka závislosti – působící síla/průhyb [29]

$$E_o = \frac{L^3 \cdot \Delta F}{4 \cdot b \cdot h^3 \cdot \Delta d}$$

(7)

kde

E_o – ohybový modul [MPa]

L – vzdálenost mezi podpěrami [mm]

b – šířka vzorku [mm]

h – výška (tloušťka) vzorku [mm]

ΔF – zvolený rozdíl hodnot působící síly [N]

Δd – rozdíl hodnot průhybu dle zvoleného rozdílu působící síly ΔF [mm]

[25, 29]

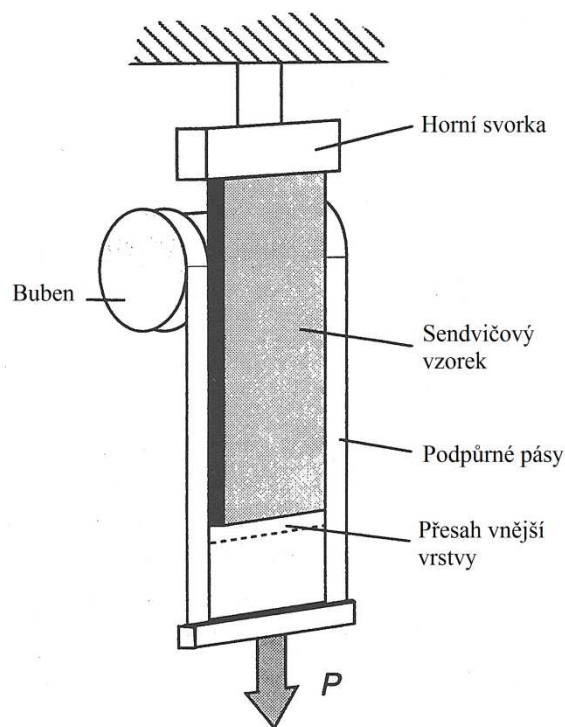
4.1.2 Peel testy

Tyto zkušební testy jsou určeny pro stanovení odolnosti proti odlupování lepených spojů mezi vnějšími vrstvami a jádrem sendvičových konstrukcí, kdy testování probíhá v rámci stanovených zkušebních podmínek. Existuje celá řada modifikací peel testů. Mezi nejrozšířenější patří:

- *Peel test pomocí navíjení na buben*

Tato metoda je nejčastěji používaná pro sendvičové konstrukce, kdy jsou vnější vrstvy poměrně tenké.

Při provádění tohoto testu (obrázek 25) je plocha na dolním konci vzorku bezpečně upnuta na buben a druhý konec je připevněn na pohyblivou hlavu zkušebního stroje.



Obr. 25: Peel test pomocí navíjení na buben

Zkušební vzorky pro tento test mají některé doporučené rozměry, jako je šířka 76 mm, délka nejméně 305 mm a asi 25 mm přesah jedné vnější vrstvy na každé straně zkušebního vzorku. Tloušťka jádra nemá na výsledky zkoušky žádný vliv, ale nesmí se stát, že se vzorek bude během zkoušky ohýbat.

Vzorek je zatěžován tahem konstantní rychlostí a sleduje se odolnost proti odlupování přes délku nejméně 150 mm .

Některé přístroje v průběhu zkoušky vykreslují závislost zatížení na pohybu pohyblivé hlavy nebo závislost zatížení na odlupované vzdálenosti.

Průměrná síla potřebná na odlup se pak vypočte ze vztahu:

$$T_o = \frac{(r_o - r_i)(F_p - F_o)}{W} \quad (8)$$

kde

r_o – poloměr příruby a jedné poloviny tloušťky vnější vrstvy [mm]

r_i – poloměr bubnu a jedna polovina tloušťky vnější vrstvy [mm]

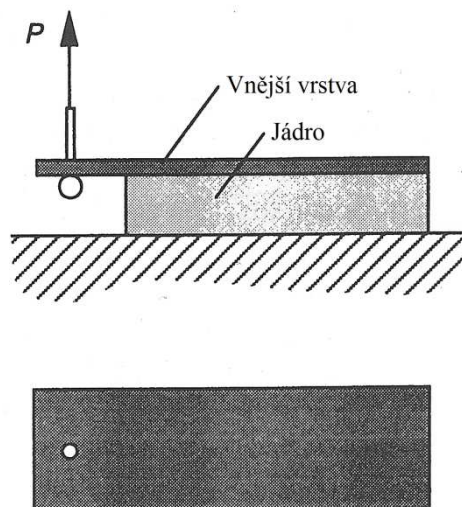
$F_p - F_o$ – průměrné zatížení [N]

F_o – zatížení nutné k překonání kroutícího momentu bubnu [N]

W – šířka vzorku [mm]

o DCB peel test

Zkušební sestava je schematicky znázorněna na obrázku 26. Zkoumaný vzorek je pevně upnut ke stolu zkušebního přístroje. Tento vzorek má na jedné straně přesah jedné vnější vrstvy, na kterou působí zatěžující síla P .

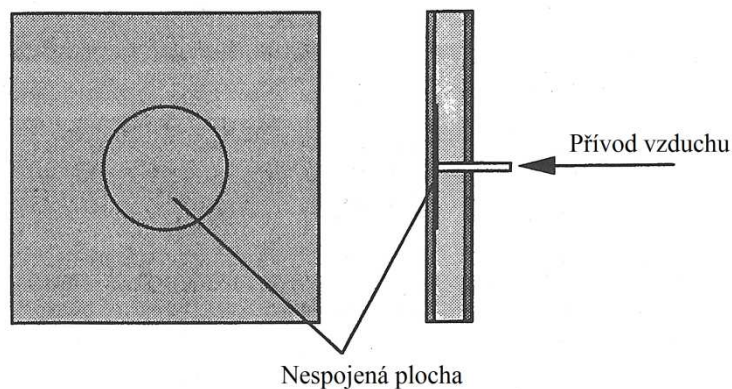


Obr. 26: DCB peel test

Tloušťka jádra sendvičové konstrukce zde není důležitá. V průběhu zkoušky nesmí dojít k ohybu vzorku. Proto je většinou vzorek spojen s tuhým plechem, který tomuto ohybu zabraňuje.

○ *Peel test pomocí tlaku vzduchu*

Tato zkušební metoda se používá k zjištění chování sendvičové konstrukce, kdy se rychle oddělí vnější vrstva od jádra. Zkušební sestava je schematicky znázorněna na obrázku 27.



Obr. 27: Peel test pomocí tlaku vzduchu

Tlak vzduchu působí přes trubici zabudovanou ve vzorku na počáteční kruhovou delaminaci ve středu sendvičové desky. Tato delaminace je vytvořena pomocí teflonového filmu, který je umístěn na jádra při výrobě desky. Tlak vzduchu je řízen redukčním ventilem.

Zjišťujeme kritickou hodnotu tlaku, kdy dojde k odlupu vnější vrstvy. [31]

4.2 Dynamické únavové zkoušky

Jde o proces změn stavu a vlastností materiálu, který je vyvolaný kmitavým zatěžováním. Tyto zkoušky vedou zpravidla ke snížení pevnosti, k výskytu trhlin a k porušení materiálu. Zkoušky slouží ke stanovení základních únavových charakteristik, jako jsou únavová křivka, mez únavy a časová mez únavy. [29]

Rozdělení typů únavových zkoušek:

- zkoušky v nízkocyklové oblasti
- zkoušky ve vysokocyklové oblasti
- zkoušky v gigacyklové oblasti
- stanovení rychlosti šíření únavových trhlin
- analýza únavových lomů [27]

4.2.1 Základní charakteristiky cyklického zatěžování

Součásti mohou být vystaveny zcela náhodnému průběhu zatížení. V laboratorních podmínkách se snažíme o zjednodušení tohoto průběhu zatížení, protože je velmi náročné namodelovat přesný proces zatížení. Nejčastěji nahrazujeme tento proces sinusovým průběhem zatížení, případně souborem zátěžných bloků sinusového zatížení o různé hodnotě amplitudy u strojů, které jsou vybaveny počítačem. [22]

Typy zátěžného cyklu (obrázek 28):

- střídavý
 - souměrný (symetrický) $\sigma_m = \sigma_a$ (8)
 - nesouměrný $|\sigma_m| \neq 0$ (9)
- pulzující
 - míjivý $\sigma_m = \sigma_a$ (10)
 - pulzující $|\sigma_m| > \sigma_a$ (11)

kde:

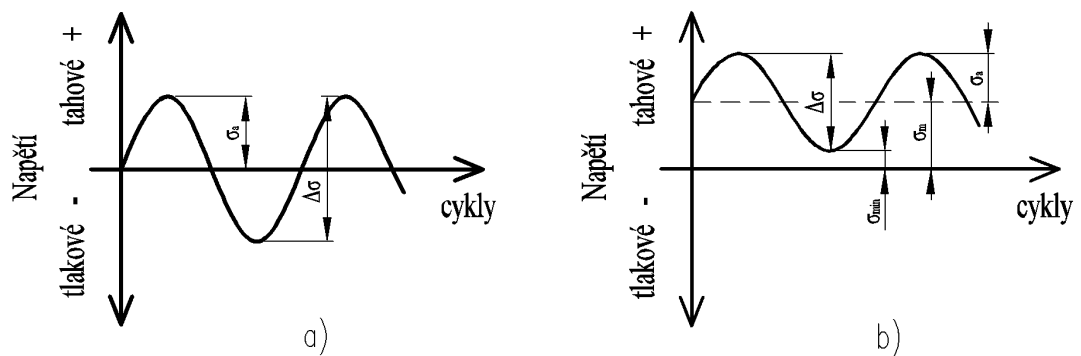
σ_m – střední napětí

σ_{\max} – maximální napětí

σ_{\min} – minimální napětí

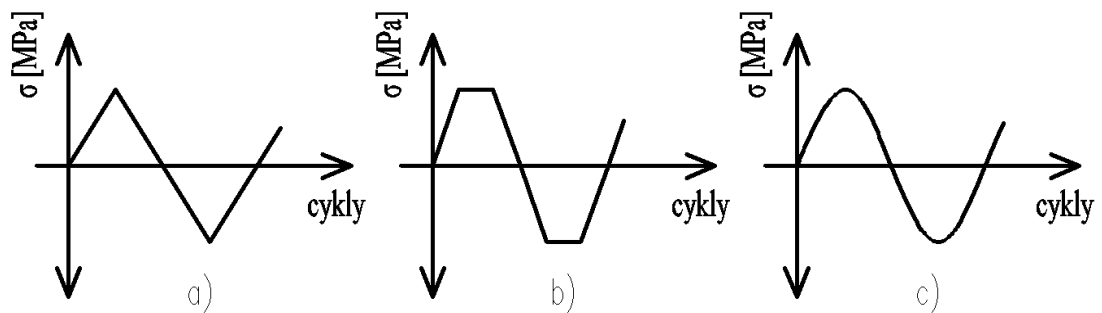
σ_a – amplituda napětí

$\Delta\sigma$ – rozkmit napětí



Obr. 28: Zátěžný cyklus: a) střídavý souměrný, b) pulzující [26]

Zatěžující cykly nemusí mít pouze sinusový charakter, ale mohou mít i tvary dle následujícího obrázku 29 – a) trojúhelníkový, b) obdélníkový, c) sinusový.



Obr. 29: Příklady zátěžných cyklů [22]

Cyklický zátěžný cyklus, který má sinusový průběh, mění své zatížení periodicky od minima po maximum.

Základní charakteristiky zatěžovacího cyklu:

- doba kmitu T – doba, za kterou se opakuje stejný průběh napětí
- frekvence f – počet změn za jednotku času:

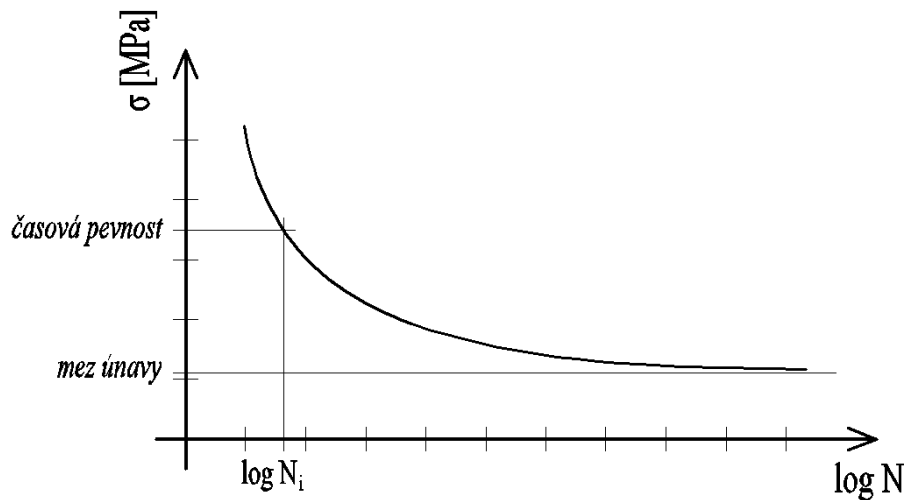
$$f = \frac{1}{T}$$

(12)

4.2.2 Křivka životnosti

Výsledkem únavových zkoušek je obvykle závislost působícího zatížení na počtu cyklů do porušení zkušebního tělesa. Tato křivka slouží k určení zatěžujícího napětí σ pro daný počet cyklů N eventuálně naopak. Na ose y je nejčastěji amplituda napětí nebo maximální napětí v jednom cyklu a na ose x je počet cyklů do porušení v logaritmickém měřítku. Křivky životnosti mají pro všechny materiály negativní sklon. To znamená, že se snižováním zatěžujícího napětí roste počet cyklů do porušení. Tvar těchto křivek se liší dle druhu materiálu.

Na následujícím obrázku 30 je zobrazen příklad křivky životnosti, kde je označena *časová pevnost*, která udává pevnost při daném počtu cyklů N_i . Dále *mez únavy* neboli trvalá pevnost, což je nejvyšší napětí, které materiál vydrží při nekonečném počtu cyklů, aniž by došlo k jeho porušení. [25]



Obr. 30: Křivka životnosti

4.2.3 Stroje pro dynamické únavové zkoušky

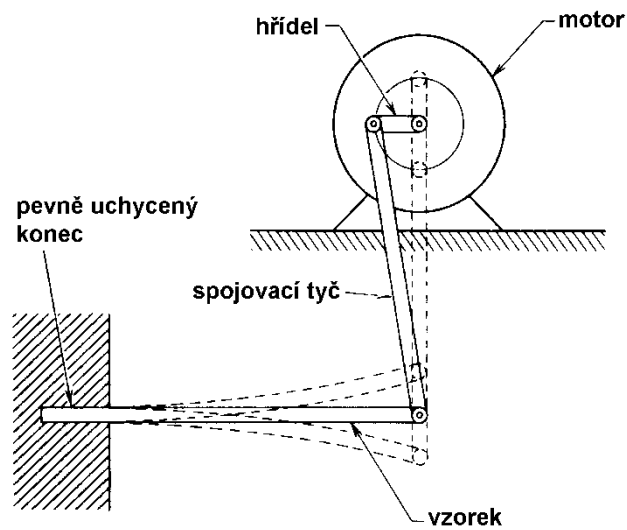
Zkušební stroje pro únavové zkoušky lze klasifikovat podle:

- a) způsobu zatěžování
 - konstantní amplitudou napětí
 - konstantní amplitudou celkové deformace
- b) druhu zatěžování
 - ohyb za rotace
 - tah – tlak
 - krut
 - plochý ohyb
 - kombinované namáhání
- c) způsobu vyvolání zatížení
 - mechanicky – závažím, pružinou nebo rotací nevyvážených hmot
 - hydraulicky
 - elektromagneticky
- d) frekvence zatěžování
 - běžné stroje (0,1 – 10 Hz)
 - vysokofrekvenční pulzátory (100 Hz – 100 kHz)
- e) charakteru změn zatížení
 - periodické – sinusový nebo pilový průběh
 - náhodné zatěžování řízené počítačem
- f) tvaru vzorků
 - laboratorní vzorky
 - konstrukční části

Zkušební stroje musí splňovat několik hlavních podmínek:

- pevné a stabilní uchycení zkušební vzorku
- zaručit deformaci pouze vzorku, nikoliv rámu stroje

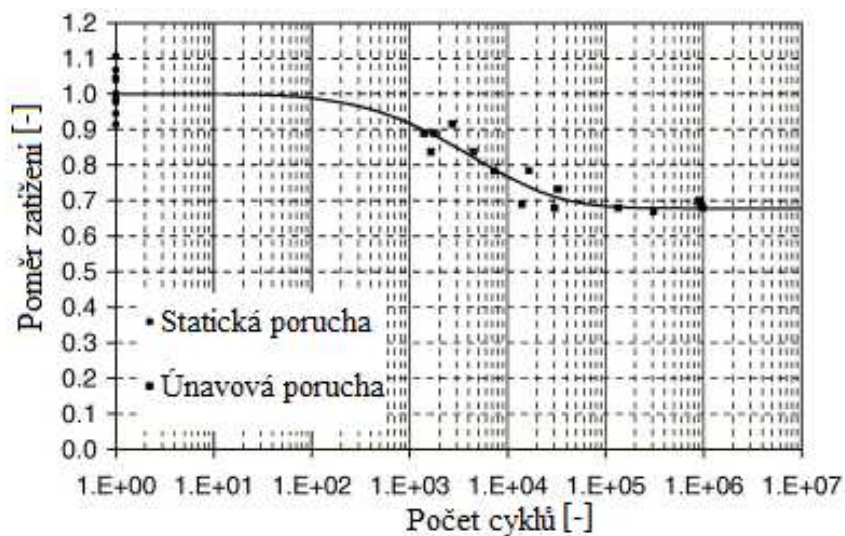
Mezi nejznámější zkušební zařízení patří univerzální únavové zkušební stroje fy Schenk, MTS, Amsler, Instron a Zwick. [22]



Obr. 31: Schéma přístroje s rotující pákou [24]

4.2.4 Současný stav ve světě

Dnes se ve světě nejčastěji testují sendvičové desky s jádrem z hliníkové voštiny nebo z buněčných pěn (PVC, PMI) pěn a uhlíkovou nebo skelnou vnější vrstvou. Na následujícím obrázku 32 lze vidět chování sendvičové desky, která má jádro vyrobené z hliníkové voštiny (velikost buněk 4,8 mm, tloušťka stěn 0,025 mm) a vnější vrstvy se skládají ze tří vrstev uhlíkové tkaniny ($-60^{\circ}/+60^{\circ}/0^{\circ}$, tloušťka vrstvy 0,07 mm). [33, 34]



Obr. 32: Příklad únavové křivky [33]

5 ZÁVĚR TEORETICKÉ ČÁSTI A CÍLE ČÁSTI PRAKTICKÉ

V literární části jsem se nejprve zaměřil na skladbu sendvičových kompozitů, kde jsem podrobněji rozebral základní typy vnějších vrstev a jader. Dále jsem popsal technologie výroby těchto kompozitů a také únavu kompozitů, kde jsem se zmínil i o mechanickém chování sendvičových struktur. V neposlední řadě jsem se věnoval samotným mechanickým zkouškám, do kterých jsem zařadil hlavně ty, které budu využívat se své praktické části.

V praktické části se budu zabývat výrobou samotných zkušebních vzorků, které se budou vyrábět ve firmě Form s.r.o. pod dohledem odborných pracovníků. Poté provedu sérii měření na jednoosý tříbodový ohyb na přístroji ZWICK 1456, kde mě bude nejvíce zajímat maximální síla při ohybu vzorku, ze které budu vycházet při únavových zkouškách. Únavové zkoušky budu provádět v budově Centra polymerních systémů, kde k tomuto měření mají vhodný zkušební stroj Instron 8871. Závěrem všech zkoušek provedu peel test, což je testování sendvičových vzorků, kdy zjišťujeme sílu potřebnou na odlup vnější vrstvy od jádra.

Nakonec vyhodnotím naměřené data, které přehledně graficky zpracuji a dojdou k závěrům práce, kde shrnu mechanické vlastnosti zhotovených sendvičových struktur v závislosti na použitých materiálech.

II. PRAKTICKÁ ČÁST

6 VÝROBA VZORKŮ

Výroba vzorků byla prováděna ve firmě Form s.r.o., která vznikla v roce 1991. Firma má hlavní sídlo v Horní Lidči a výrobní závody ve Střelné. Firma se především zabývá výrobou interiérových a exteriérových dílů pro kolejová vozidla, automobilový průmysl, zemědělskou techniku, zdravotní techniku, stavebnictví, atd.

Materiálová skladba vzorků byla volena z materiálů, které se nejčastěji používají v dopravním průmyslu (nejčastěji jako podlahoviny).

6.1 Základní technická specifikace použitých materiálů

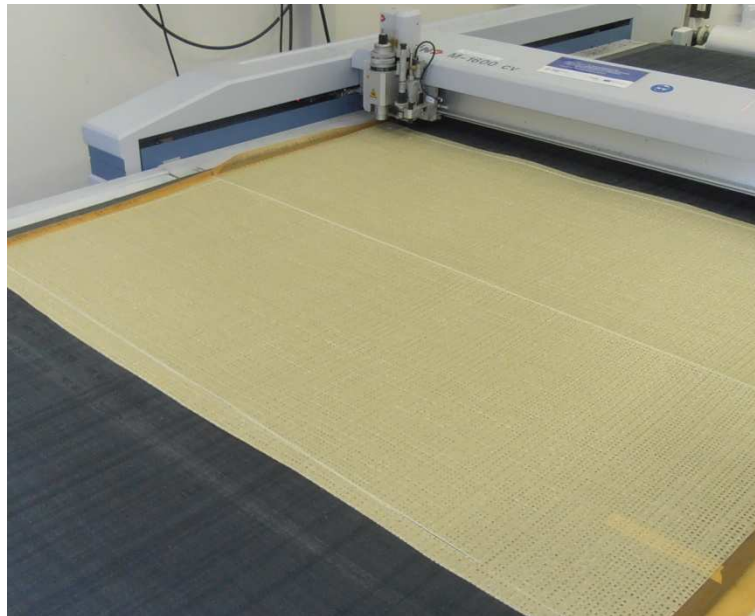
Vnější vrstvy:

- *fenolický prepreg PHG840N-G213-40* (obrázek 33)
 - skelná tkanina z E-skla (820 g.m^{-2})
 - plátňová vazba
 - předimpregnováno 40-ti % fenolické pryskyřice *PHG840N*
 - vytvrzovací teplota mezi $125^{\circ}\text{C} - 155^{\circ}\text{C}$
 - kompletní specifikace v Příloze P I: *Materiálový list PHG840N-G213-40*



Obr. 33: Fenolický prepreg PHG840N-G213-40

- *fenolický prepreg PHG840N-F300-47* (obrázek 34)
 - skelná tkanina z E-skla (300 g.m^{-2})
 - předimpregnováno 47-mi % fenolické pryskyřice *PHG840N*
 - vynikající mechanické vlastnosti
 - dobrá povrchová úprava
 - doba vytvrzování 10 minut při teplotě 160°C
 - speciální adheze k hliníkovým materiálům
 - kompletní specifikace v Příloze *P II: Materiálový list PHG840N-F300-47*



Obr. 34: Fenolický prepreg PHG840N-F300-47

- *epoxidový prepreg TV 45 EMT 125 PLUS*
 - plošná hmotnost skelné tkaniny: 200 g.m^{-2}
 - tloušťka tkaniny: $190 \mu\text{m}$
 - předimpregnováno 42-mi % epoxidové pryskyřice *EMT 125 PLUS* (kompletní specifikace v Příloze *P III: Materiálový list EMT 125 PLUS*)
 - dobré mechanické vlastnosti
 - vysoká průhlednost
 - zvýšená odolnost proti působení UV záření
 - kompletní specifikace v Příloze *P IV: Materiálový list TV 45 EMT 125 PLUS*

- vysokotlaký laminát HPL
 - tloušťka: 0,8 mm
 - hustota: 1,40 g.cm⁻³
 - teplota vznícení: 400°C
 - lesklý černý povrch U 1200
 - až 60 hmot. % papíru a 30-40 % fenolické pryskyřice
 - vrstva melaminové pryskyřice pro dekorativní účely
 - povrch vysoce odolný vůči běžným komunálním rozpouštědlům a chemikáliím
 - kompletní specifikace v Příloze P V: *Materiálový list HPL*

Jádra:

- hliníková voština ECM 6.4-82 (obrázek 35)
 - materiál: Alu-Alloy 3003 (AlMnCu)
 - povrchová úprava oxidem zirkoničitým
 - tloušťka stěn: 80 μm
 - velikost buňky: 6,4 mm
 - hustota: 82 kg.m⁻³
 - kompletní specifikace v Příloze P VI: *Materiálový list ECM 6.4-82*



Obr. 35: Hliníková voština ECM 6.4-82

6.2 Příprava polotovarů

Nejprve byly z prepregů nařezány díly o velikosti dle rozměrů vyráběných sendvičových desek na multifunkčním plotru *M-1600 CV* od firmy *Zünd* (obrázek 36).



Obr. 36: Řezání prepregů na plotru *M-1600 CV*

Tento plotr je vybaven stabilním paprskem. Používá se na řezání materiálů jako je kůže, lepenky, vlnité lepenky nebo pro řezání dřeva, plastů, atd. V následující tabulce 7 jsou některé základní parametry tohoto plotru.

Tab. 7: Základní parametry plotru *M-1600 CV* od firmy *Zünd*

Pracovní plocha	1330 x 1600 mm
Celkové rozměry	1840 x 2060 x 965 mm
Hmotnost	670 kg
Max. hmotnost zpracovávaného materiálu	350 kg
Maximální rychlost	750 mm.s ⁻¹
Zrychlení	5 m.s ⁻²
Rozlišitelnost	0,005 mm

Hliníková voština byla na potřebné rozměry řezána ručně. Značení místa řezu se provádělo pomocí papírové pásky (obrázek 37).



Obr. 37: Příprava voštiny na řezání

6.3 Technologie výroby

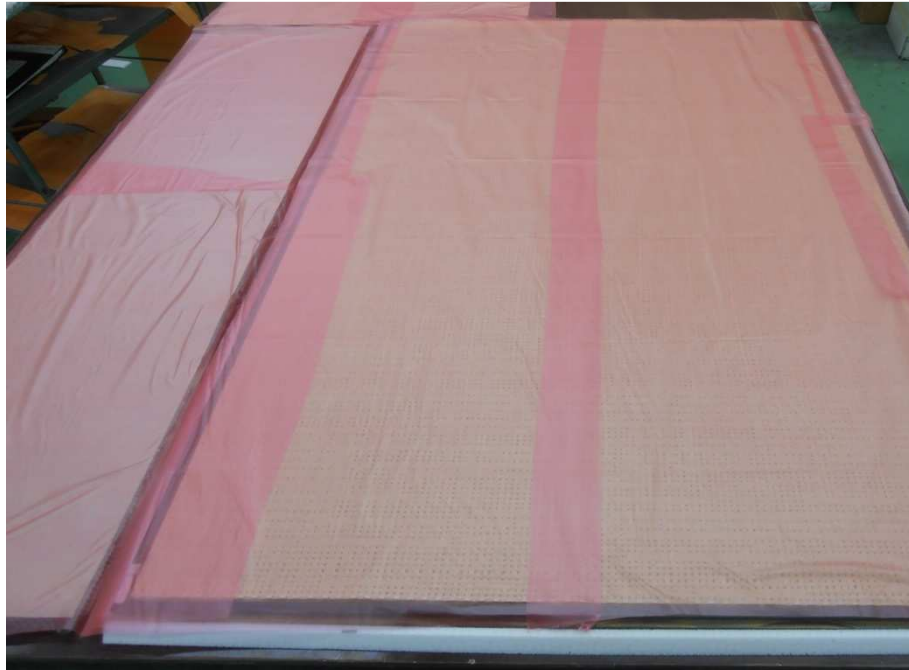
Pro všechny sendvičové desky byla zvolena technologie výroby pomocí vakuového lisování prepregů, která je podrobněji popsána v kapitole 2.4.

Nejprve se na vyčištěnou formu naněs gelcoat proto, abychom vytvořili ochranný film a sendvičová deska šla pak snáze odloupnout od formy. Následovalo samotné pokládání vrstev dle materiálového složení sendvičových desek (obrázek 38).



Obr. 38: Naskládané vrstvy pro výrobu sendvičové desky

Na poslední vrstvu prepregu se začaly pokládat technologické vrstvy. Jako první byla položena odtrhová tkanina (obrázek 39), která pomáhá oddělení technologických vrstev od vyrobené sendvičové desky a usnadňuje další práci s ní, protože není dále potřeba upravovat nepohledovou stranu.



Obr. 39: Odtrhová tkanina

Poté následovala perforovaná ochranná fólie a odvzdušňovací tkanina, která napomáhá rovnoměrnému rozložení tlaku na všechny vrstvy. Na odvzdušňovací tkaninu byly dále aplikovány dva přívody k vakuové pumpě (obrázek 40).



Obr. 40: Odvzdušňovací tkanina se dvěma přívody k vakuové pumpě

Poslední technologickou vrstvou byla vakuová fólie, která byla těsnící páskou po obvodě přilepena k formě. Poté následovalo našroubování vakuových ventilů a připojení vakuovacích hadic. Nakonec došlo k vytvoření vakua o podtlaku $0,8 \text{ baru}$.



Obr. 41: Výrobní proces před a po vytvoření vakua

Takto připravená forma včetně všech vrstev byla přesunuta do vytvrzovací pece (obrázek 42).

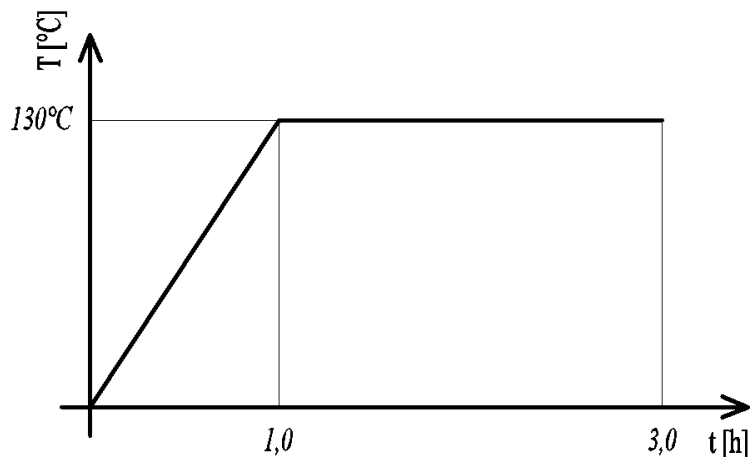


Obr. 42: Vytvrzovací pec

6.3.1 Parametry nastavení vytvrzování prepregů

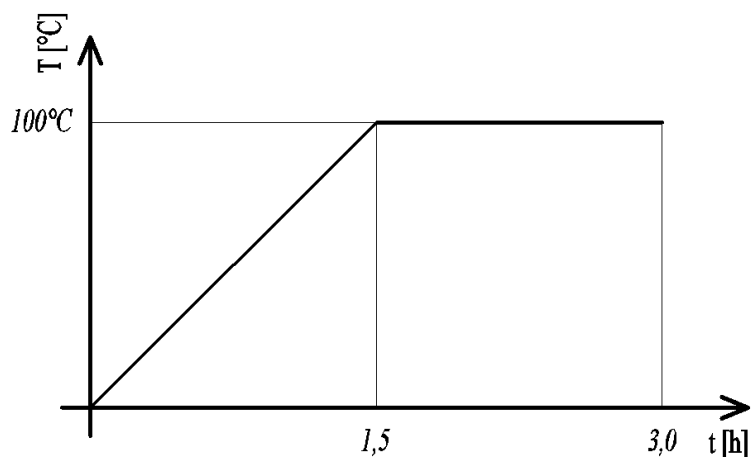
Při výrobě sendvičových desek byly zvoleny dva vytvrzovací programy. Jeden pro fenolické prepregy a jeden pro epoxidové prepregy.

Desky obsahující vrstvy fenolického prepregu byly ve vytvrzovací peci ohřívány jednu hodinu na teplotu 130°C a poté následovala dvouhodinová výdrž na této teplotě, než proběhlo dostatečné vytvrzení (obrázek 43).



Obr. 43: Vytvrzovací program pro fenolické prepregy

U desek s epoxidovým prepregem byl vytvrzovací program podobný. Nejdříve došlo k ohřevu desek za hodinu a půl na teplotu 100°C a pak výdrž taktéž hodinu a půl na této teplotě (obrázek 44).



Obr. 44: Vytvrzovací program pro epoxidové prepregy

6.4 Další úprava desek

Po odstranění všech technologických vrstev byly sendvičové desky orýsovány a připraveny k nařezání dle požadovaných rozměrů (obrázek 45).



Obr. 45: Orýsovaná sendvičová deska

Rozměry zhotovených vzorků:

- pro statické zkoušky v ohybu: $20 \times 150 \text{ mm}$
- pro dynamické únavové zkoušky: $20 \times 150 \text{ mm}$
- pro peel testy: $50 \times 150 \text{ mm}$

Samotné řezání vzorků bylo prováděno pomocí úhlové brusky s řezacím kotoučem.

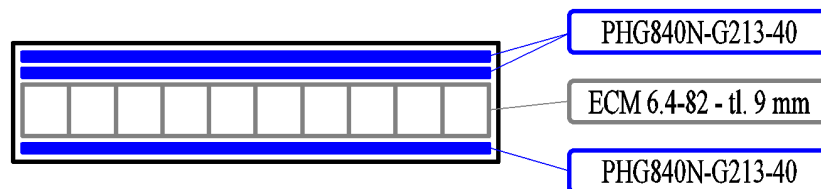
6.5 Materiálové složení sendvičových vzorků

Při výrobě jsme se zaměřili hlavně na výrobu sendvičových desek z hliníkového voštinového jádra, které se nejčastěji používá v dopravních prostředcích, například na výrobu okenních, stropních nebo podlahových panelů.

6.5.1 Složení jednotlivých sendvičových vzorků

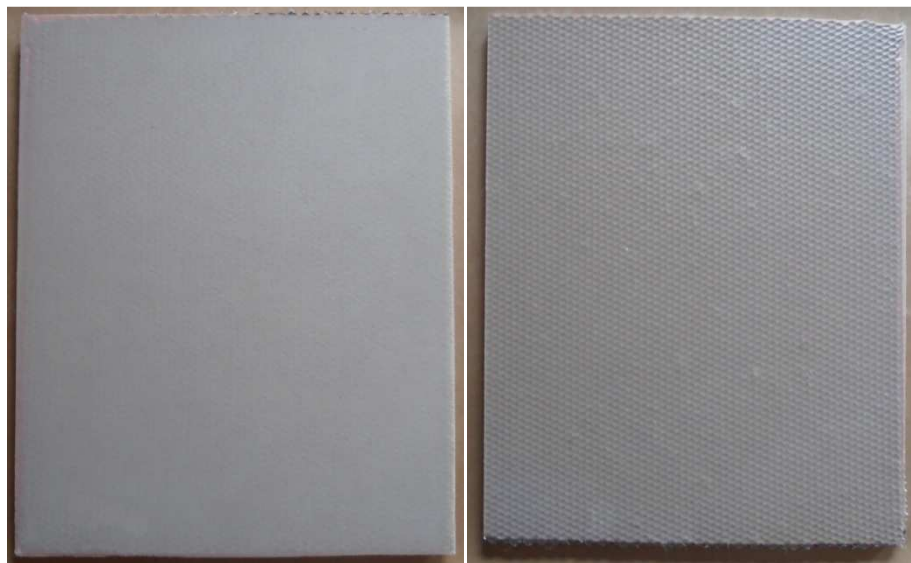
Vzorek č. 1:

Vzorek č. 1 (obrázek 46) je vyroben ze tří vrstev fenolického prepregu *PHG840N-G213-40*, kde dvě vrstvy jsou uloženy na horní straně a jedna vrstva na straně spodní. Jako jádro je použita hliníková voština *ECM 6.4-82* o tloušťce *9 mm*.



Obr. 46: Materiálové složení vzorku č. 1

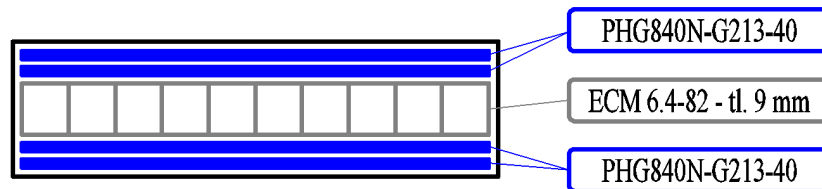
Na levé části obrázku 47 je vidět pohledová strana (horní strana) sendvičové desky a na pravé straně nepohledová strana (spodní strana), která měla pouze jednu vrstvu prepregu a tak lze přes ni vidět i strukturu voštiny.



Obr. 47: Pohledová a nepohledová strana vzorku č. 1

Vzorek č. 2:

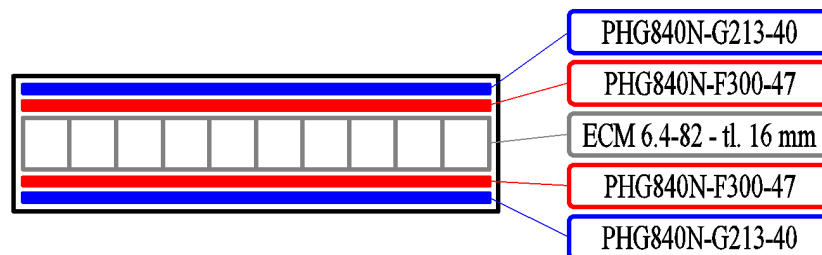
Následující vzorek (obrázek 48) má obdobné složení jako vzorek č. 1, jen s tím rozdílem, že na spodní straně jsou použity dva prepregy *PHG840N-G213-40*.



Obr. 48: Materiálové složení vzorku č. 2

Vzorek č. 3:

U vzorku č. 3 (obrázek 49) byl použit fenolický prepreg *PHG840N-F300-47*, který má lepší adhezi k hliníkovým materiálům. Tento prepreg byl vložen mezi hliníkové voštinové jádro o tloušťce *16 mm* a vnější vrstvu z prepregu *PHG840N-G213-40*.



Obr. 49: Materiálové složení vzorku č. 3

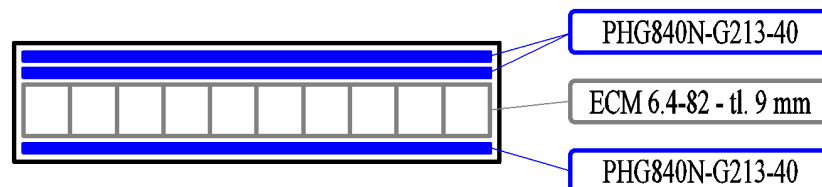
Fenolický prepreg *PHG840N-F300-47* vytvořil na nepohledové straně strukturu, která je zobrazena na obrázku 50. Je to způsobeno tím, že tento prepreg má řidší strukturu (300 g.m^{-2}) a tak lze vidět i jeho osnovu.



Obr. 50: Detail osnovy prepregu nepohledové vrstvy

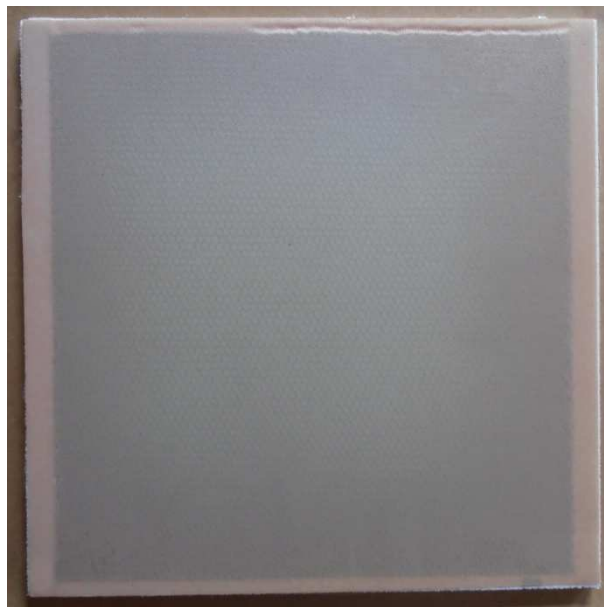
Vzorek č. 4:

Vzorek č. 4 má stejné materiálové složení (obrázek 51) jako vzorek č. 1. Skládá se tedy ze tří fenolických prepregů *PHG840N-G213-40* a hliníkového voštinového jádra *ECM 6.4-82* tloušťky *9 mm*.



Obr. 51: Materiálové složení vzorku č. 4

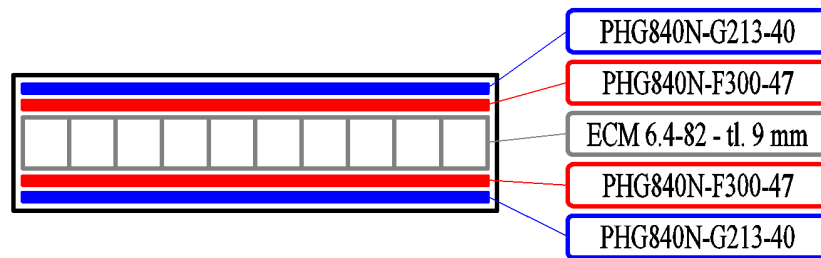
Oproti vzorku č. 1 byl rozdíl pouze ve výrobním procesu, kdy zde byly při výrobě po obvodě sendvičové desky použity lisovací dorazy z PET pěny tloušťky *10 mm*, jak je vidět na následujícím obrázku 52.



Obr. 52: Nalisované dorazy na vzorku č. 4

Vzorek č. 5:

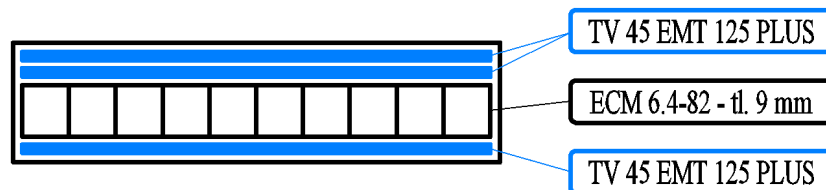
Tento vzorek má stejné složení jako vzorek č. 3. Na každou stranu vnější vrstvy je tedy použit jeden prepreg *PHG840N-G213-40* a jeden prepreg *PHG840N-F300-47*, který je v kontaktu s hliníkovým voštinovým jádrem *ECM 6.4-82* (obrázek 53). Oproti vzorku č. 1 je zde voština tloušťky *9 mm*.



Obr. 53: Materiálové složení vzorku č. 5

Vzorek č. 6:

U vzorku č. 6 je použit epoxidový prepreg *TV 45 EMT 125 PLUS*. Na horní straně jsou použity dvě vrstvy a na spodní straně vrstva jedna. Jádro je tvořeno opět hliníkovou voštinou *ECM 6.4-82* o tloušťce *9 mm* (obrázek 54).



Obr. 54: Materiálové složení vzorku č. 6

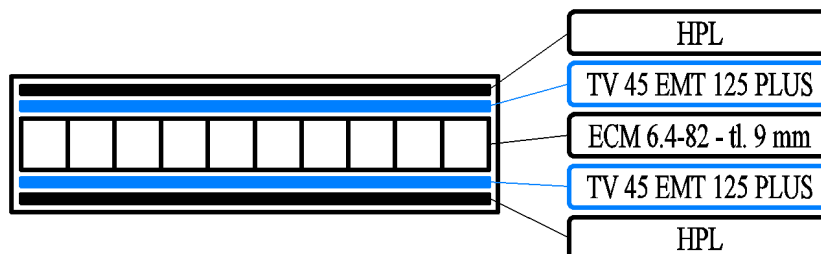
Tento epoxidový prepreg je vysoce průhledný (200 g.m^{-2}), a tak je přes vnější vrstvu zřetelně vidět voštinové jádro (obrázek 55).



Obr. 55: Detail vzorku č. 6

Vzorek č. 7:

Následující vzorek se skládá ze dvou desek vysokotlakého laminátu *HPL*, které tvořily vnější vrstvy sendvičové desky. Mezi desky *HPL* a hliníkové voštinové jádro *ECM 6.4-82*, které zde mělo tloušťku 9 mm , byla na každé straně vložena jedna vrstva epoxidového prepregu *TV 45 EMT 125 PLUS* (obrázek 56).



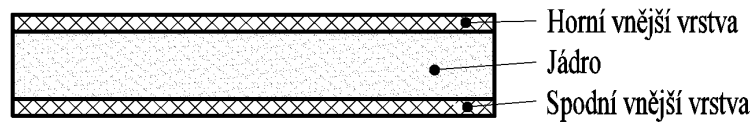
Obr. 56: Materiálové složení vzorku č. 7

Vysokotlaký laminát *HPL* (obrázek 57) se pro svůj vzhled používají nejčastěji pro interiérové aplikace (kuchyňské pracovní desky, obložení stěn, designové stoly,...)



Obr. 57: Detail orýsovaného vzorku č. 7

V následující tabulce 8 je shrnuto materiálové složení jednotlivých sendvičových vzorků podle obrázku 58.



Obr. 58: Schéma složení sendvičových vzorků

Pokud je v tabulce uvedeno více horních vnějších vrstev, tak jsou řazeny od vrstvy, která je nejvzdálenější od jádra. Pokud je více spodních vnějších vrstev, tak je naopak první uvedená vrstva ta, která přímo přiléhá k jádru.

Tab. 8: Shrnutí složení sendvičových vzorků

Vzorek č.	Horní vnější vrstva	Jádro	Spodní vnější vrstva
1	2x fenolický prepreg <i>PHG840N-G213-40</i>	hliníková voština tloušťka 9 mm <i>ECM 6.4-82</i>	1x fenolický prepreg <i>PHG840N-G213-40</i>
2	2x fenolický prepreg <i>PHG840N-G213-40</i>	hliníková voština tloušťka 9 mm <i>ECM 6.4-82</i>	2x fenolický prepreg <i>PHG840N-G213-40</i>
3	1x fenolický prepreg <i>PHG840N-G213-40</i> 1x fenolický prepreg <i>PHG840N-F300-47</i>	hliníková voština tloušťka 16 mm <i>ECM 6.4-82</i>	1x fenolický prepreg <i>PHG840N-F300-47</i> 1x fenolický prepreg <i>PHG840N-G213-40</i>
4 ¹⁾	2x fenolický prepreg <i>PHG840N-G213-40</i>	hliníková voština tloušťka 9 mm <i>ECM 6.4-82</i>	1x fenolický prepreg <i>PHG840N-G213-40</i>
5	1x fenolický prepreg <i>PHG840N-G213-40</i> 1x fenolický prepreg <i>PHG840N-F300-47</i>	hliníková voština tloušťka 9 mm <i>ECM 6.4-82</i>	1x fenolický prepreg <i>PHG840N-F300-47</i> 1x fenolický prepreg <i>PHG840N-G213-40</i>
6	2x epoxidový prepreg <i>TV 45 EMT 125 PLUS</i>	hliníková voština tloušťka 9 mm <i>ECM 6.4-82</i>	1x epoxidový prepreg <i>TV 45 EMT 125 PLUS</i>
7	1x vysokotlaký laminát <i>HPL</i> 1x epoxidový prepreg <i>TV 45 EMT 125 PLUS</i>	hliníková voština tloušťka 9 mm <i>ECM 6.4-82</i>	1x epoxidový prepreg <i>TV 45 EMT 125 PLUS</i> 1x vysokotlaký laminát <i>HPL</i>

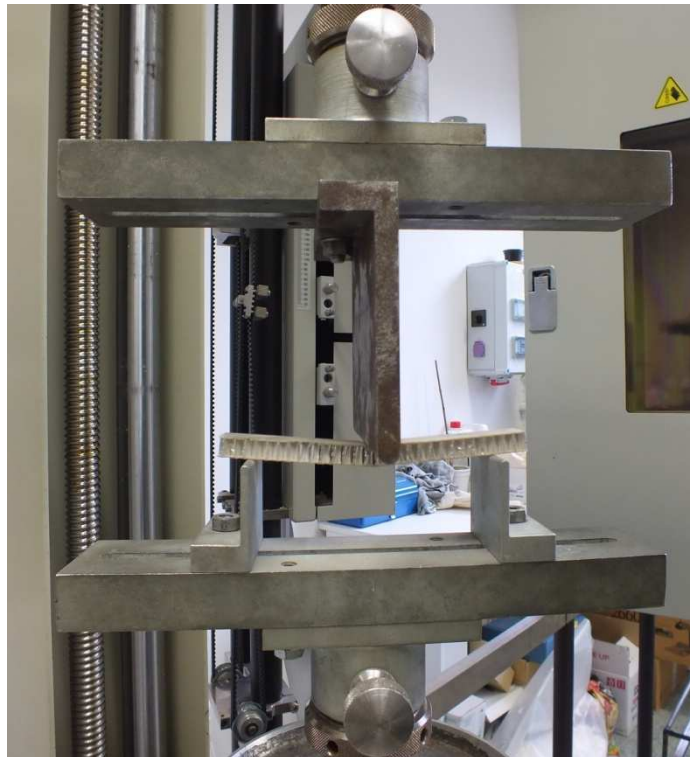
¹⁾ U tohoto vzorku jsou použity lisovací dorazy tloušťky 10 mm.

7 STATICKÉ ZKOUŠKY JEDNOOSÝM TŘÍBODOVÝM OHYBEM

Zkouška jednoosým tříbodovým ohybem byla prováděna podle normy ČSN EN 2746 na univerzálním zkušebním stroji ZWICK 1456, který má následující základní technické údaje:

- maximální posuv příčnicku: $800 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$
- snímače síly: $2,5 \text{ kN}$ a 20 kN
- teplotní komora: -80°C / $+250^{\circ}\text{C}$

Pro vyhodnocení výsledků byl použit instalovaný software *TestXpert v2.1*.

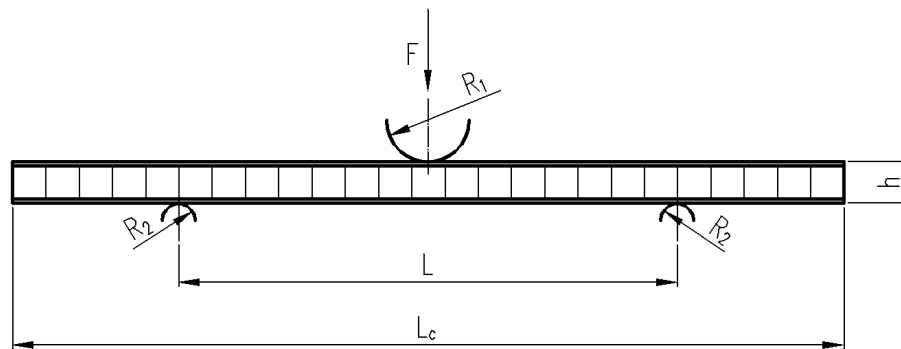


Obr. 59: Průběh statické zkoušky v ohybu

7.1 Nastavující parametry zkoušky

Před provedením samotné zkoušky v ohybu bylo nastaveno několik důležitých parametrů:

- vzdálenost podpěr: $L = 120 \text{ mm}$
- poloměr zatěžující desky: $R_1 = 5 \text{ mm}$
- poloměr opěrných desek: $R_2 = 2 \text{ mm}$
- předzatížení: 2 N
- rychlost k dosažení předzatížení: $5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$
- rychlost zatěžování: $10 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$



Obr. 60: Schéma tříbodového zatěžování

7.2 Naměřená a vyhodnocená data

V následujících tabulkách jsou vyhodnocené tyto parametry:

- E_f – modul pružnosti v ohybu [MPa]
- F_{max} – maximální síla [N]
- σ_{fmax} – mez pevnosti v ohybu [MPa]
- ε_{Fmax} – poměrná deformace na mezi pevnosti [%]
- y_{Fmax} – průhyb při mezi pevnosti [mm]
- W_{Fmax} – práce potřebná na dosažení maximální síly [J]

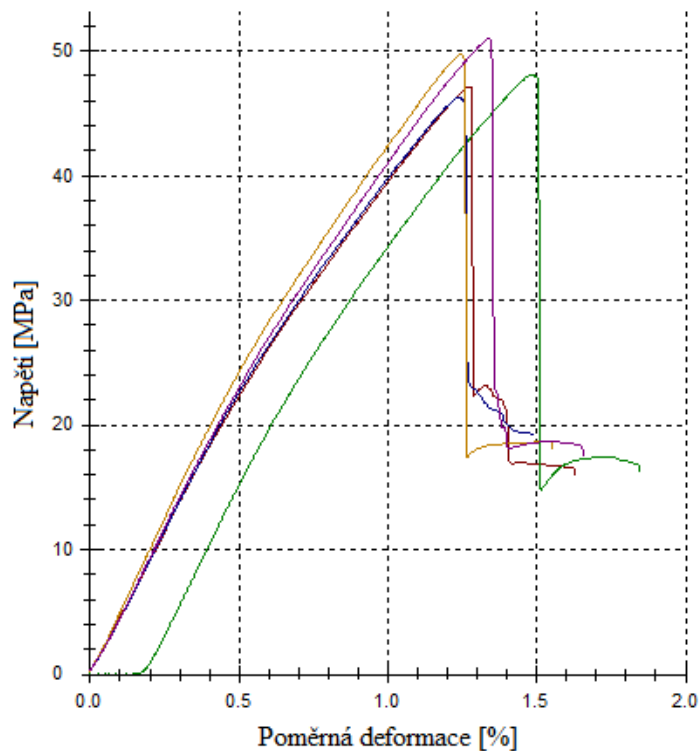
7.2.1 Vzorek č. 1

Měřené vzorky měly průřez o rozměrech $9,5 \text{ mm} \times 20,5 \text{ mm}$. V následující tabulce 9 jsou uvedeny naměřené hodnoty. Na obrázku 61 je vidět závislost napětí na poměrné deformaci.

Tab. 9: Naměřená a vyhodnocená data pro měření vzorku č. 1

Vzorek č. 1	Měření č.					Průměrná hodnota	Směrodatná odchylka
	1	2	3	4	5		
$n = 5$							
$E_f \text{ [MPa]}$	4 570	$\pm 220^1$	4 670	5 070	4 790	4 775	216
$\sigma_{fmax} \text{ [MPa]}$	47,2	48,1	46,3	49,8	51,0	48,48	1,91
$F_{max} \text{ [N]}$	485	495	475	512	524	498,2	19,9
$\varepsilon_{Fmax} \text{ [%]}$	1,3	1,5	1,2	1,2	1,3	1,30	0,12
$y_{Fmax} \text{ [mm]}$	3,2	3,5	3,1	3,1	3,4	3,26	0,18
$W_{Fmax} \text{ [J]}$	0,86	0,91	0,82	0,89	0,98	0,892	0,060

¹⁾ Hodnota byla z měření vyřazena kvůli značné odchylce od ostatních naměřených hodnot



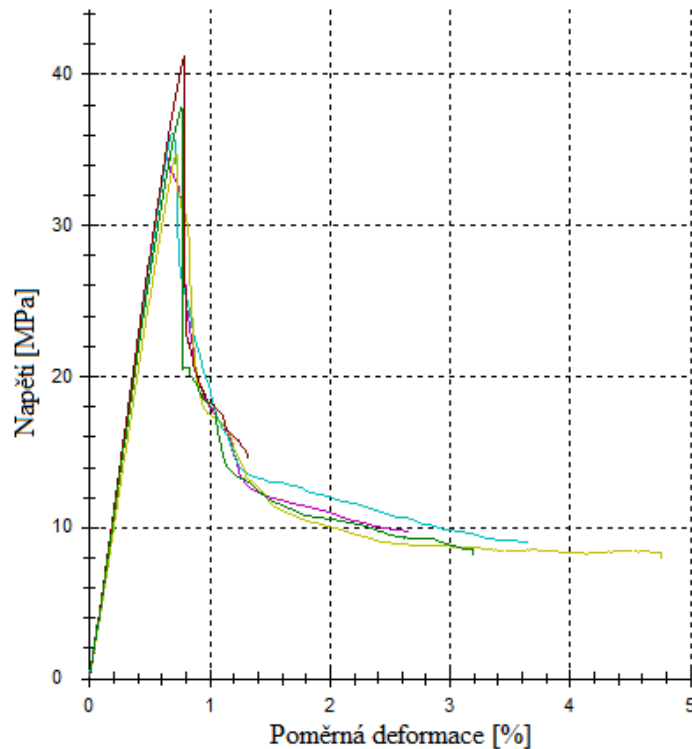
Obr. 61: Závislost napětí na poměrné deformaci u vzorku č. 1

7.2.2 Vzorek č. 2

Měřené vzorky měly průřez o rozměrech $9,7 \text{ mm} \times 21 \text{ mm}$. V následující tabulce 10 jsou uvedeny naměřené hodnoty. Na obrázku 62 je vidět závislost napětí na poměrné deformaci.

Tab. 10: Naměřená a vyhodnocená data pro měření vzorku č. 2

Vzorek č. 2	Měření č.					Průměrná hodnota	Směrodatná odchylka
	1	2	3	4	5		
$n = 5$							
$E_f \text{ [MPa]}$	5 610	5 490	5 020	5 620	5 410	5 430	245
$\sigma_{fmax} \text{ [MPa]}$	34,6	36,1	34,8	41,2	37,8	36,90	2,72
$F_{max} \text{ [N]}$	380	397	382	453	415	405,4	30,1
$\varepsilon_{Fmax} \text{ [%]}$	0,6	0,7	0,7	0,8	0,8	0,72	0,08
$y_{Fmax} \text{ [mm]}$	1,6	1,7	1,8	1,9	1,9	1,78	0,13
$W_{Fmax} \text{ [J]}$	0,31	0,36	0,35	0,46	0,41	0,378	0,058



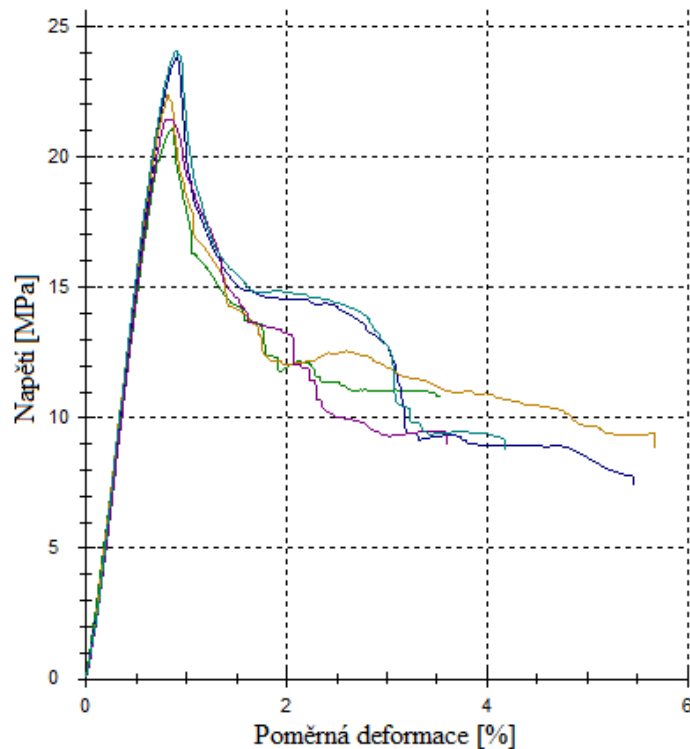
Obr. 62: Závislost napětí na poměrné deformaci u vzorku č. 2

7.2.3 Vzorek č. 3

Měřené vzorky měly průřez o rozměrech $17,6 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$. V následující tabulce 11 jsou uvedeny naměřené hodnoty. Na obrázku 63 je vidět závislost napětí na poměrné deformaci.

Tab. 11: Naměřená a vyhodnocená data pro měření vzorku č. 3

Vzorek č. 3	Měření č.					Průměrná hodnota	Směrodatná odchylka
	1	2	3	4	5		
$n = 5$							
$E_f \text{ [MPa]}$	2 950	2 940	3 210	2 790	3 040	2 986	154
$\sigma_{fmax} \text{ [MPa]}$	21,1	23,8	22,4	21,4	24,1	22,56	1,36
$F_{max} \text{ [N]}$	725	820	770	738	829	776,4	47,0
$\varepsilon_{Fmax} \text{ [%]}$	0,9	0,9	0,8	0,8	0,9	0,86	0,05
$y_{Fmax} \text{ [mm]}$	1,2	1,2	1,1	1,1	1,2	1,16	0,05
$W_{Fmax} \text{ [J]}$	0,48	0,56	0,46	0,44	0,56	0,500	0,056



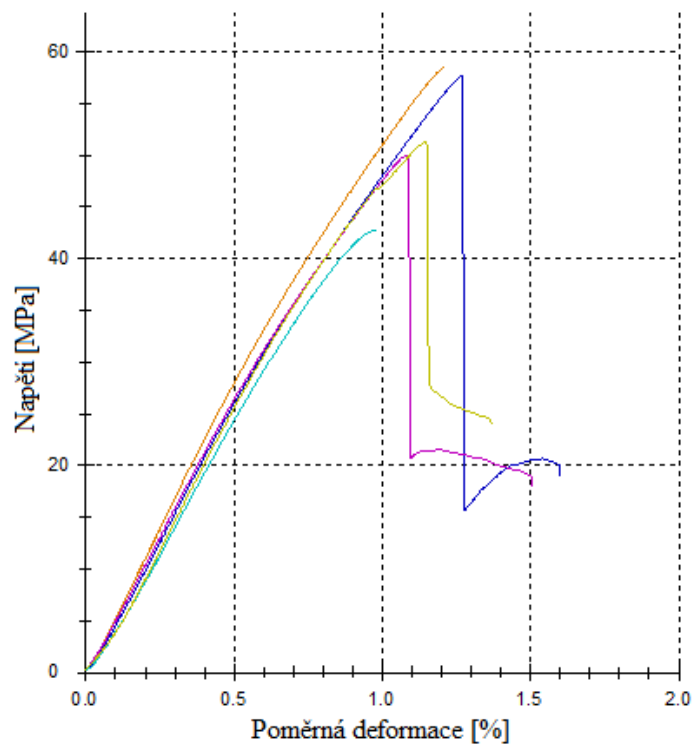
Obr. 63: Závislost napětí na poměrné deformaci u vzorku č. 3

7.2.4 Vzorek č. 4

Měřené vzorky měly průřez o rozměrech $9,5 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$. V následující tabulce 12 jsou uvedeny naměřené hodnoty. Na obrázku 64 je vidět závislost napětí na poměrné deformaci.

Tab. 12: Naměřená a vyhodnocená data pro měření vzorku č. 4

Vzorek č. 4	Měření č.					Průměrná hodnota	Směrodatná odchylka	
	$n = 5$	1	2	3	4			5
$E_f \text{ [MPa]}$		5 290	5 800	5 390	4 810	5 010	5 260	379
$\sigma_{fmax} \text{ [MPa]}$		57,7	58,5	50,0	42,8	51,3	52,06	6,40
$F_{max} \text{ [N]}$		579	586	501	429	514	521,8	64,2
$\varepsilon_{Fmax} \text{ [%]}$		1,3	1,2	1,1	1,0	1,1	1,14	0,11
$y_{Fmax} \text{ [mm]}$		3,2	3,0	2,7	2,4	2,8	2,82	0,30
$W_{Fmax} \text{ [J]}$		0,99	0,97	0,74	0,56	0,81	0,814	0,177



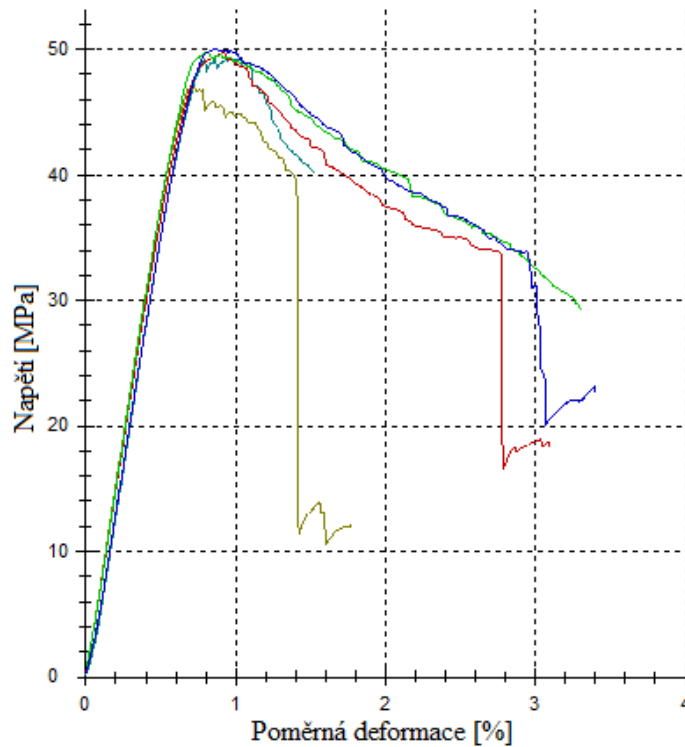
Obr. 64: Závislost napětí na poměrné deformaci u vzorku č. 4

7.2.5 Vzorek č. 5

Měřené vzorky měly průřez o rozměrech $10,6 \text{ mm} \times 20,3 \text{ mm}$. V následující tabulce 13 jsou uvedeny naměřené hodnoty. Na obrázku 65 je vidět závislost napětí na poměrné deformaci.

Tab. 13: Naměřená a vyhodnocená data pro měření vzorku č. 5

Vzorek č. 5	Měření č.					Průměrná hodnota	Směrodatná odchylka
	1	2	3	4	5		
$n = 5$							
$E_f \text{ [MPa]}$	7 270	7 760	7 520	7 650	7 200	7 480	241
$\sigma_{fmax} \text{ [MPa]}$	49,2	47,0	49,7	49,8	50,0	49,14	1,23
$F_{max} \text{ [N]}$	624	596	630	631	634	623,0	15,5
$\varepsilon_{Fmax} \text{ [%]}$	1,0	0,7	0,9	0,8	0,9	0,86	0,11
$y_{Fmax} \text{ [mm]}$	2,3	1,6	2,1	1,8	1,9	1,94	0,27
$W_{Fmax} \text{ [J]}$	0,92	0,54	0,82	0,66	0,73	0,734	0,146



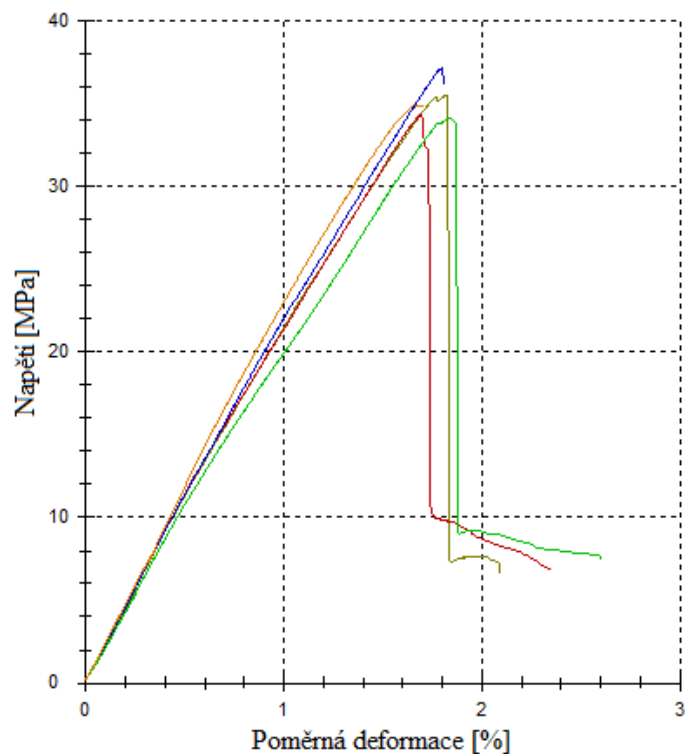
Obr. 65: Závislost napětí na poměrné deformaci u vzorku č. 5

7.2.6 Vzorek č. 6

Měřené vzorky měly průřez o rozměrech $9,3 \text{ mm} \times 20,8 \text{ mm}$. V následující tabulce 14 jsou uvedeny naměřené hodnoty. Na obrázku 66 je vidět závislost napětí na poměrné deformaci.

Tab. 14: Naměřená a vyhodnocená data pro měření vzorku č. 6

Vzorek č. 6	Měření č.					Průměrná hodnota	Směrodatná odchylka
	1	2	3	4	5		
$n = 5$							
$E_f \text{ [MPa]}$	2 220	2 260	2 130	2 240	2 310	2 232	66
$\sigma_{fmax} \text{ [MPa]}$	35,5	34,3	34,1	37,2	35,0	35,22	1,24
$F_{max} \text{ [N]}$	355	343	341	371	349	351,8	12,0
$\varepsilon_{Fmax} \text{ [%]}$	1,8	1,7	1,8	1,8	1,7	1,76	0,05
$y_{Fmax} \text{ [mm]}$	4,7	4,4	4,7	4,6	4,3	4,54	0,18
$W_{Fmax} \text{ [J]}$	0,90	0,79	0,86	0,90	0,80	0,850	0,053



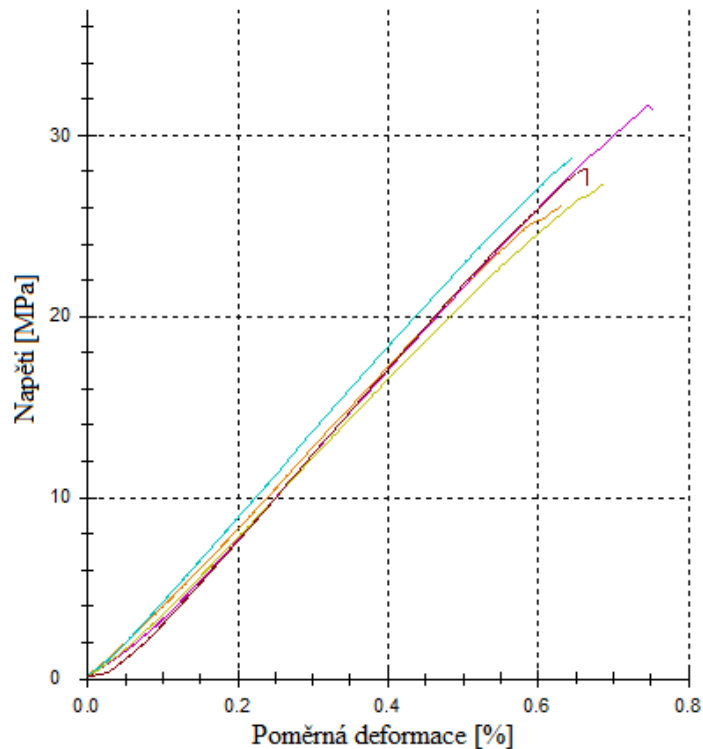
Obr. 66: Závislost napětí na poměrné deformaci u vzorku č. 6

7.2.7 Vzorek č. 7

Měřené vzorky měly průřez o rozměrech $10,6 \text{ mm} \times 20,8 \text{ mm}$. V následující tabulce 15 jsou uvedeny naměřené hodnoty. Na obrázku 67 je vidět závislost napětí na poměrné deformaci.

Tab. 15: Naměřená a vyhodnocená data pro měření vzorku č. 7

Vzorek č. 7	Měření č.					Průměrná hodnota	Směrodatná odchylka
	1	2	3	4	5		
$n = 5$							
$E_f \text{ [MPa]}$	4 270	4 310	4 660	4 210	4 540	4 398	193
$\sigma_{fmax} \text{ [MPa]}$	26,1	31,6	28,7	27,3	28,2	28,38	2,05
$F_{max} \text{ [N]}$	339	411	373	355	366	368,8	26,9
$\varepsilon_{Fmax} \text{ [%]}$	0,6	0,7	0,6	0,7	0,7	0,66	0,05
$y_{Fmax} \text{ [mm]}$	1,4	1,6	1,4	1,5	1,4	1,46	0,09
$W_{Fmax} \text{ [J]}$	0,25	0,34	0,28	0,28	0,27	0,284	0,034



Obr. 67: Závislost napětí na poměrné deformaci u vzorku č. 7

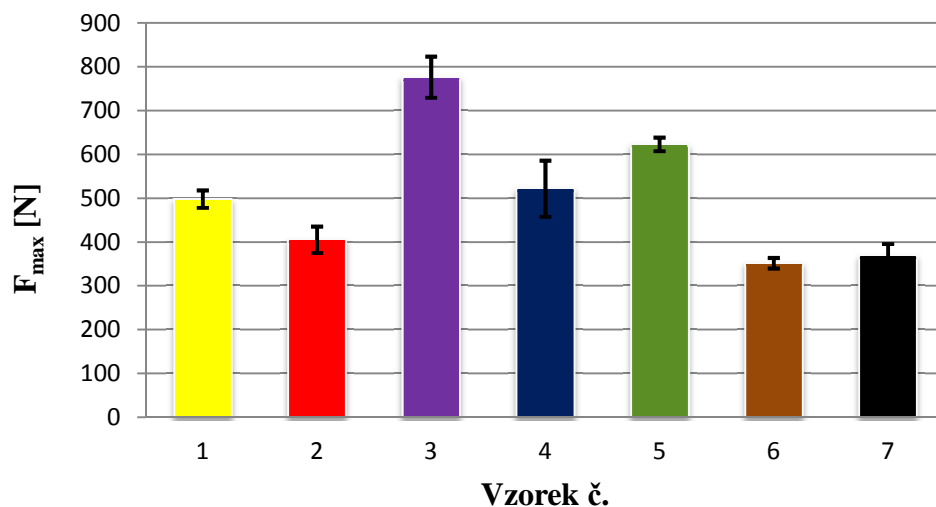
7.2.8 Shrnutí naměřených dat

V tabulce 16 jsou shrnuty důležité parametry pro porovnání mechanických vlastností zkušebních vzorků.

Tab. 16: Shrnutí naměřených dat pro statický jednoosý tříbodový ohyb

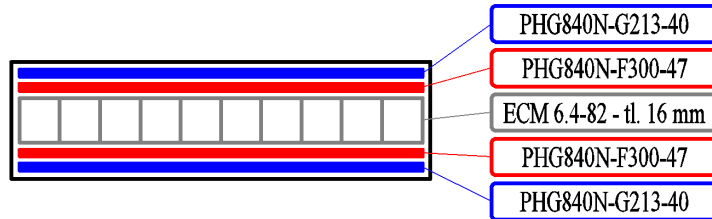
Vzorek č.	Modul pružnosti v ohybu E_f [MPa]	Mez pevnosti v ohybu σ_{fmax} [MPa]	Maximální síla F_{max} [N]
1	4 775 ± 216	48,48 ± 1,91	498,2 ± 19,9
2	5 430 ± 245	36,90 ± 2,72	405,4 ± 30,1
3	2 986 ± 154	22,56 ± 1,36	776,4 ± 47,0
4	5 260 ± 379	52,06 ± 6,40	521,8 ± 64,2
5	7 480 ± 241	49,14 ± 1,23	623,0 ± 15,5
6	2 232 ± 66	35,22 ± 1,24	351,8 ± 12,0
7	4 398 ± 193	28,38 ± 2,05	368,8 ± 26,9

Nejvíce nás u zkušebních vzorků zajímá maximální síla F_{max} , která je graficky znázorněna na obrázku 68 a kterou je potřeba znát k dynamickým únavovým zkouškám, abychom z ní vypočítali velikosti zatížení.



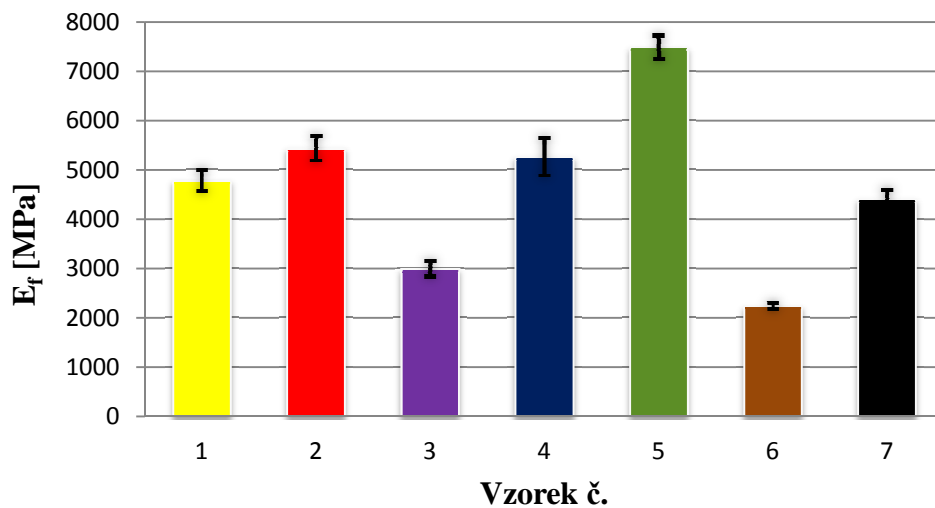
Obr. 68 Grafické shrnutí naměřených hodnot maximálních sil F_{max}

Z grafu je patrné, že je potřeba nejvyšší síly u vzorku č. 3, který má jako jediný tloušťku voštiny 16 mm (obrázek 69), oproti ostatním vzorkům, které mají tloušťku voštiny pouze 9 mm.



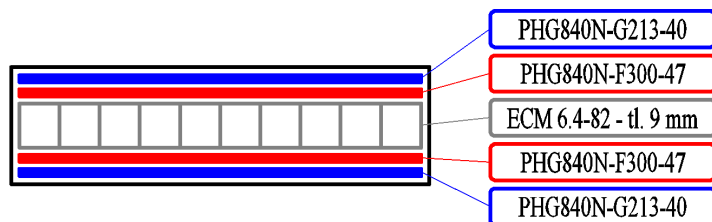
Obr. 69: Materiálové složení vzorku č. 3

Na obrázku 70 jsou znázorněny hodnoty modulů pružnosti v ohybu E_f pro jednotlivé typy vzorků.



Obr. 70: Grafické shrnutí naměřených hodnot modulů pružnosti v ohybu E_f

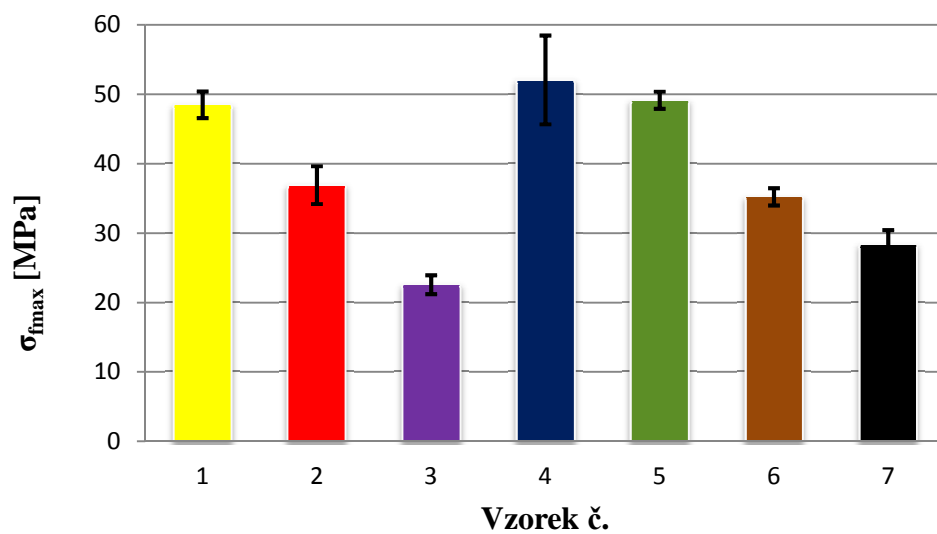
Zde má výrazně vyšší hodnotu vzorek č. 5. U tohoto vzorku byl s prepregem *PHG840N-G213-40* použit i prepreg *PHG840N-F300-47*, který má vyšší adhezi k hliníkovým materiálům (obrázek 71).



Obr. 71: Materiálové složení vzorku č. 5

Stejné materiálové složení měl i vzorek č. 3 pouze s tím rozdílem, že u vzorku č. 3 byla použita voština o tloušťce 16 mm a u vzorku č. 5 o tloušťce 9 mm . Je tedy patrné, že s rostoucí tloušťkou voštiny klesá modul pružnosti v ohybu E_f .

Z grafického znázornění výsledných hodnot pro mez pevnosti v ohybu (obrázek 72) můžeme opět vidět, že s rostoucí tloušťkou voštiny (vzorek č. 3 – 16 mm , vzorek č. 5 – 9 mm) klesá i mez pevnosti v ohybu



Obr. 72: Grafické shrnutí naměřených hodnot mezí pevnosti v ohybu σ_{fmax}

8 DYNAMICKÉ ÚNAVOVÉ ZKOUŠKY

Dynamická zkouška byla prováděna dle normy ČSN 64 0618 v budově Centra polymerních systémů Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně na zkušebním stroji *Instron 8871* (obrázek 73). Stroj má servo-hydraulický pohon, základnu s T-drážkou a používá se pro širokou škálu statických i dynamických zkoušek. Tento typ má maximální osový rozsah síly ± 10 kN.

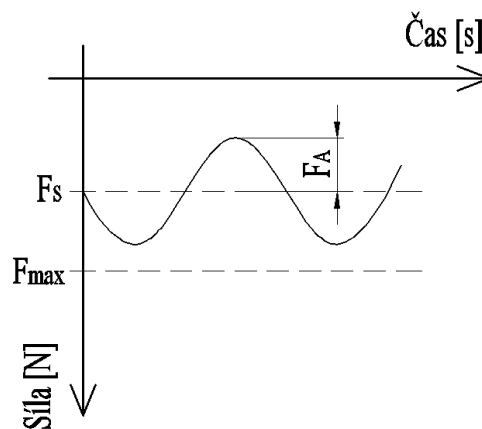


Obr. 73: Detail zkušebního stroje Instron 8871 při měření

Pro vyhodnocení výsledků byl použit instalovaný software *Instron SAX v7.1* a *Bluehill 2*.

8.1 Nastavující parametry zkoušky

Před provedením samotné zkoušky bylo provedeno několik testovacích měření. Následně jsme zvolili frekvenci zatěžování 3Hz a vybrali tři velikosti zatížení pro jednotlivé typy vzorků. Průběh zatěžování vzorků byl tlakový pulzující (obrázek 74), kdy byla v softwaru nastavena střední síla kmitu F_S a amplituda síly kmitu F_A .



Obr. 74: Schéma zatěžovacího cyklu

8.2 Naměřená a vyhodnocená data

Při měření počtu cyklů, který zkušební vzorek vydrží při daném zatížení, se u některých typů vzorku nedosáhlo poškození ani při vysokých hodnotách zatížení, a tak jsme se rozhodli u těchto vzorků provést vždy při stejném procentuálním zatížení určitý počet cyklů a následně provést statickou zkoušku v ohybu, kdy zjistíme úbytek modulu pružnosti a meze pevnosti v ohybu.

8.2.1 Únavová životnost

Vzorky č. 1, 4, 6 a 7 byly tedy zatěžovány při třech různých velikostech zatížení až do doby, kdy došlo k jejich porušení.

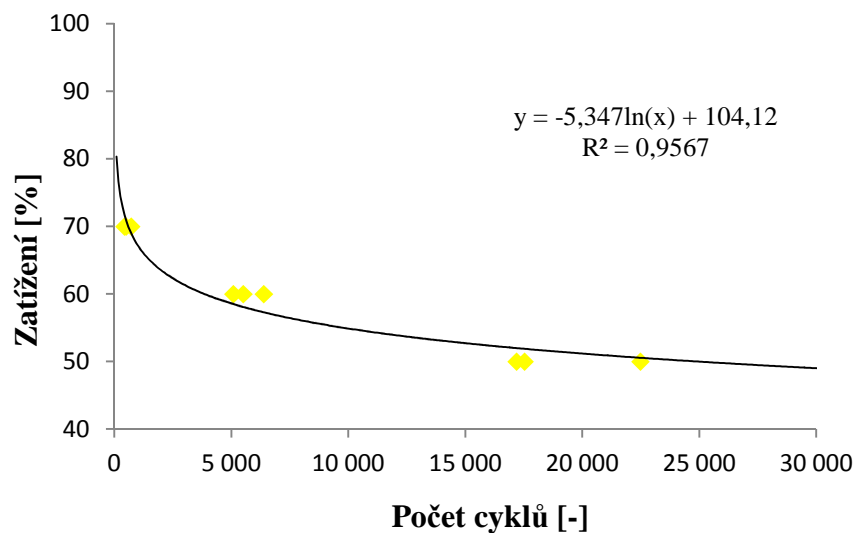
8.2.1.1 Vzorek č. 1

U vzorku č. 1 jsme zvolili rozsah zatížení jako 70%, 60% a 50% z maximální síly. V následující tabulce 17 jsou uvedeny naměřené hodnoty.

Tab. 17: Naměřená a vyhodnocená data pro měření vzorku č. 1

Vzorek č. 1			Počet cyklů [-]		
Zatížení [N]	70% F_{max}	200 ± 150	425	494	701
	60% F_{max}	175 ± 125	5 077	5 501	6 377
	50% F_{max}	150 ± 100	17 175	17 522	22 470

Na obrázku 75 je zobrazena závislost velikosti zatížení na počtech cyklů, které vzorek č. 1 vydržel.



Obr. 75: Křivka životnosti pro vzorek č. 1

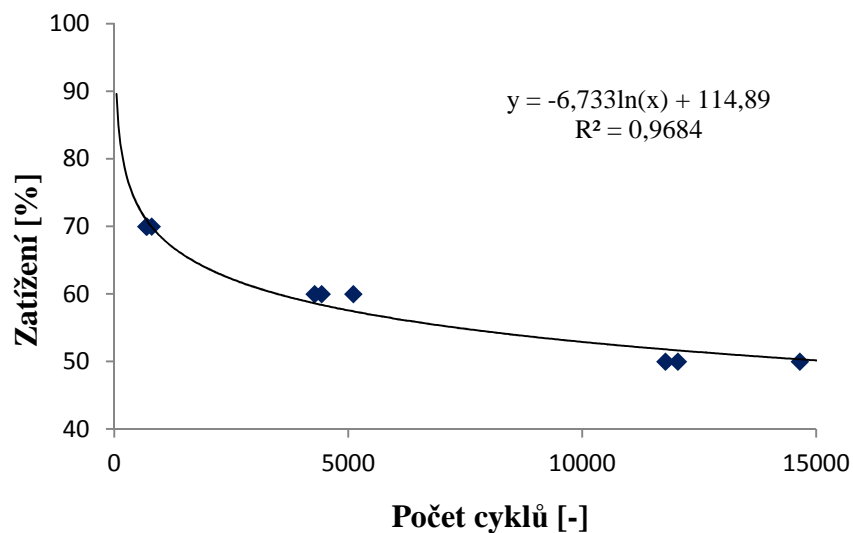
8.2.1.2 Vzorek č. 4

U vzorku č. 4 jsme zvolili rozsah zatížení jako 70%, 60% a 50% z maximální síly. V následující tabulce 18 jsou uvedeny naměřené hodnoty.

Tab. 18: Naměřená a vyhodnocená data pro měření vzorku č. 4

Vzorek č. 4			Počet cyklů [-]		
Zatížení [N]	70% F_{max}	210 ± 160	678	691	791
	60% F_{max}	180 ± 130	4 275	4 422	5 099
	50% F_{max}	155 ± 105	11 772	12 033	14 642

Na obrázku 76 je zobrazena závislost velikosti zatížení na počtech cyklů, které vzorek č. 4 vydržel.



Obr. 76: Křivka životnosti pro vzorek č. 4

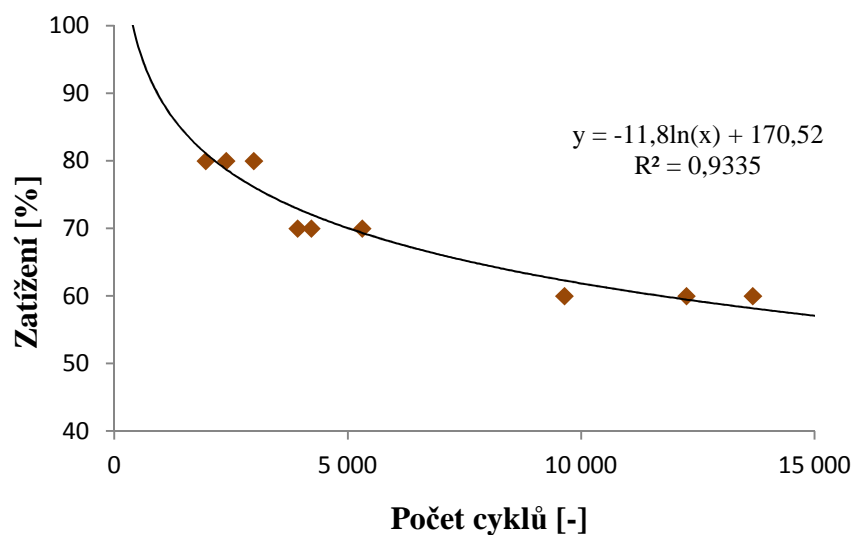
8.2.1.3 Vzorek č. 6

U vzorku č. 6 jsme zvolili rozsah zatížení jako 80%, 70% a 60% z maximální síly. V následující tabulce 22 jsou uvedeny naměřené hodnoty.

Tab. 19: Naměřená a vyhodnocená data pro měření vzorku č. 6

Vzorek č. 6			Počet cyklů [-]		
Zatížení [N]	80% F_{max}	165 ± 115	1 957	2 397	2 988
	70% F_{max}	150 ± 100	3 927	4 218	5 311
	60% F_{max}	130 ± 80	9 639	12 256	13 676

Na obrázku 77 je zobrazena závislost velikosti zatížení na počtech cyklů, které vzorek č. 6 vydržel.



Obr. 77: Křivka životnosti pro vzorek č. 6

8.2.1.4 Vzorek č. 7

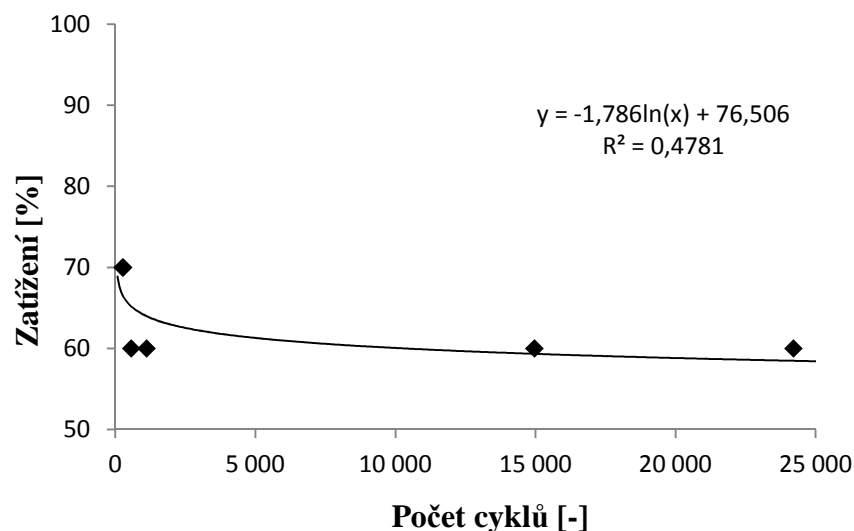
U vzorku č. 7 jsme zvolili rozsah zatížení pouze jako 70%, 60% z maximální síly. V následující tabulce 20 jsou uvedeny naměřené hodnoty.

Tab. 20: Naměřená a vyhodnocená data pro měření vzorku č. 7

Vzorek č. 7			Počet cyklů [-]			
Zatížení [N]	70% F_{max}	155 ± 105	256		280	
	60% F_{max}	135 ± 85	568	1 114	14 957	24 208

U tohoto vzorku docházelo ke značnému rozptylu mezi naměřenými hodnotami. Je to způsobené nejspíš tím, že jedna vrstva epoxidového prepregu nedostačovala k rovnoměrnému přilepení vnější vrstvy k jádru, a proto některé vzorky vydržely více cyklů než jiné při stejném zatížení.

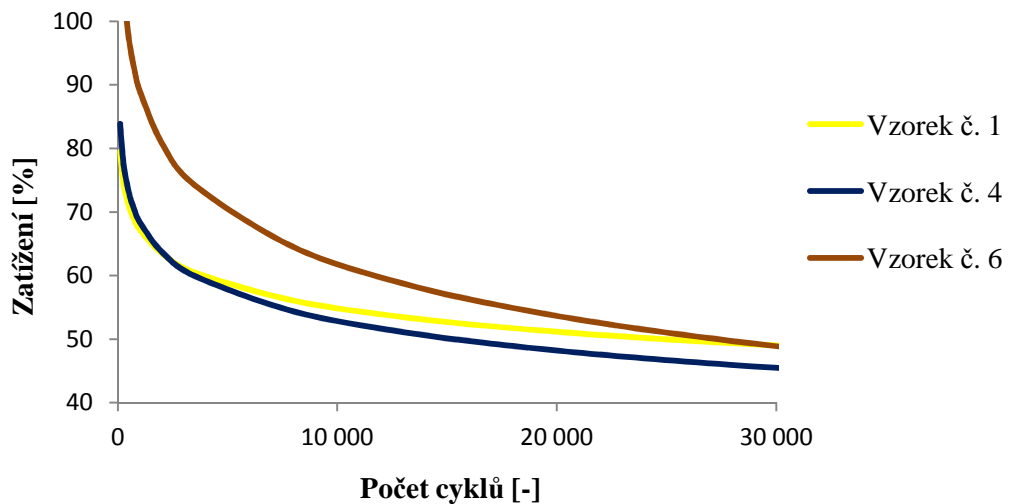
Na obrázku 78 je zobrazena závislost velikosti zatížení na počtech cyklů, které vzorek č. 7 vydržel. Jak můžeme vidět z rovnice regrese a hodnoty spolehlivosti R , která je velmi nízká, tak křivka spojnice trendu nepřesně popisuje chování tohoto sendvičového vzorku při cyklickém zatížení.



Obr. 78: Křivka životnosti pro vzorek č. 7

8.2.1.5 Shrnutí naměřených dat

Pokud porovnáme jednotlivé vzorky mezi sebou (obrázek 79), tak se při vysokém zatížení nejlépe chová vzorek č. 6, který by i při zatížení 80% měl vydržet přibližně 2 000 cyklů. U vzorků č. 1 a 4 by se při stejném zatížení pohybovaly počty cyklů kolem 140.



Obr. 79: Křivky životnosti testovaných vzorků

Jak už bylo dříve zmíněno, tak vzorky č. 1 a 4 se lišily pouze výrobním postupem, kdy u vzorku č. 4 byly použity lisovací dorazy. Můžeme opět vidět, že tento výrobní postup neměl téměř žádný vliv na výsledné únavové chování těchto dvou vzorků.

8.2.2 Stanovení mechanických vlastností cyklickým ohybem

U vzorků č. 2, 3 a 5 jsme provedli cyklování při zatížení na 70% z maximální síly F_{max} . Vždy 5 000, 10 000 a 15 000 cyklů a zkoumali jsme následný pokles modulu pružnosti a meze pevnosti v ohybu.

8.2.2.1 Vzorek č. 2

Vzorek č. 2 vydržel i při zatížení 90% z F_{max} přes 20 000 cyklů při téměř nulové změně mechanických vlastností. V následující tabulce 21 jsou uvedeny naměřené hodnoty po nacyklování a provedení trojbodové statické zkoušky v ohybu.

Tab. 21: Naměřená a vyhodnocená data pro měření vzorku č. 2

Vzorek č. 2		Měření č.						Průměr. hodnota	Směr. odchylka
Počet cyklů		1	2	3	4	5	6		
5 000	E_f [MPa]	4 000	4 130	4 140	4 190	4 240	4 190	4 148	83
	σ_{fmax} [MPa]	37,0	36,2	35,2	36,1	37,8	36,1	36,40	0,89
10 000	E_f [MPa]	4 040	0,58 ¹⁾	3 980	3,61 ¹⁾	4 030	4 090	4 035	45
	σ_{fmax} [MPa]	30,9	40,5	31,6	40,3	35,6	35,6	35,75	4,10
15 000	E_f [MPa]	4 070	4 370	4 400	4 150	3 630	3 250	3 978	452
	σ_{fmax} [MPa]	36,2	33,7	34,4	32,9	34,9	36,2	34,72	1,33

¹⁾ Hodnota byla z měření vyřazena kvůli značné odchylce od ostatních naměřených hodnot

Tab. 22: Shrnutí naměřených dat vzorku č. 2

Počet cyklů	1	5 000	10 000	15 000
E_f [MPa]	5 430	4 148	4 035	3 978
σ_{fmax} [MPa]	36,90	36,40	35,75	34,72

8.2.2.2 Vzorek č. 3

Vzorek č. 3 vydržel i při zatížení 80% z F_{max} přes 25 000 cyklů při téměř nulové změně mechanických vlastností. V následující tabulce 23 jsou uvedeny naměřené hodnoty po nacyklování a provedení trojbodové statické zkoušky v ohyby.

Tab. 23: Naměřená a vyhodnocená data pro měření vzorku č. 3

Vzorek č. 3		Měření č.				Průměrná hodnota	Směrodatná odchylka
Počet cyklů		1	2	3	5		
5 000	E_f [MPa]	2 790	10,1 ¹⁾	2 790	2 200	2 593	340
	σ_{fmax} [MPa]	22,1	21,6	22,1	23,5	22,33	0,82
10 000	E_f [MPa]	2 340	1 700	1 840	2 480	2 090	378
	σ_{fmax} [MPa]	20,4	22,9	24,4	21,0	22,18	1,83
15 000	E_f [MPa]	2 020	2 040	1 850	1 990	1 975	86
	σ_{fmax} [MPa]	21,4	21,3	22,4	21,7	21,70	0,50

¹⁾ Hodnota byla z měření vyřazena kvůli značné odchylce od ostatních naměřených hodnot

Tab. 24: Shrnutí naměřených dat vzorku č. 3

Počet cyklů	1	5 000	10 000	15 000
E_f [MPa]	2 986	2 593	2 090	2 075
σ_{fmax} [MPa]	22,56	22,33	22,18	19,20

8.2.2.3 Vzorek č. 5

Vzorek č. 5 vydržel i při zatížení 80% z F_{max} přes 30 000 cyklů při téměř nulové změně mechanických vlastností. V následující tabulce 25 jsou uvedeny naměřené hodnoty po nacyklování a provedení trojbodové statické zkoušky v ohybu.

Tab. 25: Naměřená a vyhodnocená data pro měření vzorku č. 5

Vzorek č. 5		Měření č.					Průměrná hodnota	Směrodatná odchylka
Počet cyklů		1	2	3	4	5		
5 000	E_f [MPa]	6 470	6 450	5 720	5 390	5 480	5 902	524
	σ_{fmax} [MPa]	48,7	46,4	45,8	45,0	46,1	46,40	1,39
10 000	E_f [MPa]	5 800	5 760	5 690	5 300	5 350	5 580	237
	σ_{fmax} [MPa]	45,4	44,1	44,3	45,8	45,1	44,94	0,72
15 000	E_f [MPa]	5 160	5 090	0,33 ¹⁾	5 540	5 330	5 280	200
	σ_{fmax} [MPa]	41,4	41,7	41,8	44,6	45,5	43,00	1,90

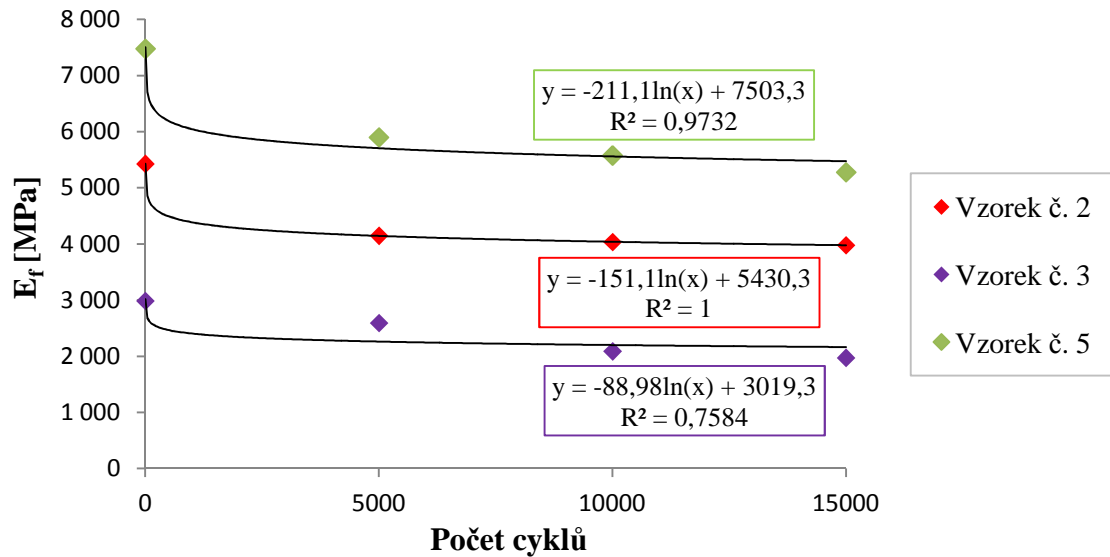
¹⁾ Hodnota byla z měření vyřazena kvůli značné odchylce od ostatních naměřených hodnot

Tab. 26: Shrnutí naměřených dat vzorku č. 5

Počet cyklů	1	5 000	10 000	15 000
E_f [MPa]	7 480	5 902	5 580	5 280
σ_{fmax} [MPa]	49,14	46,40	44,94	43,00

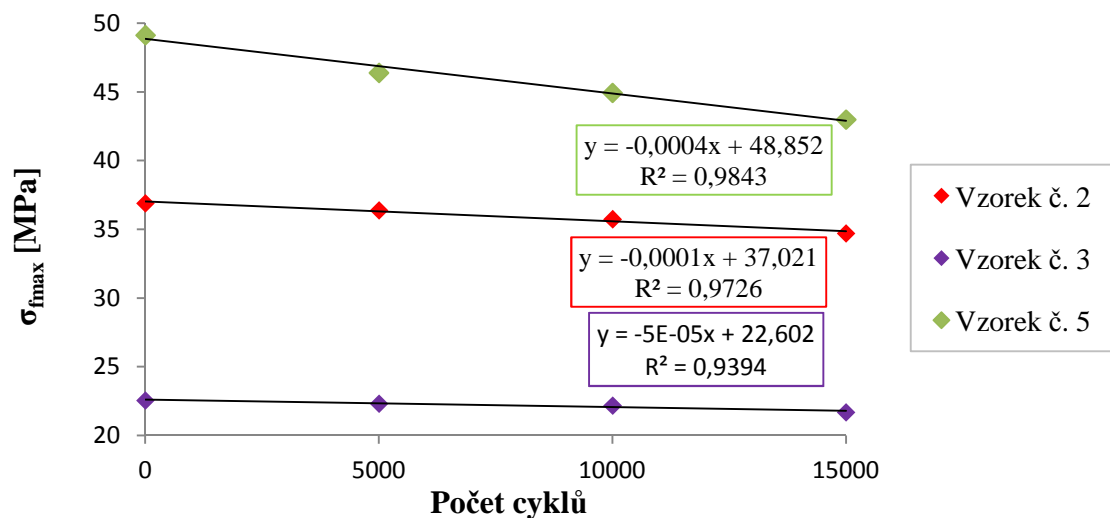
8.2.2.4 *Shrnutí naměřených dat*

Na obrázku 80 je znázorněna závislost modulů pružnosti v ohybu na počtech cyklů, kterými byl daný vzorek necyklován. Závislost je přibližně logaritmická, kdy se po určitých počtech cyklů velikost modulu pružnosti v ohybu už výrazně nemění.



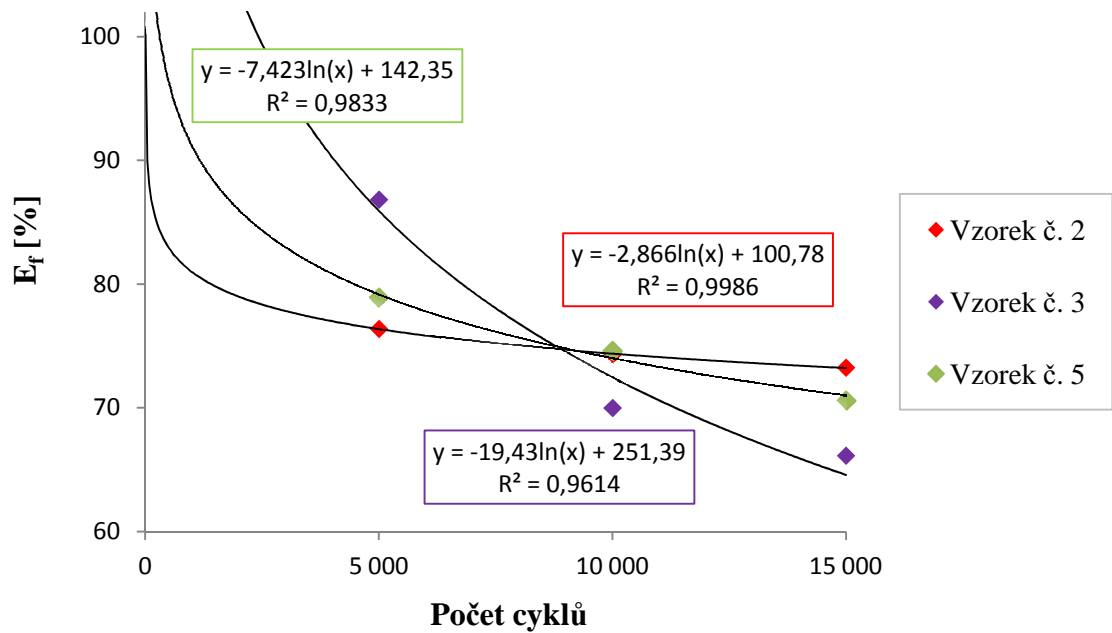
Obr. 80: Závislost modulu pružnosti v ohybu na počtech cyklů

Závislost meze pevnosti v ohybu na počtech cyklů (obrázek 81) má zhruba lineární chování, kdy se zvyšujícím se počtem cyklů nepatrně klesá samotná mez pevnosti v ohybu.



Obr. 81: Závislost meze pevnosti v ohybu na počtech cyklů

Pokud jako základní hodnotu modulu pružnosti v ohybu (obrázek 82), případně meze pevnosti v ohybu (obrázek 83), vezmeme hodnotu před samotným cyklováním a podíváme se na procentuální pokles těchto veličin, tak můžeme podrobněji srovnat jednotlivé materiály mezi sebou.

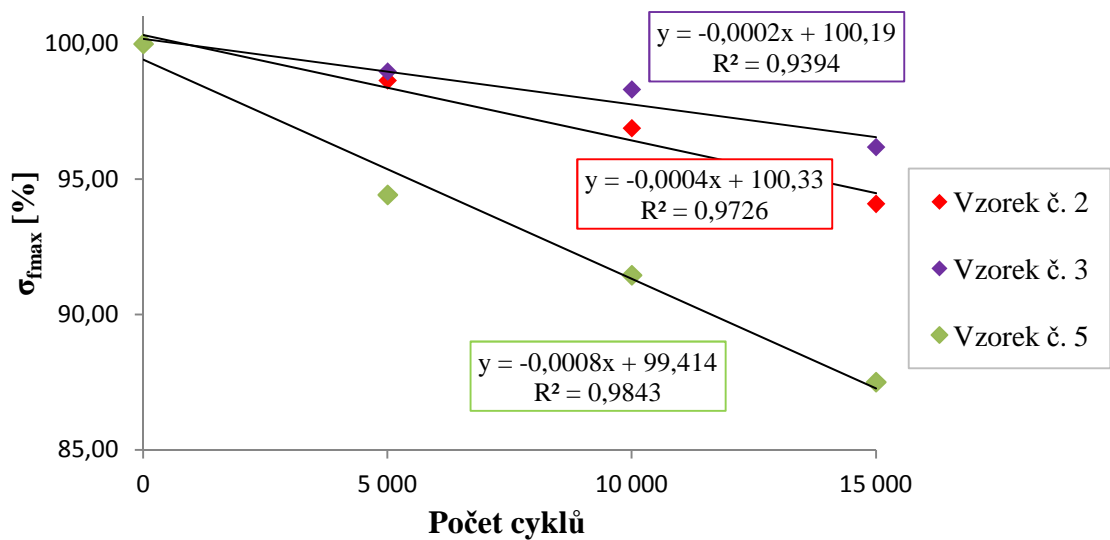


Obr. 82: Závislost modulu pružnosti v ohybu na počtech cyklů

Vzorek č. 2 se i při malém počtu cyklů poměrně rychle dostává na hodnotu svého modulu pružnosti kolem 80%. Oproti tomu vzorek č. 3 má až přibližně do 9 000 cyklů výrazně vyšší procento modulu pružnosti. Tento vzorek měl jako jediný ze všech zkušebních vzorků hliníkovou voštinu o tloušťce 16 mm. U vzorku č. 5 je pokles modulu pružnosti plynulý.

Jestliže srovnáme materiály z hlediska meze pevnosti v ohybu, tak je zde zřejmý pouze malý pokles této hodnoty, jak můžeme vidět i ze směrnic křivek.

Nejlépe se choval vzorek č. 3, který měl po 15 000 cyklech stále mez pevnosti v ohybu přes 95%. Zajímavostí je vzorek č. 5, kde byl oproti vzorku č. 2 použit fenolický prepreg s vyšší přílnavostí k hliníkovým materiálům. Jeho směrnice křivky je vzhledem ke vzorku č. 2 dvojnásobná a tudíž použití tohoto speciálního prepregu nám výrazně nezlepší jeho mechanické vlastnosti pro dynamické zatížení.



Obr. 83: Závislost meze pevnosti v ohybu na počtech cyklů

9 PEEL TEST

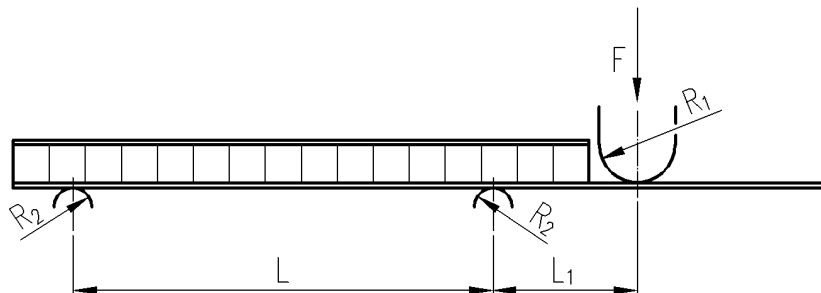
Peel test byl prováděn na univerzálním zkušebním stroji *ZWICK 1456*, který má následující základní technické údaje:

- maximální posuv příčnicku: $800 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$
- snímače síly: $2,5 \text{ kN}$ a 20 kN
- teplotní komora: -80°C / $+250^\circ\text{C}$

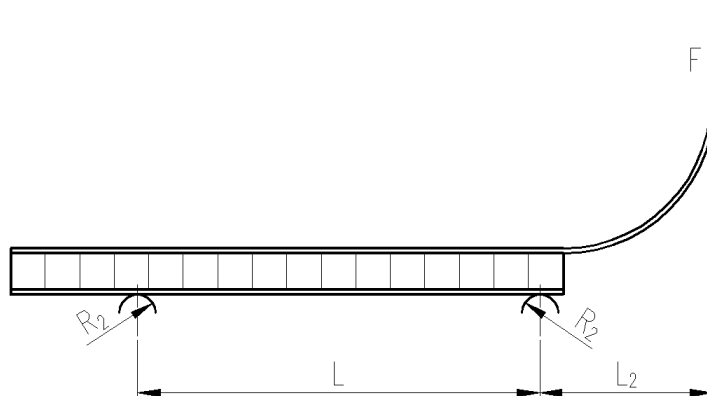
Pro vyhodnocení výsledků byl použit instalovaný software *TestXpert v 2.1.*

9.1 Nastavující parametry zkoušky

Samotná zkouška byla prováděna ve dvou modifikacích, tlakové a tahové. První modifikace – tlaková (obrázek 84) byla použita pro sendvičové desky, které měly tuhou vnější vrstvu. A druhá modifikace – tahová (obrázek 85) byla pro sendvičové desky s ohebnou vnější vrstvou.



Obr. 84: Peel test pro sendvičové desky s tuhou vnější vrstvou



Obr. 85: Peel test pro sendvičové desky s ohebnou vnější vrstvou

Před provedením samotné zkoušky bylo nastaveno několik důležitých parametrů:

- vzdálenost podpěr: $L = 70 \text{ mm}$
- vzdálenost mezi krajní podpěrrou a zatěžující deskou: $L_1 = 30 \text{ mm}$
- vzdálenost mezi krajní podpěrrou a čelistmi: $L_2 = 30 \text{ mm}$
- poloměr zatěžující desky: $R_1 = 5 \text{ mm}$
- poloměr opěrných desek: $R_2 = 2 \text{ mm}$
- předzatížení: 2 N
- rychlost k dosažení předzatížení: $5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$
- rychlost zatěžování: $10 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$



Obr. 86: Průběh peel testu – tlaková modifikace

9.2 Naměřená a vyhodnocená data

V následujících tabulkách je vyhodnocený tento parametr:

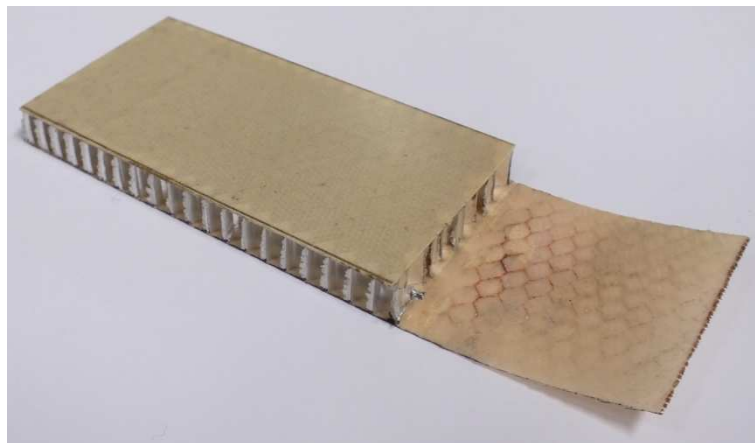
- F – síla potřebná k odlupu vnější vrstvy od jádra [N]

9.2.1 Vzorek č. 1

Tento vzorek byl zatěžován podle modifikace č. 2 – tahová (obrázek 85). V následující tabulce 27 jsou uvedeny naměřené hodnoty.

Tab. 27: Naměřená a vyhodnocená data pro měření vzorku č. 1

Vzorek č. 1	Měření č.					Průměrná hodnota	Směrodatná odchylka
	1	2	3	4	5		
$n = 5$	1	2	3	4	5		
$F [N]$	23,1	19,8	17,0	28,4	22,8	22,22	4,25



Obr. 87: Sendvičový vzorek č. 1 na peel test

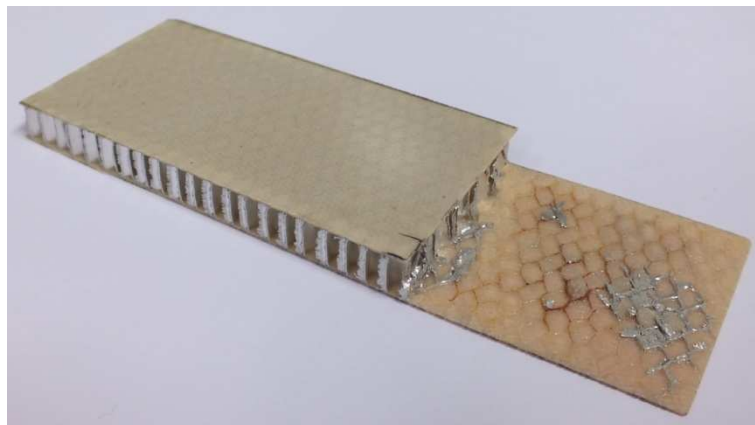
9.2.2 Vzorek č. 2

Tento vzorek byl zatěžován podle modifikace č. 1 – tlaková (obrázek 84). V následující tabulce 28 jsou uvedeny naměřené hodnoty.

Tab. 28: Naměřená a vyhodnocená data pro měření vzorku č. 2

Vzorek č. 2	Měření č.					Průměrná hodnota	Směrodatná odchylka
	1	2	3	4	5		
$n = 5$							
$F [N]$	39,8 ¹⁾	69,8	62,9	78,1	73,4	71,05	6,41

¹⁾ Hodnota byla z měření vyřazena kvůli značné odchylce od ostatních naměřených hodnot



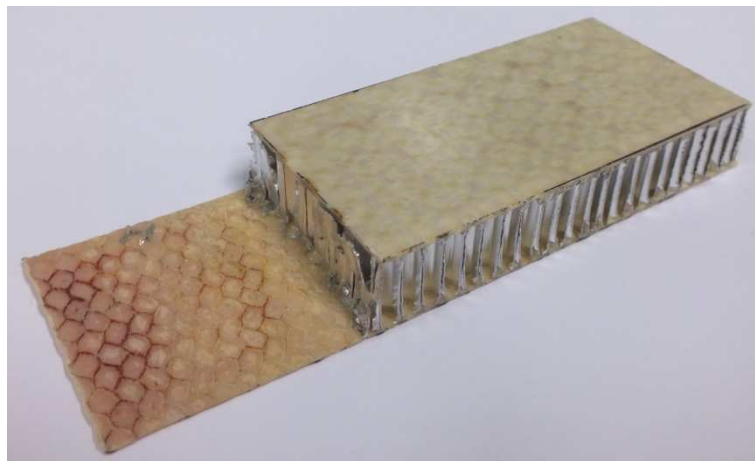
Obr. 88: Sendvičový vzorek č. 2 na peel test

9.2.3 Vzorek č. 3

Tento vzorek byl zatěžován podle modifikace č. 1 – tlaková (obrázek 84). V následující tabulce 29 jsou uvedeny naměřené hodnoty.

Tab. 29: Naměřená a vyhodnocená data pro měření vzorku č. 3

Vzorek č. 3	Měření č.					Průměrná hodnota	Směrodatná odchylka
	<i>n</i> = 5	1	2	3	4		
<i>F</i> [N]	97,9	92,4	102,0	131,0	133,0	111,26	19,25



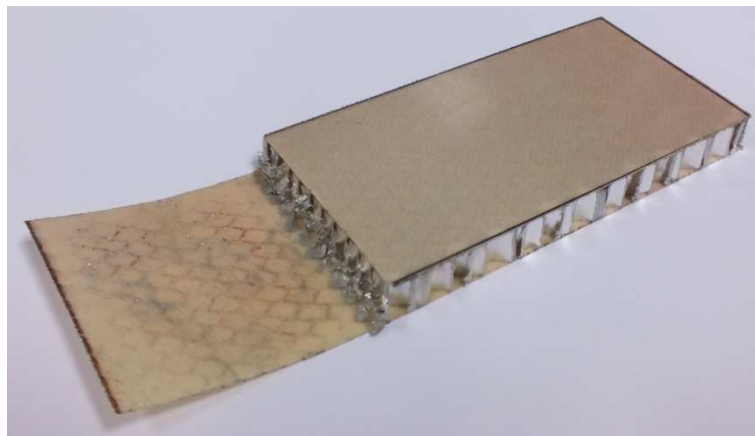
Obr. 89: Sendvičový vzorek č. 3 na peel test

9.2.4 Vzorek č. 4

Tento vzorek byl zatěžován podle modifikace č. 2 – tahová (obrázek 85). V následující tabulce 30 jsou uvedeny naměřené hodnoty.

Tab. 30: Naměřená a vyhodnocená data pro měření vzorku č. 4

Vzorek č. 4	Měření č.					Průměrná hodnota	Směrodatná odchylka
	1	2	3	4	5		
$n = 5$							
$F [N]$	30,1	19,8	29,8	30,4	30,2	28,06	4,62



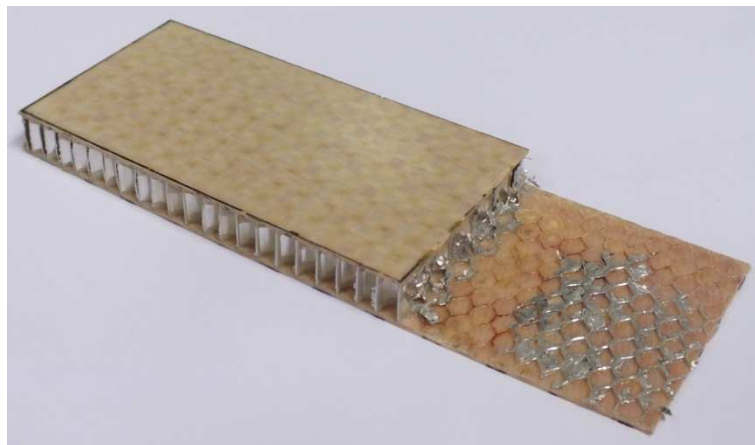
Obr. 90: Sendvičový vzorek č. 4 na peel test

9.2.5 Vzorek č. 5

Tento vzorek byl zatěžován podle modifikace č. 1 – tlaková (obrázek 84). V následující tabulce 31 jsou uvedeny naměřené hodnoty.

Tab. 31: Naměřená a vyhodnocená data pro měření vzorku č. 5

Vzorek č. 5	Měření č.					Průměrná hodnota	Směrodatná odchylka
	1	2	3	4	5		
$n = 5$	1	2	3	4	5		
$F [N]$	230	177	199	160	179	189,00	26,77



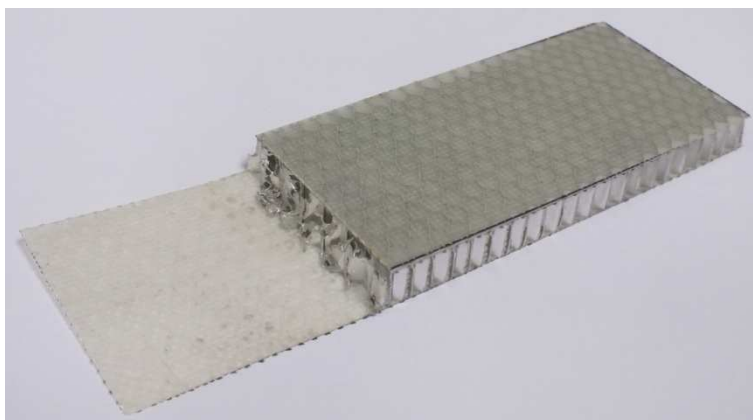
Obr. 91: Sendvičový vzorek č. 5 na peel test

9.2.6 Vzorek č. 6

Tento vzorek byl zatěžován podle modifikace č. 2 – tahová (obrázek 85). V následující tabulce 32 jsou uvedeny naměřené hodnoty.

Tab. 32: Naměřená a vyhodnocená data pro měření vzorku č. 6

Vzorek č. 6	Měření č.					Průměrná hodnota	Směrodatná odchylka
	1	2	3	4	5		
$n = 5$							
$F [N]$	47,7	31,1	33,0	29,5	30,0	34,26	7,63



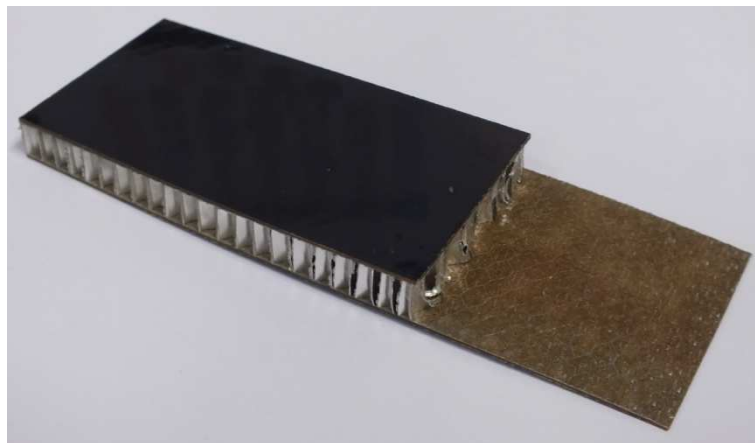
Obr. 92: Sendvičový vzorek č. 6 na peel test

9.2.7 Vzorek č. 7

Tento vzorek byl zatěžován podle modifikace č. 1 – tlaková (obrázek 84). V následující tabulce 33 jsou uvedeny naměřené hodnoty.

Tab. 33: Naměřená a vyhodnocená data pro měření vzorku č. 7

Vzorek č. 7	Měření č.					Průměrná hodnota	Směrodatná odchylka
	1	2	3	4	5		
$n = 5$							
$F [N]$	23,6	15,7	37,0	12,0	25,5	22,76	9,70



Obr. 93: Sendvičový vzorek č. 7 na peel test

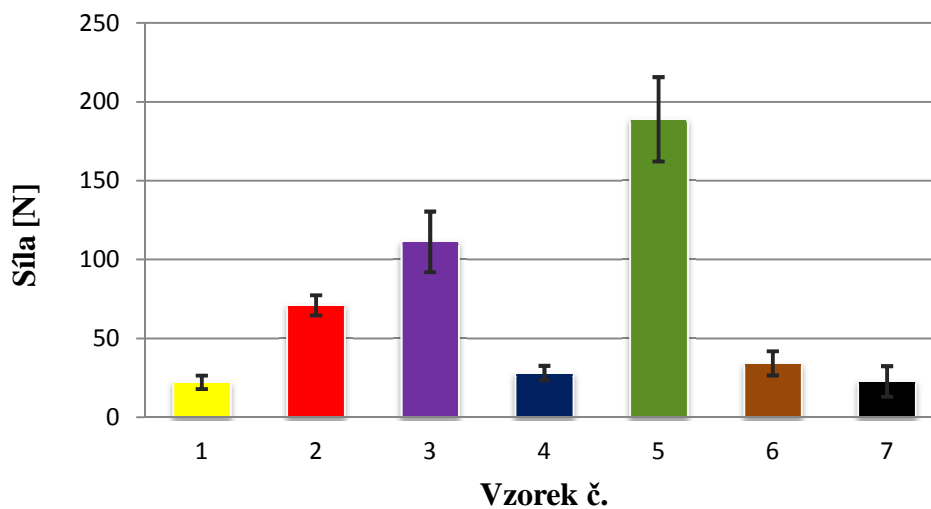
9.2.8 Shrnutí naměřených dat

V následující tabulce 34 jsou shrnuty síly potřebné k odlupu vnější vrstvy od jádra u všech zkušebních vzorků a na obrázku 94 je vidět grafické shrnutí naměřených výsledků.

Tab. 34: Shrnutí naměřených dat peel testu

Vzorek č.	Síla potřebná k odlupu vnější vrstvy od jádra F [N]
1	$22,22 \pm 4,25$
2	$71,05 \pm 6,41$
3	$111,26 \pm 19,25$
4	$28,06 \pm 4,62$
5	$189,00 \pm 26,77$
6	$34,26 \pm 7,63$
7	$22,76 \pm 9,70$

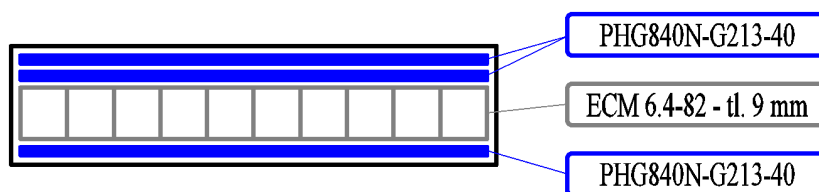
Výrazně vyšší hodnoty naměřených sil potřebných k odlupu mají vzorky č. 3 a č. 5, kdy byl použit prepreg *PHG840N-F300-47*, který má lepší adhezi k hliníkovým materiálům, což se zde projevilo.



Obr. 94: Grafické shrnutí naměřených výsledků peel testu

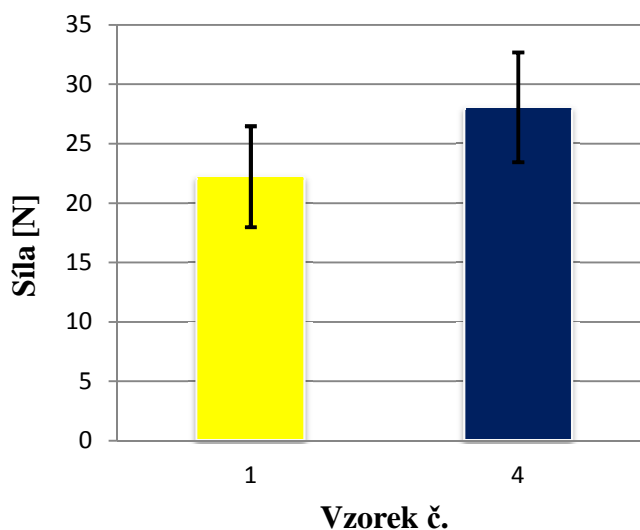
Opět se i zde ukázala u vzorku č. 7 nekonstantní adheze mezi hliníkovou voštinou a vnější vrstvou z vysokotlakého laminátu *HPL* zapříčiněná použitím pouze jednoho epoxidového prepregu *TV 45 EMT 125 PLUS*. Rozdíl mezi nejvyšší naměřenou hodnotou ($37,0\text{ N}$) a nejnižší ($12,0\text{ N}$) je 25 N .

Pokud se zaměříme více na vzorek č. 1 v porovnání se vzorkem č. 4. Vzorek č. 4 měl stejné materiálové složení jako vzorek č. 1 (obrázek 95), ale lišil se pouze výrobním postupem, kdy u vzorku č. 4 byly po obvodu sendvičové desky použity lisovací dorazy tloušťky 10 mm .



Obr. 95: Materiálové složení vzorku č. 1 a 4

Jak je z grafu (obrázek 96) vidět, tak použité dorazy nám hodnotu síly potřebnou na odlup výrazně neovlivnily. Je to způsobné tím, že při použití technologie vakuového lisování prepregů se vakuová fólie nalisuje kolem dorazů, ale ve střední části desky už tyto dorazy nemají na výslednou tloušťku desky vliv. Dorazy by měly vliv pouze s použitím jiné výrobní technologie, například u lisování prepregů pomocí tzv. Crush Core technologie (kapitola 2.4.1)



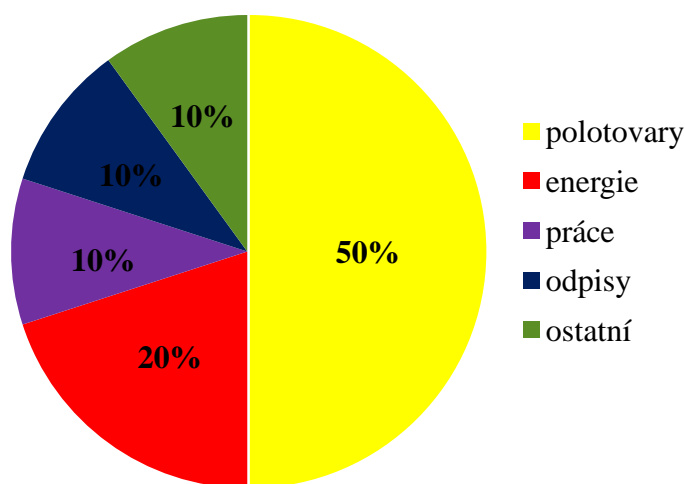
Obr. 96: Síly potřebné na odlup u vzorků č. 1 a 4

10 EKONOMICKÁ BILANCE

Ekonomickou bilanci můžeme rozdělit do dvou hlavních kategorií, a to na materiálové náklady a na výrobní náklady. Materiálové náklady a výrobní náklady mají přibližně stejnou hodnotu.

10.1 Materiálové náklady

Materiálové náklady se dále dělí na několik typů nákladů, které jsou procentuálně vyjádřeny na obrázku 97.



Obr. 97: Rozdělení materiálových nákladů

V následující tabulce 35 jsou uvedeny ceny použitých materiálů.

Tab. 35: Cena použitých materiálů

Materiál	Cena za 1 m ² [Kč vč. DPH]
fenolický prepreg PHG840N-G213-40	330,-
fenolický prepreg PHG840N-F300-47	250,-
epoxidový prepreg TV 45 EMT 125 PLUS	370,-
vysokotlaký laminát HPL	190,-
hliníková voština ECM 6.4-82 tloušťky 9 mm	410,-
hliníková voština ECM 6.4-82 tloušťky 16 mm	600,-

V tabulce 36 pak najdeme ceny jednotlivých sendvičových desek dle použitých materiálů vztahované na 1 m^2 a v tabulce 37 nakonec celkové materiálové náklady.

Tab. 36: Cena jednotlivých typů sendvičových desek

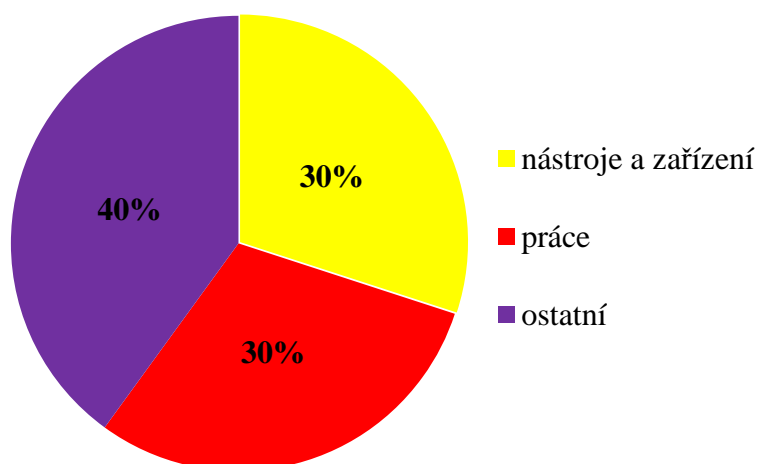
Vzorek č.	Použité materiály	Cena za 1 m^2 [Kč vč. DPH]
1	3x fenolický prepreg PHG840N-G213-40 hliníková voština ECM 6.4-82 tl. 9 mm	1 400,-
2	4x fenolický prepreg PHG840N-G213-40 hliníková voština ECM 6.4-82 tl. 9 mm	1 730,-
3	2x fenolický prepreg PHG840N-G213-40 2x fenolický prepreg PHG840N-F300-47 hliníková voština ECM 6.4-82 tl. 16 mm	1 760,-
4	3x fenolický prepreg PHG840N-G213-40 hliníková voština ECM 6.4-82 tl. 9 mm	1 400,-
5	2x fenolický prepreg PHG840N-G213-40 2x fenolický prepreg PHG840N-F300-47 hliníková voština ECM 6.4-82 tl. 9 mm	1 570,-
6	3x epoxidový prepreg TV 45 EMT 125 PLUS hliníková voština ECM 6.4-82 tl. 9 mm	1 600,-
7	2x vysokotlaký laminát HPL 2x epoxidový prepreg TV 45 EMT 125 PLUS hliníková voština ECM 6.4-82 tl. 9 mm	1 530,-

Tab. 37: Materiálové náklady

Vzorek č.	Polotovary (50 %)	Práce (20 %)	Energie (10 %)	Odpisy (10 %)	Ostatní (10 %)	Celkové materiálové náklady
1	1 400,-	560,-	280,-	280,-	280,-	2 800,-
2	1 730,-	692,-	346,-	346,-	346,-	3 460,-
3	1 760,-	704,-	352,-	352,-	352,-	3 520,-
4	1 400,-	560,-	280,-	280,-	280,-	2 800,-
5	1 570,-	628,-	314,-	314,-	314,-	3 140,-
6	1 600,-	640,-	320,-	320,-	320,-	3 200,-
7	1 530,-	612,-	306,-	306,-	306,-	3 060,-

10.2 Výrobní náklady

Výrobní náklady se dále dělí na několik typů nákladů, které jsou procentuálně vyjádřeny na obrázku 98.



Obr. 98: Rozdělení výrobních nákladů

Tab. 38: Výrobní náklady

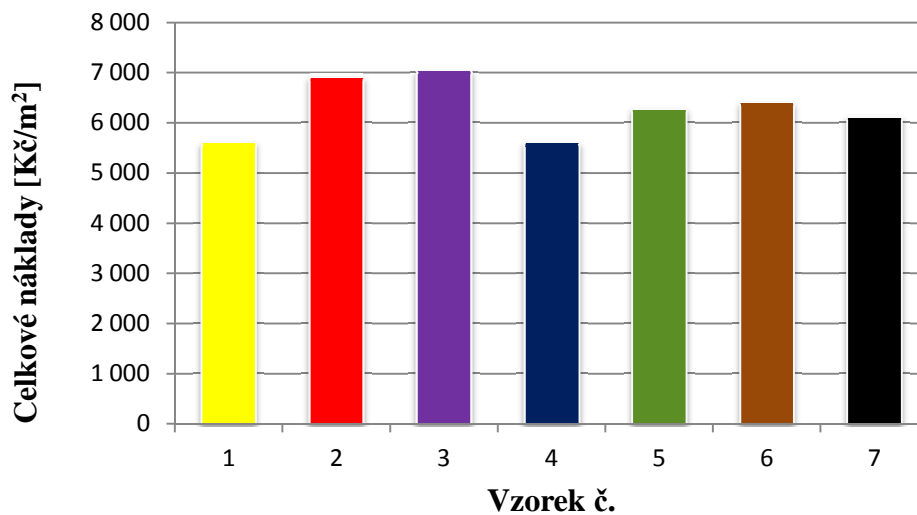
Vzorek č.	Nástroje a zařízení (30 %)	Práce (30 %)	Ostatní (40 %)	Celkové výrobní náklady
1	840,-	840,-	1 120,-	2 800,-
2	1 038,-	1 038,-	1 384,-	3 460,-
3	1 056,-	1 056,-	1 408,-	3 520,-
4	840,-	840,-	1 120,-	2 800,-
5	942,-	942,-	1 256,-	3 140,-
6	960,-	960,-	1 280,-	3 200,-
7	918,-	918,-	1 224,-	3 060,-

10.3 Celkové náklady

Celkové náklady (tabulka 39) představují součet materiálových nákladů a výrobních nákladů.

Tab. 39: Celkové náklady

Vzorek č.	Materiálové náklady	Výrobní náklady	Celkové náklady
1	2 800,-	2 800,-	5 600,-
2	3 460,-	3 460,-	6 900,-
3	3 520,-	3 520,-	7 040,-
4	2 800,-	2 800,-	5 600,-
5	3 140,-	3 140,-	6 280,-
6	3 200,-	3 200,-	6 400,-
7	3 060,-	3 060,-	6 120,-



Obr. 99: Grafické zobrazení celkových nákladů

Z grafu (obrázek 99) je patrné, že všechny vyrobené sendvičové desky mají přibližně stejnou ekonomickou hodnotu za 1 m^2 , která se pohybuje v rozmezí od 5 600,- do 7 040,- Kč.

ZÁVĚR

Cílem mé diplomové práce bylo studium vlivu druhů použitého materiálu kompozitních sendvičových struktur na výsledném chování při dynamickém namáhání a na velikost síly potřebné k odlupu vnější vrstvy od jádra.

Bylo vyrobeno celkem sedm druhů zkušebních vzorků, které se skládaly nejčastěji z materiálů používaných v dopravním průmyslu.

Ze všech testovaných vzorků vydržely dynamické namáhání nejlépe ty, které obsahovaly ve spodní vnější vrstvě dvě vrstvy prepregů. Konkrétně nejlépe na tom byl vzorek č. 3, jenž měl na vnějších vrstvách fenolický prepreg *PHG840N-G213-40* a mezi hliníkovým voštinovým jádrem (*ECM 6.4-82*) a vnější vrstvou byl použit fenolický prepreg *PHG840-F300-47*, který má vyšší adhezi k hliníkovým materiálům. Tento vzorek měl ale jako jediný hliníkovou voštinu tloušťky *16 mm* oproti ostatním vzorkům s tloušťkou voštiny *9 mm*. Mezi vzorky s voštinou o tloušťce *9 mm* měly dobré mechanické vlastnosti při dynamickém namáhání vzorky č. 2 a 5, kde vzorek č. 2 byl složený z dvou fenolických prepregů *PHG840-G213-40* na každé vnější vrstvě, a vzorek č. 5 měl totožné složení jako vzorek č. 3 pouze s rozdílnou tloušťkou voštiny.

Tyto tři vzorky byly nejprve testovány, jako ostatní vzorky, pomocí několika velikostí zatížení až do jejich porušení. Nicméně k porušení ani při vysokých hodnotách zatížení nedošlo. Proto jsme se rozhodli provést u těchto vzorků při zatížení 70% z F_{max} vždy nacyklování na *5 000*, *10 000* a *15 000* cyklů a zjistit úbytek modulu pružnosti a meze pevnosti v ohybu. U vzorků č. 2 a 3 jsme i po *15 000* cyklech dosahovali ještě kolem 95% meze pevnosti, u vzorku č. 5 přibližně 88% .

U ostatních vzorků byla provedena únavová životnost, kdy došlo k jejich porušení, a byla sestrojena klasická křivka životnosti. Vzorek č. 7 složený ze dvou desek vysokotlakého laminátu *HPL*, dvou epoxidových prepregů *TV 45 EMT 125 PLUS* a hliníkového voštinového jádra tloušťky *9 mm* není příliš vhodný pro dynamické zatěžování, protože u něj docházelo ke značnému rozptylu mezi naměřenými hodnotami. V případě, že bychom chtěli vysokotlaký laminát *HPL* použít v prostředí, kde bude docházet k dynamickému zatížení, tak bychom museli použít více vrstev prepregu mezi *HPL* deskou a jádrem.

Velikost síly potřebné k odlupu vnější vrstvy od jádra byla zjišťována pomocí dvou modifikací peel testu, tlakové a tahové, kde zvolená modifikace závisela na tuhosti vnější vrstvy.

Ve výsledných hodnotách naměřených sil se projevilo použití fenolického prepregu *PHG840-F300-47*, který má lepší adhezi vůči hliníkovým materiálům. Proto jsme u vzorků č. 3 a 5 dosáhli výrazně vyšších hodnot naměřených sil, než u ostatních vzorků. Při použití dvou vrstev prepregu je síla potřebná k odlupu až trojnásobně vyšší než při použití prepregu jednoho. U vzorku č. 7 s vysokotlakým laminátem *HPL* jsme naměřili značně velkou odchylku mezi jednotlivými naměřenými hodnotami opět způsobenou špatnou adhezí mezi hliníkovou voštinou a *HPL* deskou.

V neposlední řadě jsme se zaměřili na ekonomické zhodnocení výrobních nákladů na jednotlivé typy vyráběných sendvičových desek, které se pohybují v rozmezí od 5 600,- do 7 040,- Kč za m^2 . Můžeme tedy říci, že jsou téměř identické a neřadí se tedy mezi hlavní parametry při výběru typu sendvičové desky.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] EHRENSTEIN, Gottfried W. *Polymerní kompozitní materiály*. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009, 351 s. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [2] MACHEK, Václav a Jaromír SODOMKA. *Nauka o materiálu*. Vyd. 1. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2008, 86 s. ISBN 978-80-01-03927-4.
- [3] FABRIGER, Daniel. *Technologie výroby sendvičových kompozitních struktur vakuovou infuzí pod pružnou folii* [online]. Zlín, 2011 [cit. 2012-12-07]. 124 s. Dostupné z: http://dspace.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/15882/fabriger_2011_dp.pdf?sequence=1. Diplomová práce. UTB ve Zlíně.
- [4] VRBKA, Jan. *Mechanika kompozitů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2008, 94 s.
- [5] LAŠ, Vladislav. *Mechanika kompozitních materiálů*. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2004, 154 s. ISBN 80-704-3273-X.
- [6] BAUMRUK, Martin. *Kompozitové materiály v leteckém průmyslu v ČR*. 2006.
- [7] BENÍČEK, Josef. *Mechanické chování laminátových struktur při nízkocyklovém namáhání* [online]. Zlín, 2008 [cit. 2012-10-09]. 116 s. Dostupné z: http://dspace.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/7300/ben%c3%ad%c4%8dek_2008_dp.pdf?sequence=1. Diplomová práce. UTB ve Zlíně.
- [8] DAĐOUREK, Karel. *Kompozitní materiály - druhy a jejich použití*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2007, 114 s.
- [9] JANČÁŘ, Josef. *Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitů*. 1. vyd. Brno: VUT, 2003, 194 s. ISBN 80-214-2443-5.
- [10] Fibre Reinforced Plastic: Sandwich Composite and Core Material. [online]. [cit. 2013-01-12]. Dostupné z: <http://www.fibre-reinforced-plastic.com/2010/12/sandwich-composite-and-core-material.html>
- [11] Advanced materials for aircraft interiors : CompositesWorld. [online]. [cit. 2013-02-03]. Dostupné z: <http://www.compositesworld.com/articles/advanced-materials-for-aircraft-interiors>
- [12] *Statické zkoušky* [online]. [cit. 2013-01-03]. Dostupné z: <http://home.zcu.cz/~dyxon/DATA/Nauka%20o%20M/Zkouska.pdf>

- [13] PK2 Kevlar® N636 Para-Aramid Fiber Honeycomb. Plastcore, 2010. Dostupné z: http://www.plascore.com/pdf/Plascore_PK2.pdf
- [14] BECKWITH, Scott W. *Sandwich Core Materials & Technologies – Part II*. Salt Lake City, UT: SAMPE International Technical Director and President, BTG Composites, Inc., 2009. Dostupné z: <http://www.sampe.org/news/TechTidbitsJuly09.pdf>
- [15] *Guide to Composites* [online]. [cit. 2012-11-14]. Dostupné z: <http://www.gurit.com/files/documents/guide-to-compositesv4pdf.pdf>
- [16] Trucks [online]. [cit. 2012-11-17]. Dostupné z: http://www.diabgroup.com/americas/u_markets/u_transport/u_trans_3.html
- [17] BAREŠ, Richard A. *Kompozitní materiály*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1988, 325 s.
- [18] Composite sandwiches 5M - Smart Technologies. [online]. [cit. 2012-11-17]. Dostupné z: <http://www.5m.cz/en/composite-sandwiches/>
- [19] Spray Lay-up - Fibre chopped in hand-held gun, fed into spray of catalysed resin directed at mould. [online]. [cit. 2012-11-21]. Dostupné z: <http://www.netcomposites.com/guide/spray-lay-up/51>
- [20] Composite Manufacturing Process - Resin Transfer Moulding. [online]. [cit. 2012-11-22]. Dostupné z: <http://www.jjmechanic.com/process/rtm.htm>
- [21] DYLAG, Zdislaw. *Únava materiálu a její zkoušení*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1968, 253 s.
- [22] VĚCHET, Stanislav a Petr KRÁL. *Únava materiálu*. 2004. Dostupné z: ja.kn.vutbr.cz/~janirek2/dok/materialy/7tUnava.doc
- [23] ŠUBA, Oldřich. *Dimenzování a navrhování výrobků z polymerů*. Vyd. 3. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2010, 112 s. ISBN 978-80-7318-948-8.
- [24] VLACH, Bohumil. *Únava materiálu - Úvod*. Brno: ÚMI FS VUT, 2007. Dostupné z: ime.fme.vutbr.cz/files/vyuka/GS0/08a%20-%20unava1.doc
- [25] AGARWAL, Bhagwan D. a Lawrence J. BROUTMAN. *Vláknové kompozity*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1987, 294 s.
- [26] Únava materiálu - IPM. [online]. [cit. 2012-12-01]. Dostupné z: www.ipm.cz/group/fracture/vyuka/doc/P10.ppt

- [27] *Technologie* [online]. [cit. 2012-12-28]. Dostupné z: <http://www.volny.cz/zkorinek/technologie.pdf>
- [28] *Prepreg Technology* [online]. [cit. 2012-12-28]. Dostupné z: http://www.hexcel.com/Resources/DataSheets/Brochure-Data-Sheets/Prepreg_Technology.pdf
- [29] ČSN EN 2746. *Letectví a kosmonautika - Sklem vyztužené plasty: Zkouška ohybem - Metoda tříbodového ohybu*. Praha: Český normalizační institut, 1999.
- [30] Sendvičové panely. [online]. [cit. 2013-02-24]. Dostupné z: <http://www.5mslovakia.sk/sendvieve-panely>
- [31] ZENKERT, Nordic Industrial Fund. Ed.: D. *The handbook of sandwich construction*. Cradley Heath, West Midlands: Engineering Materials Advisory Services Ltd. (EMAS), 1997. ISBN 978-094-7817-961.
- [32] CABRNOCH, Bohuslav. Současný stav a výhledy použití kompozitních materiálů v konstrukci velkých dopravních letadel. *TRANSFER - Výzkum a vývoj pro letecký průmysl: Nové poznatky a výsledky v oblasti materiálů, technologií, zkoušek a aplikací kompozitů v leteckém průmyslu ČR*. 2012, roč. 8, č. 17, s. 4. ISSN 1801 - 9315. Dostupné z: <http://www.vzlu.cz/download.php?file=694>
- [33] BELINGARDI, G., P. MARTELLA a L. PERONI. Fatigue analysis of honeycomb-composite sandwich beams: undamaged specimens. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2007, roč. 38, č. 4, s. 1183-1191. DOI: 10.1016/j.compositesa.2006.06.007. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359835X06001862>
- [34] BURMAN, M a D ZENKERT. Fatigue of foam core sandwich beams 1: undamaged specimens. *International Journal of Fatigue*. 1997, roč. 19, č. 7, s. 551-561. DOI: 10.1016/S0142-1123(97)00069-8. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0142112397000698>
- [35] DORWORTH, Louis C, Ginger L GARDINER a Greg M MELLEMA. *Essentials of advanced composite fabrication and repair*. Newcastle, Wash.: Aviation Supplies, c2012, xii, 291 p. ISBN 15-602-7752-1.
- [36] REINHART, Theodor J, Ginger L GARDINER a Greg M MELLEMA. *Composites*. Ohio: Metals Park, 1987, 983 s. ISBN 08-717-0279-7.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

AF	Aramid fiber	-
b	Šířka nosníku	mm
CF	Carbon fiber	-
E_1, E_2, E_3	Modul pružnosti části 1, 2, 3	MPa
E_f	Modul pružnost v ohybu	MPa
E_i	Modul pružnosti i-té částí	MPa
E_n	Modul pružnosti n-té části	MPa
E_O	Ohybový modul	MPa
EP-R	Epoxy resin	-
f	Frekvence	Hz
F	Síla potřebná k odlupu vnější vrstvy od jádra	N
F_A	Amplituda síly kmitu	N
F_{max}	Maximální síla	N
F_0	Zatížení nutné k překonání kroutícího momentu bubnu	N
F_S	Střední síla kmitu	N
GF	Glass fiber	-
h	Výška nosníku	mm
J_1, J_2, J_3	Kvadratický moment plochy průřezu 1,2,3	mm ⁴
J_n	Kvadratický moment plochy průřezu n-té části	mm ⁴
J_R	Kvadratický moment plochy redukovaného průřezu	mm ⁴
K_0	Ohybová tuhost	N.mm ²
L	Vzdálenost mezi podpěrami	mm
L_1	Vzdálenost mezi krajní podpěrou a zatěžující deskou	mm
L_2	Vzdálenost mezi krajní podpěrou a čelistmi	mm
M	Ohybový moment průřezu	Nmm

M_0	Ohybový moment	Nmm
N	Počet cyklů	-
n	Počet měření	-
P	Zatěžující síla	N
PA 6	Polyamid 6	-
PA 66	Polyamid 66	-
PAN	Polyakrylonitril	-
PBT	Polybutyltereftalát	-
PC	Polykarbonát	-
PE	Polyethylen	-
PET	Polyethyltereftalát	-
PF-R	Phenol formaldehyde resin	-
PMI	Polymethacrylimide	-
POM	Polyoximethylen	-
PP	Polypropylen	-
PS	Polystyren	-
PUR	Polyuretan	-
PVC	Polyvinylchlorid	-
r	Poloměr zakřivení podélné neutrální osy	mm
R_1	Poloměr zatěžující desky	mm
R_2	Poloměr opěrný desek	mm
R_e	Mez kluzu	MPa
r_i	Poloměr bubnu a jedna polovina tloušťky vnější vrstvy	mm
R_m	Mez pevnosti	MPa
r_o	Poloměr příruby a jedné poloviny tloušťky vnější vrstvy	mm
RTM	Resin transfer moulding	-

T	Doba kmitu	s
t_1	Tloušťka vnější vrstvy	mm
t_2	Tloušťka jádra	mm
T_o	Průměrná síla potřebná na odlup	N
UP-R	Unsaturated polyester resin	-
UV	Ultrafialové záření	-
VARI	Vacuum assisted resin infusion	-
VE-R	Vinyl ester resin	-
VFI	Vacuum foil infusion	-
W	Šířka vzorku	mm
W_{Fmax}	Práce potřebná na dosažení maximální síly	J
W_O	Modul průřezu v ohybu	mm ³
y	Vzdálenost od neutrální osy	mm
y_{Fmax}	Průhyb při mezi pevnosti	mm
Δd	Rozdíl hodnot průhybu dle zvoleného rozdílu působící síly ΔF	mm
ΔF	Zvolený rozdíl hodnot působící síly	N
$\Delta \sigma$	Rozkmit napětí	MPa
ε_{Fmax}	Poměrná deformace na mezi pevnosti	%
σ	Napětí	MPa
σ_a	Amplituda napětí	MPa
σ_{fmax}	Mez pevnosti v ohybu	MPa
σ_i	Ohybové napětí	MPa
σ_m	Střední napětí	MPa
σ_{max}	Maximální napětí	MPa
σ_{min}	Minimální napětí	MPa
σ_O	Ohybové napětí	MPa

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1: Schéma sendvičové konstrukce [10]	13
Obr. 2: Plátňová osnova.....	19
Obr. 3: Keprová osnova	19
Obr. 4: Atlasová osnova.....	20
Obr. 5: Košíková osnova [15].....	20
Obr. 6: Voština (šestihranný tvar) [13].....	23
Obr. 7: Kenworth T2000 [17]	25
Obr. 8: Vnitřní vybavení letounu [18]	26
Obr. 9: Řez stolkem do letadla [30].....	26
Obr. 10: Přehled materiálů použitých v konstrukci letadla Boeing B787 [32].....	26
Obr. 11: Rozdělení technologií výroby kompozitů	27
Obr. 12: Schéma ručního kladení	28
Obr. 13: Schéma nástřiku vláken s pryskyřicí [19]	29
Obr. 14: Schéma RTM/VARI [15]	30
Obr. 15: Schéma vakuové infúze [15]	31
Obr. 16: Schéma vakuového lisování prepregů [15]	32
Obr. 17: Výroba jednosměrně orientovaného prepregu[1].....	33
Obr. 18: Schéma navíjení [15].....	34
Obr. 19: Průběh poškozování u homogenních a vláknitých materiálů [1]	36
Obr. 20: Typy poškozování u sendvičových konstrukcí [23].....	37
Obr. 21: Průběh napětí v sendvičové struktuře [23]	38
Obr. 22: Zkouška jednoosým ohybem – a) třibodový, b) čtyřbodový.....	40
Obr. 23: Zatěžování při třibodovém ohybu [12].....	41
Obr. 24: Křivka závislosti – působící síla/průhyb [29].....	42
Obr. 25: Peel test pomocí navíjení na buben	43
Obr. 26: DCB peel test.....	44
Obr. 27: Peel test pomocí tlaku vzduchu	45
Obr. 28: Zátěžný cyklus: a) střídavý souměrný, b) pulzující [26].....	47
Obr. 29: Příklady zátěžných cyklů [22].....	48
Obr. 30: Křivka životnosti	49
Obr. 31: Schéma přístroje s rotující pákou [24].....	51
Obr. 32: Příklad únavové křivky [33].....	51

Obr. 33: Fenolický prepreg PHG840N-G213-40	54
Obr. 34: Fenolický prepreg PHG840N-F300-47	55
Obr. 35: Hliníková voština ECM 6.4-82.....	56
Obr. 36: Řezání prepregů na plotru M-1600 CV	57
Obr. 37: Příprava voštiny na řezání	58
Obr. 38: Naskládané vrstvy pro výrobu sendvičové desky	58
Obr. 39: Odtrhová tkanina	59
Obr. 40: Odvzdušňovací tkanina se dvěma přívody k vakuové pumpě.....	59
Obr. 41: Výrobní proces před a po vytvoření vakua.....	60
Obr. 42: Vytvrzovací pec	60
Obr. 43: Vytvrzovací program pro fenolické prepregy	61
Obr. 44: Vytvrzovací program pro epoxidové prepregy.....	61
Obr. 45: Orýsovaná sendvičová deska.....	62
Obr. 46: Materiálové složení vzorku č. 1.....	63
Obr. 47: Pohledová a nepohledová strana vzorku č. 1.....	63
Obr. 48: Materiálové složení vzorku č. 2.....	64
Obr. 49: Materiálové složení vzorku č. 3.....	64
Obr. 50: Detail osnovy prepregu nepohledové vrstvy	64
Obr. 51: Materiálové složení vzorku č. 4.....	65
Obr. 52: Nalisované dorazy na vzorku č. 4.....	65
Obr. 53: Materiálové složení vzorku č. 5.....	66
Obr. 54: Materiálové složení vzorku č. 6.....	66
Obr. 55: Detail vzorku č. 6	67
Obr. 56: Materiálové složení vzorku č. 7.....	67
Obr. 57: Detail orýsovaného vzorku č. 7	67
Obr. 58: Schéma složení sendvičových vzorků	68
Obr. 59: Průběh statické zkoušky v ohybu	70
Obr. 60: Schéma tříbodového zatěžování	71
Obr. 61: Závislost napětí na poměrné deformaci u vzorku č. 1	72
Obr. 62: Závislost napětí na poměrné deformaci u vzorku č. 2.....	73
Obr. 63: Závislost napětí na poměrné deformaci u vzorku č. 3.....	74
Obr. 64: Závislost napětí na poměrné deformaci u vzorku č. 4.....	75
Obr. 65: Závislost napětí na poměrné deformaci u vzorku č. 5.....	76

Obr. 66: Závislost napětí na poměrné deformaci u vzorku č. 6.....	77
Obr. 67: Závislost napětí na poměrné deformaci u vzorku č. 7.....	78
Obr. 68 Grafické shrnutí naměřených hodnot maximálních sil F_{\max}	79
Obr. 69: Materiálové složení vzorku č. 3.....	80
Obr. 70: Grafické shrnutí naměřených hodnot modulů pružnosti v ohybu E_f	80
Obr. 71: Materiálové složení vzorku č. 5.....	80
Obr. 72: Grafické shrnutí naměřených hodnot mezí pevnosti v ohybu $\sigma_{f\max}$	81
Obr. 73: Detail zkušebního stroje Instron 8871 při měření.....	82
Obr. 74: Schéma zatěžovacího cyklu.....	83
Obr. 75: Křivka životnosti pro vzorek č. 1.....	84
Obr. 76: Křivka životnosti pro vzorek č. 4.....	85
Obr. 77: Křivka životnosti pro vzorek č. 6.....	86
Obr. 78: Křivka životnosti pro vzorek č. 7.....	87
Obr. 79: Křivky životnosti testovaných vzorků.....	88
Obr. 80: Závislost modulu pružnosti v ohybu na počtech cyklů.....	92
Obr. 81: Závislost meze pevnosti v ohybu na počtech cyklů.....	92
Obr. 82: Závislost modulu pružnosti v ohybu na počtech cyklů.....	93
Obr. 83: Závislost meze pevnosti v ohybu na počtech cyklů.....	94
Obr. 84: Peel test pro sendvičové desky s tuhou vnější vrstvou.....	95
Obr. 85: Peel test pro sendvičové desky s ohebnou vnější vrstvou.....	95
Obr. 86: Průběh peel testu – tlaková modifikace.....	96
Obr. 87: Sendvičový vzorek č. 1 na peel test.....	97
Obr. 88: Sendvičový vzorek č. 2 na peel test.....	98
Obr. 89: Sendvičový vzorek č. 3 na peel test.....	99
Obr. 90: Sendvičový vzorek č. 4 na peel test.....	100
Obr. 91: Sendvičový vzorek č. 5 na peel test.....	101
Obr. 92: Sendvičový vzorek č. 6 na peel test.....	102
Obr. 93: Sendvičový vzorek č. 7 na peel test.....	103
Obr. 94: Grafické shrnutí naměřených výsledků peel testu.....	104
Obr. 95: Materiálové složení vzorku č. 1 a 4.....	105
Obr. 96: Síly potřebné na odlup u vzorků č. 1 a 4.....	105
Obr. 97: Rozdělení materiálových nákladů.....	106
Obr. 98: Rozdělení výrobních nákladů.....	108

Obr. 99: Grafické zobrazení celkových nákladů 109

SEZNAM TABULEK

Tab. 1: Vlastnosti vybraných vláken podle druhu skloviny [1].....	15
Tab. 2: Mechanické vlastnosti vybraných druhů aramidových vláken [1].....	16
Tab. 3: Vlastnosti jednosměrného vyztuženého laminátu aramidovým vláknem (obsah 65 až 70 objem. %) s epoxidovou matricí [1].....	16
Tab. 4: Porovnání mechanických vlastností přírodních a skelných vláken [1]	17
Tab. 5: Výhody a nevýhody použitých druhů materiálu voštin [14]	24
Tab. 6: Porovnání tuhosti a pevnosti v ohybu homogenních a sendvičových materiálů.....	39
Tab. 7: Základní parametry plotru M-1600 CV od firmy Zünd	57
Tab. 8: Shrnutí složení sendvičových vzorků.....	69
Tab. 9: Naměřená a vyhodnocená data pro měření vzorku č. 1.....	72
Tab. 10: Naměřená a vyhodnocená data pro měření vzorku č. 2.....	73
Tab. 11: Naměřená a vyhodnocená data pro měření vzorku č. 3.....	74
Tab. 12: Naměřená a vyhodnocená data pro měření vzorku č. 4.....	75
Tab. 13: Naměřená a vyhodnocená data pro měření vzorku č. 5.....	76
Tab. 14: Naměřená a vyhodnocená data pro měření vzorku č. 6.....	77
Tab. 15: Naměřená a vyhodnocená data pro měření vzorku č. 7.....	78
Tab. 16: Shrnutí naměřených dat pro statický jednoosý tříbodový ohyb	79
Tab. 17: Naměřená a vyhodnocená data pro měření vzorku č. 1.....	84
Tab. 18: Naměřená a vyhodnocená data pro měření vzorku č. 4.....	85
Tab. 19: Naměřená a vyhodnocená data pro měření vzorku č. 6.....	86
Tab. 20: Naměřená a vyhodnocená data pro měření vzorku č. 7.....	87
Tab. 21: Naměřená a vyhodnocená data pro měření vzorku č. 2.....	89
Tab. 22: Shrnutí naměřených dat vzorku č. 2	89
Tab. 23: Naměřená a vyhodnocená data pro měření vzorku č. 3.....	90
Tab. 24: Shrnutí naměřených dat vzorku č. 3	90
Tab. 25: Naměřená a vyhodnocená data pro měření vzorku č. 5.....	91
Tab. 26: Shrnutí naměřených dat vzorku č. 5	91
Tab. 27: Naměřená a vyhodnocená data pro měření vzorku č. 1.....	97
Tab. 28: Naměřená a vyhodnocená data pro měření vzorku č. 2.....	98
Tab. 29: Naměřená a vyhodnocená data pro měření vzorku č. 3.....	99
Tab. 30: Naměřená a vyhodnocená data pro měření vzorku č. 4.....	100
Tab. 31: Naměřená a vyhodnocená data pro měření vzorku č. 5.....	101

Tab. 32: Naměřená a vyhodnocená data pro měření vzorku č. 6.....	102
Tab. 33: Naměřená a vyhodnocená data pro měření vzorku č. 7.....	103
Tab. 34: Shrnutí naměřených dat peel testu.....	104
Tab. 35: Cena použitých materiálů	106
Tab. 36: Cena jednotlivých typů sendvičových desek.....	107
Tab. 37: Materiálové náklady	107
Tab. 38: Výrobní náklady	108
Tab. 39: Celkové náklady	109

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha P I: Materiálový list PHG840N-G213-40

Příloha P II: Materiálový list PHG840N-F300-47

Příloha P III: Materiálový list EMT 125 PLUS

Příloha P IV: Materiálový list TV 45 EMT 125 PLUS

Příloha P V: Materiálový list HPL

Příloha P VI: Materiálový list ECM 6.4-82

PŘÍLOHA P I: MATERIÁLOVÝ LIST PHG840N-G213-40**Provisional****PHG840N-G213-40**

- Fiber reinforced thermosetting preimpregnated material.
- Woven fabric of E-glass roving, US Style 590, plain weave preimpregnated with 40 % phenolic resin PHG840N
- Excellent FST behaviour
- Easy process ability and handling
- Long shelf and shop life
- Cure Temperature between 125°C and 155°C

Description

PHG840N-G213-40 consists of an E-glass fabric, impregnated with the phenolic resin PHG840N.

This resin is a halogen-free and self-adhesive phenolic system designed for wide variety of manufacturing processes, retarded flow during curing, excellent heat-release and smoke-density properties.

Composite structures are self-extinguishing under fire conditions. Monolithic structures can be easily manufactured with this prepreg. The curing can be performed by press,

vacuum and autoclave moulding with a pressure of at least 0.07 MPa.

The prepreg material is suitable for:

- Aviation and aerospace industries
- Railway transport and machine industries systems
- Marine and automotive applications

Prepreg Properties

	Test method	Value
Resin		Phenolic
Prepreg Weight	EN 2329	1367 +50 g/m ²
Volatile	EN 2330	< 8.0 %
Resin Flow	EN 2332	> 10 %
Tackiness		low to medium
Fibre Material		E-glass
Fabric Weight	EN 2331	820 g/m ² +5 %
Weave Style		plain weave
Service Temperature (Cured State)		-55°C to +90°C
Resin Content	EN 2331	40 +3%

Delivery Form and Storage

Prepreg sizes	Roll length / Roll width	25 / 1.0 - 1.27 m
Storage Life (from delivery date)	Days at RT / Month at -18°C	30 / 24

Curing Conditions

	Crush Core	Standard Cycle
Temperature	120°C/140°C/160°C	125/135/155°C
Cure Time	50 min/20 min/10 min	120/75/30min
Spec. Pressure	1.25 Mpa	0.4 MPa
Heat-up	None (hot-in)	3K/min from 60°C (max)
Cool-down	None (hot-out)	4K/min to 60°C
Remove material at	120°C/140°C/160°C	at least 60°C
Recommended curing process	Press, Autoclave, Vacuum-bag	Press, Autoclave, Vacuum-bag

Mechanical Properties (Provisional)

	Temp. [°C]	Standard	Results	
Flexural Strength (warp)	RT	ISO 178	400	MPa
Flexural Modulus (warp)	RT 80	ISO 178	20 --	GPa
Tensile Strength (warp)		ISO 527-4		MPa
Tensile Modulus (warp)		ISO 527-4		GPa
Compressive Strength (warp)		EN 2850	-- --	MPa
Compressive Modulus (warp)		EN 2850		GPa
Interlaminar Tensile Shear Strength (warp)	RT 80	AITM 1.0019/1B	20 --	MPa
Interlaminar Shear Strength				
Bearing strength				
Climbing Drum Peel ¹		EN 2243-3		N/75 mm
Bending Load (4-P.) ¹	RT 80	AITM 1.0018 Fig.2	-- --	N
T _g		TMA	>80	°C

¹)Sandwich structure



Burning Behaviour

		Test method	Max. mean values	
Flammability vertical, 60s flaming	burn length after flame time after flame time of drips	AITM 2.0002A	60 5 --	mm s s
Flammability vertical, 12s flaming				
Max. specific optical smoke density within 4 min	flaming mode	AITM 2.0007A	5	Ds
Heat release		AITM 2.0006	25	kW m²
Heat release rate		AITM 2.0006	25	kW*min m²

Disclaimer

The materials, products and services of the Gurit Group sold by the respective legal entity (the "Company") of the Gurit Group are subject to the Standard Conditions of Sale of the Company which are available on request or may be viewed at the website: www.gurit.com. Nothing in this document or any data sheet, brochure, prospectus, etc. (hereinafter referred to as "Documents"), nor any instruction or advice given as referred to in the Documents shall be deemed to alter, vary, supersede or waive any provision of Company's Standard Conditions of Sale or this Disclaimer, unless any such modification is specially agreed to in writing and signed by Company.

Although any information, instruction or advice contained or referred to in the Documents is given in good faith, no warranty or guarantee, express or implied, is made(i) that the results described herein will be obtained, or (ii) that the information, instruction or advice (whether written or oral) is complete, accurate and useful. Nothing contained in the Documents constitutes a representation or warranty, whether expressed or implied, as to any matter whatsoever.

The user should make test panels and conduct appropriate testing of any goods or materials supplied by the Company to ensure that they are suitable for the user's planned application. Such testing should include testing under conditions as close as possible to those which the final component may be subjected. Each user bears full responsibility for making its own determination as to the suitability of the recommendations and advice obtained by the Company for its own particular use.

To the extent of mandatory law, the Company and the Gurit Group expressly disclaim any liability, whether in contract, warranty, tort, negligence, strict liability or otherwise, for any and all damages, losses, injuries, costs or expenses resulting directly or indirectly from the reliance on any information contained in the Documents or from any advice (whether written or oral) given as referred to in the Documents.

The Company reserves the right to change specifications and prices without notice and users should satisfy themselves that the information used is that which is currently published by the Company or the Gurit Group on the website. Any queries may be addressed to the Technical Services Department.

The Gurit Group is continuously reviewing and updating the Documents. Please ensure that you have the current version, by contacting Gurit Marketing Communications or your sales contact and quoting the revision number in the bottom middle of this page.

Gurit (Zullwil) AG
 Fabrikweg 54
 CH-4234 Zullwil
 Switzerland

T +41 (0) 61 795 06 01
 F +41 (0) 61 795 06 04

Gurit (Kassel) GmbH
 Otto-Hahn-Str. 5
 D-34123 Kassel
 Germany

T +49 (0) 561 99 85 63 0
 F +49 (0) 561 99 85 63 22

E info@gurit.com
 W www.gurit.com

PŘÍLOHA P II: MATERIÁLOVÝ LIST PHG840N-F300-47**PHG840N-F300-47**

- Fiber reinforced thermosetting preimpregnated material for railway parts (e.g. fairings, window, ceiling and floor panels).
- Woven fabric of E-glass filament yarn, 300 g/m², 8H satin, preimpregnated with 47% phenolic resin PH840N.
- Long shelf and shop life
- Excellent FST behaviour
- Excellent mechanical behaviour
- Good surface finish
- Autoclave-free processes possible
- Short curing time 10 min at 160°C
- Special adhesive side for Alu bonding

Description

PHG840N-F300-47 is a halogenfree modified phenolic system, designed for laminate with bright colour and good surface quality.

This prepreg material has been developed for industrial and rail applications, with high specific mechanical properties and excellent FST (low heat-release and smoke-density) behaviour.

The resin matrix PHG840N can be cured at a temperature range between 120°C and 160°C. Monolithic and sandwich structures can be easily manufactured with this prepreg. The curing can be performed by press, vacuum and autoclave moulding with a pressure of at least 0.07 N/mm².

Such composite structures can be exposed easily to temperatures in the range of -55°C up to +80°C.

Cured laminates fulfil the flame-retardant Rail specifications:

- BS 476-6 and 7 Class 1, BS 6853 R. 025, NF-F 16-101/102 (M1, F1)
- UNE 23-721 (M1), DIN 5510 S4, SR2, ST2, DIN EN 45545 under testing

The prepreg material is suitable for:

- Rail industries
- Machine industries
- Marine and automotive applications

Prepreg Properties

	Test method	Value
Resin		Phenolic
Prepreg Weight	EN 2329	560 +/-30 g/m ²
Volatile	EN 2330 (160°C/10min)	< 6.0 %
Resin Flow	EN 2332 (3 plies, 135°C, 8min, 4 bar)	> 10 %
Tackiness		T0, T1, T2
Fibre Material		E-glass
Fabric Weight	EN 2331	296 g/m ² +/-5 %
Weave Style		8H satin
Service Temperature (Cured State)		-55°C to +80°C
Resin Content	EN 2331	47.0 +/-3%

Delivery Form and Storage

Prepreg sizes	Roll length / Roll width	50 / 1.0 + 1.27m
Storage Life (from delivery date)	Days at RT / Month at -18°C	30 / 24

Curing Conditions

	Crush Core	Standard Cycle
Temperature	120°C/140°C/160°C	120/130/140/160°C
Cure Time	50 min/20 min/10 min	90/60/30/10 min
Spec. Pressure	1.25 Mpa	0.07- 0.4 MPa
Heat-up	None (hot-in)	2 to 5 K/min
Cool-down	None (hot-out)	2 to 5 K/min
Remove material at	120°C/140°C/160°C	< 80°C
Recommended curing process	Press, Autoclave, Vacuum-bag	Vacuum bag / Oven, Press, Autoclave

Mechanical Properties (Typical Values)

	Temp. [°C]	Standard	Results	
Flexural Strength (warp)	RT 80	ISO 178	450 300	MPa
Flexural Modulus (warp)	RT 80	ISO 178	22 19	GPa
Tensile Strength (warp)		ISO 527-4		MPa
Tensile Modulus (warp)		ISO 527-4		GPa
Compressive Strength (warp)		EN 2850	-- --	MPa
Compressive Modulus (warp)		EN 2850		GPa
Interlaminar Tensile Shear Strength (warp)	RT 80	AITM 1.0019/1B	18 16	MPa
Interlaminar Shear Strength				
Bearing strength				
Climbing Drum Peel ¹	RT	EN 2243-3	110	N/75 mm
Bending Load (4-P.) ¹	RT 80	AITM 1.0018 Fig.2	1500 --	N
T _g		TMA	> 80	°C

1) Sandwich structure (6,4mm Alu honeycomp 126.5 kg/m³ MIL-C-7438)



Burning Behaviour

		Test method	Max. mean values	
Flammability vertical, 60s flaming	burn length after flame time after flame time of drips	AITM 2.0002A	60 5 —	mm s s
Flammability vertical, 12s flaming				
Max. specific optical smoke density within 4 min	flaming mode	AITM 2.0007A	5	Ds
Heat release		AITM 2.0006	25	kW m ²
Heat release rate		AITM 2.0006	25	kW ^{min} m ²

Disclaimer

The materials, products and services of the Gurit Group sold by the respective legal entity (the "Company") of the Gurit Group are subject to the Standard Conditions of Sale of the Company which are available on request or may be viewed at the website: www.gurit.com. Nothing in this document or any data sheet, brochure, prospectus, etc. (hereinafter referred to as "Documents"), nor any instruction or advice given as referred to in the Documents shall be deemed to alter, vary, supersede or waive any provision of Company's Standard Conditions of Sale or this Disclaimer, unless any such modification is specially agreed to in writing and signed by Company.

Although any information, instruction or advice contained or referred to in the Documents is given in good faith, no warranty or guarantee, express or implied, is made(i) that the results described herein will be obtained, or (ii) that the information, instruction or advice (whether written or oral) is complete, accurate and useful. Nothing contained in the Documents constitutes a representation or warranty, whether expressed or implied, as to any matter whatsoever.

The user should make test panels and conduct appropriate testing of any goods or materials supplied by the Company to ensure that they are suitable for the user's planned application. Such testing should include testing under conditions as close as possible to those which the final component may be subjected. Each user bears full responsibility for making its own determination as to the suitability of the recommendations and advice obtained by the Company for its own particular use.

To the extent of mandatory law, the Company and the Gurit Group expressly disclaim any liability, whether in contract, warranty, tort, negligence, strict liability or otherwise, for any and all damages, losses, injuries, costs or expenses resulting directly or indirectly from the reliance on any information contained in the Documents or from any advice (whether written or oral) given as referred to in the Documents.

The Company reserves the right to change specifications and prices without notice and users should satisfy themselves that the information used is that which is currently published by the Company or the Gurit Group on the website. Any queries may be addressed to the Technical Services Department.

The Gurit Group is continuously reviewing and updating the Documents. Please ensure that you have the current version, by contacting Gurit Marketing Communications or your sales contact and quoting the revision number in the bottom middle of this page.

Gurit (Zullwil) AG

Fabrikweg 54

CH-4234 Zullwil

Switzerland

T +41 (0) 61 795 06 01

F +41 (0) 61 795 06 04

Gurit (Kassel) GmbH

Otto-Hahn-Str. 5

D-34123 Kassel

Germany

T +49 (0) 561 99 85 63 0

F +49 (0) 561 99 85 63 22

E info@gurit.com

W www.gurit.com

PŘÍLOZE P III: MATERIÁLOVÝ LIST EMT 125 PLUS



SPECIFIKACE

EPOXIDOVÁ PRYSKYŘICE EMT 125 PLUS

POPIS VÝROBKU

EMT 125 PLUS JE EPOXIDOVÁ PRYSKYŘICE VHODNÁ K PROSYCENÍ UHLÍKATÝCH, SKELNÝCH A ARAMIDOVÝCH TKANIN. ŠIROKÝ ROZSAH VYTVRZOVACÍCH TEPLŮ UMOŽŇUJE JEJÍ ZPRACOVÁNÍ BĚŽNÝMI POSTUPY: LISOVÁNÍM ZA HORKA, VAKUOVÁNÍM, AUTOKLÁVEM.

POUŽITÍ

PRYSKYŘICE EMT 125 PLUS SE SVÝMI DOBRÝMI MECHANICKÝMI VLASTNOSTMI, VYSOKOU PRŮHLEDNOSTÍ A ZVÝŠENOU ODOLNOSTÍ PROTI PŮSOBENÍ UV ZÁŘENÍ NALEZNE UPLATNĚNÍ V OBLASTECH, KDE SE VYŽADUJE ZACHOVÁNÍ UHLÍKOVÉHO VZHLEDU KOMPOZITNÍHO MATERIÁLU:
PRŮMYSL VÝROBY AUTOMOBILOVÝCH DÍLŮ, NÁMOŘNÍHO A SPORTOVNÍHO VYBAVENÍ.

VLASTNOSTI PRYSKYŘICE

TYP	EPOXIDOVÁ
TRVANLIVOST VE VENKOVNÍM PROSTŘEDÍ PŘI 23 °C	5 TÝDNŮ
DOBA SKLADOVÁNÍ PŘI -18 °C	1 ROK
REAKČNÍ TEPLOTA T _g	125-130 °C dle dsc (diferenční kompenzační kalorimetrie)
DOBA MĚKNUTÍ	4-6 min při 125 °C 20-16 min při 105 °C
OBSAH TĚKAVÝCH LÁTEK PŘI POČÁTEČNÍ IMPREGNACI	<1 %
HUSTOTA PRYSKYŘICE PO VYTVRZENÍ	1,15-1,25 g/cm ³ (1 150-1 250 kg/m ³)
PŘILNAVOST	VYSOKÁ AŽ NÍZKÁ, DLE POŽADAVKU

TYPICKÉ PODMÍNKY VYTVRZOVACÍHO CYKLU

VYTVRZOVACÍ TEPLOTA	ČAS	TG
80 °C	12 hodin	100-105 °C
125 °C	45 minut	125-130 °C
140 °C	15 minut	120-125 °C

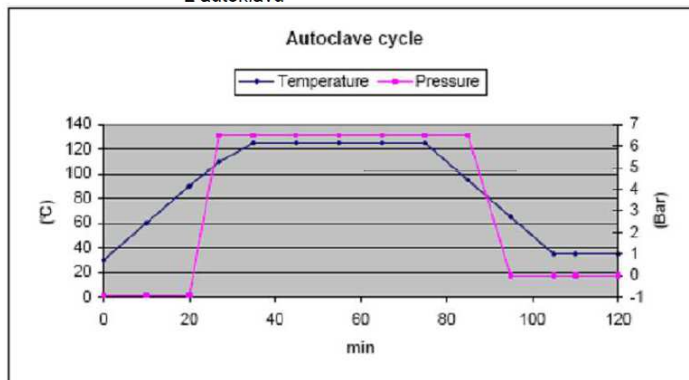
* Výše popsané vytvrzovací cykly byly provedeny na laminátové desce o rozměrech 40 × 40 lisováním za horka, hodnota T_g se měřila metodou DSC (20 °C/min)

** V rozsahu teplot 80-140 °C jsou možné různé vytvrzovací cykly.

POPIS ZPRACOVÁNÍ

AUTOKLÁV:

- 1) Po vytvoření vrstvy vložte díl do autoklávu a aplikujte podtlak 0,9-1 bar [90-100 kPa]
- 2) Ohřejte na teplotu 120 °C, zahřívajte rychlostí 1-3 °C/min (malé díly je možné zahřívát rychlostí 3-5 °C/min)
- 3) Při dosažení teploty 105-110 °C nastavte tlak na 2-7 bar [200-700 kPa]
- 4) Po dosažení teploty 125 °C udržujte stejnomyrný tlak a teplotu po dobu 45 minut
- 5) Při zachování tlaku snižte teplotu na 60 °C, pak uvolněte tlak
- 6) Po vychladnutí na teplotu prostředí vyjměte díl z autoklávu



LISOVÁNÍ ZA HORKA

- 1) Materiál po počáteční impregnaci vložte při teplotě okolí do formy a formu uzavřete s tlakem 1 bar [100 kPa]
- 2) Ohřejte na teplotu 125 °C, zahřívajte rychlostí 1-3 °C/min (malé díly je možné zahřívát rychlostí 3-5 °C/min)
- 3) Při dosažení teploty 105-110 °C nastavte tlak na 2-3 bar [200-300 kPa], pokud je možné kontrolovat tok
- 4) Po dosažení teploty 125 °C udržujte stejnomyrný tlak a teplotu po dobu 45 minut
- 5) Díl nechejte vychladnout na teplotu alespoň 40-50 °C při zachování tlaku, pak jej vyjměte z formy

EMT 125 je reaktanční epoxidová pryskyřice. Příliš rychlý nárůst teploty nebo příliš vysoká vytvrzovací teplota mohou vyvolat nekontrolovaný nárůst teploty uvnitř vrstev v případě zpracování laminovaných materiálů větších tlouštěk (>1 cm)

**TYPICKÉ MECHANICKÉ
VLASTNOSTI**

Mechanické údaje uvedené níže platí pro počáteční impregnaci uhlíkového materiálu použitím NN200* EMT 125 PLUS (obsah pryskyřice 40 % hmotnosti), vytvrzení tlakem za horka při 125 °C po dobu 45 minut

*NN200 (uhlíková tkanina 200 g/m², 4,8 osnova-4,8 útek, 3K uhlíkové vlákno s vysokou pevností)

ilss	69	MPa	ASTM D 2344
Modul ohybu	62	GPa	ASTM D 790
Síla v ohybu	900	MPa	ASTM D 790
Modul tahu	67	GPa	ASTM D 3039
Síla v tahu	850	MPa	ASTM D 3039

BALENÍ A DODÁVKA

Tkanina s počáteční impregnací pryskyřicí EMT 125 PLUS se dodává v rolích na kartonových jádrech s polyetylenovou oddělovací fólií. Role jsou uzavřeny v plastovém obalu a umístěny v kartonové krabici.

**MANIPULACE A
SKLADOVÁNÍ**

Role skladujte v původním balení při teplotě -18 °C
Před použitím vyjměte roli z mrazáku a ponechtejte zteplat na teplotu prostředí v původním obalu, aby na materiálu nedošlo ke kondenzaci vody.

**BEZPEČNOST A
OCHRANA ZDRAVÍ**

Výrobek obsahuje epoxidovou pryskyřici, která může při dlouhodobém působení způsobovat alergické reakce na pokožce.
Doporučuje se používat ochranné pracovní rukavice a pracovní oděv.
Při styku materiálu s pokožkou omyjte zasažené místo důkladně vodou a mýdlem, nebo krémem určeným k odstranění pryskyřic.

Při manipulaci s materiálem se doporučuje pracovat v dobře větraných prostorách.

Společnost Pro-Systems S.p.A. si vyhrazuje právo budoucích úprav těchto specifikací.

Kontaktní údaje

PRO-SYSTEMS S.p.A
Via Al Corbè, 63/65
22076 Mozzate (CO) - ITALY
Tel. +39 0331 576887
Fax +39 0331 576295
e-mail pro-systems@pro-systems.it

PŘÍLOHA P IV: MATERIÁLOVÝ LIST TV 45 EMT 125 PLUS



DATA SHEET

TV 45 EMT 125 Plus 42%

Description

GLASS FABRIC PREPREG WITH EPOXY RESIN

Fabric

Material	Glass EC 9 136 tex	ISO 4602:1997
Fabric construction (ends/picks per cm)	7,3 x 7,3 ± 0,3	ISO 4602:1997
Areal weight	200 g/m ² ± 5%	ISO 4605:2000
Fabric thickness	190 μm ± 15%	ISO 4603:1993
Weave	PLAIN	ISO 2113:1996

Resin

Type	Epoxy EMT 125 Plus
Resin content	42 ± 3% by weight dry/dry
Resin weight	145 g/m ² ± 5%

Prepreg

Total weight prepreg	345 g/m ² ± 5%
Volatile content	< 1 %
Shelf life	1 year at -18°C

This information is indicative of our present standard production: it might be changed and doesn't confirm contractual liabilities

PRO-SYSTEMS SPA

Rev.01 – April, 2012



PRO-SYSTEMS SPA

UFFICI COMMERCIALI E AMMINISTRATIVI VIA AL CORBÈ, 63/65 - 22076 MOZZATE (Co) • TEL. +39 0331 576 887 R.A. - FAX +39 0331 576 295
SEDE LEGALE VIA MOTTÀ, 6 - 20144 MILANO • C.F. / PIVA IT 03707330969 - CAP. SOC. € 450.000,00 INT. VERSATO - R.E.A. MI 1695996 - MECC. MI330437
E-MAIL pro-systems@pro-systems.it • WEB SITE www.pro-systems.it

PŘÍLOHA P V: MATERIÁLOVÝ LIST HPL



Produktdatenblatt FUNDERMAX Schichtstoffplatten

Diese Information beschreibt die Zusammensetzung von FUNDERMAX Schichtstoffplatten und gibt Hinweise für deren Behandlung, Verarbeitung, Gebrauch und Entsorgung. Fundermax GmbH ist Mitglied des ICDLI.

1. Materialbeschreibung/Zusammensetzung

FUNDERMAX Schichtstoffplatten sind dekorative Hochdruck-Schichtpreßstoffplatten entsprechend EN 438 mit einer Melaminharzdeckschicht.

Sie werden in einer Vielzahl von Abmessungen, Dicken und Oberflächenausführungen geliefert. Schichtstoffe bestehen vor allem aus Papier, einem nachwachsenden Rohstoff, und unter Wärme aushärtenden Kunstharzen, wobei der Papieranteil mehr als 60 Gewichtsprozent ausmacht.

Die übrigen 30 bis 40 Gewichtsprozent bestehen aus ausgehärtetem Phenol-Harz für den Kern und Melamin-Harz für die dekorative Deckschicht. Beide Harze gehören zu den Duroplasten. Sie sind irreversibel chemisch vernetzt und bilden einen Werkstoff mit hohem Molekulargewicht. Unter der Einwirkung von hohem Druck und Hitze entsteht ein nicht reagierendes, stabiles Material, dessen Eigenschaften von denen der Ausgangsrohstoffe grundlegend verschieden sind.

2. Transport und Lagerung

Transport und Lagerung sollen nach den Allgemeinen Verarbeitungsempfehlungen für Schichtstoffplatten erfolgen; besondere Vorsichtsmaßnahmen sind nicht erforderlich. Im Sinne der Transportbestimmungen sind FUNDERMAX Schichtstoffplatten nicht als Gefahrstoffe eingestuft; eine Kennzeichnung ist daher nicht notwendig.

3. Bearbeitung und Handhabung von FUNDERMAX Schichtstoffplatten

Die üblichen Sicherheitsvorschriften hinsichtlich

- Staubabscheidung,
- Staubabsaugung,
- Brandverhütung usw.

müssen bei der Ver- und Bearbeitung von FUNDERMAX Schichtstoffplatten eingehalten werden.

Der Kontakt mit FUNDERMAX Schichtstoffplatten- Staub verursacht keine besonderen Probleme; es gibt aber eine kleinere Zahl von Menschen, die auf Stäube aller Art allergisch reagieren.

Wegen möglicher scharfer Kanten sollten beim Hantieren mit FUNDERMAX Schichtstoffplatten stets Schutzhandschuhe getragen werden.

4. Umweltaspekt bei der Anwendung

FUNDERMAX Schichtstoffplatten sind ein ausgehärtetes, duroplastisches Material. Im täglichen Gebrauch sind FUNDERMAX Schichtstoffplatten für den Kontakt mit Lebensmitteln zugelassen. Auf Grund ihrer äußerst geringen Durchlässigkeit eignen sich FUNDERMAX Schichtstoffplatten gut als Sperre gegen Emissionen (z.B. Formaldehyd) aus dem Trägermaterial.

Die dekorativen Oberflächen sind weitgehend beständig gegen alle haushaltsüblichen Lösemittel und Chemikalien; das Material wird deshalb seit vielen Jahren in Anwendungsbereichen eingesetzt, in denen Sauberkeit und Hygiene unabdingbar sind.

Die geschlossene FUNDERMAX Schichtstoffplatten-Oberfläche kann auf einfache Weise mit Hilfe von heißem Wasser, Dampf oder allen Desinfektionsmitteln, wie sie in Krankenhäusern und gewerblichen Anwendungsbereichen eingesetzt werden, desinfiziert werden.

5. Wartung

Da FUNDERMAX Schichtstoffplatten eine fertige Oberfläche haben und durch Korrosion nicht angegriffen werden, erübrigt sich ein gesonderter Oberflächenschutz. Die Schichtstoffplatten brauchen keine Pflege, nur Reinigung.

6. FUNDERMAX Schichtstoffplatten im Brandfall

FUNDERMAX Schichtstoffplatten sind nur schwer in Brand zu setzen und haben die Eigenschaft, die Ausbreitung von Flammen zu verzögern, so daß sich die Fluchtzeit verlängert. Bei unvollständiger Verbrennung können - wie bei jedem anderen organischen Material auch toxische Substanzen im Rauch enthalten sein.

Auf Kundenwunsch sind FUNDERMAX Schichtstoffplatten in F-Qualität erhältlich.
FUNDERMAX Schichtstoffplatten in F-Qualität enthalten halogenfreie Flammschutzmittel.

Bei Bränden, an denen auch FUNDERMAX Schichtstoffplatten beteiligt sind, können dieselben Brandbekämpfungstechniken angewendet werden wie bei anderen holzhaltigen Baustoffen.

7. Energierückgewinnung

Auf Grund ihres hohen Heizwerts (18-20 MJ/kg) eignen sich FUNDERMAX Schichtstoffplatten besonders gut für das thermische Recycling. Sie verbrennen bei vollständigem Ausbrand (bei 700 °C) zu Wasser, Kohlendioxid und Stickoxiden. FUNDERMAX Schichtstoffplatten erfüllen deshalb die Anforderung des Kreislaufwirtschaftsgesetzes (§ 6). Solche Bedingungen sind durch moderne, behördlich genehmigt Industrieheizungsanlagen gewährleistet. Die Asche aus diesen Verbrennungsprozessen kann auf kontrollierte Deponien verbracht werden.

8. Deponie

Ist die Verbrennung nicht möglich, können FUNDERMAX Schichtstoffplatten auf geordnete Mülldeponien gebracht werden.

FUNDERMAX Schichtstoffplatten gehören der Eluatklasse IIIa gem. ÖNORM S2072 an und haben den Abfallschlüssel 57101 Phenol- und Melaminharz gem. ÖN S2100. Sie sind als 'hausmüllähnlich' eingestuft. Diese Schlüsselnummer ist dem örtlichen befugten Abfallsammler bzw. dem Deponiebetreiber zu nennen. Eine Liste der gem. § 15 Abfallwirtschaftsgesetz befugten Abfallsammler und -entsorger ist bei Bedarf bei den jeweiligen Landesregierungen

erhältlich. Alle die Gruppe '57 Kunststoff und Gummiabfälle' oder '571 ausgehärtete Kunststoffe' oder '57101 Phenol- und Melaminharz' entsorgenden Betriebe sind zuständig. In den nachstehenden Referaten der Landesregierungen kann das jeweils gültige Verzeichnis der lokalen Abfallsammler erfragt werden.

Amt der Burgenländischen Landesregierung
Abt. XIII/3, Gewässeraufsicht Wulkawiese
7041 Wulkaprodersdorf
Tel.: 02687/621 22 –29

Amt der Kärntner Landesregierung
Abt. XIII/3, Gewässeraufsicht Wulkawiese
7041 Wulkaprodersdorf
Tel.: 02687/621 22 –29

Amt der Kärntner Landesregierung
Abt. XV/U, Umweltschutz
Flatschacher Straße 70
9020 Klagenfurt
Tel.: 0463/331 90 -246, 252

Amt der Niederösterreichischen
Landesregierung
Landhausplatz 1
3109 St. Pölten
Abt. RU4 - 02742/200 5299
Abt. WA1 - 02742/200 4375

Amt der Oberösterreichischen Landesregierung
Abt. für Umweltschutz und Abfallwirtschaft 40
4020 Linz
Tel.: 0732(997)/584 -3398, 3106

Amt der Salzburger Landesregierung
Abt. XVI, Umweltschutz und Naturschutz
Hellbrunner Straße 30
5020 Salzburg
Tel.: 0662/8042 -4158

Amt der Steiermärkischen Landesregierung
Rechtsabteilung 3
Landhausstraße 7
8010 Graz
Tel.: 0316/877 -3821

Rechtsabteilung 3
Landhausstraße 7
8010 Graz
Tel.: 0316/877 -3821

Amt der Tiroler Landesregierung
Abt. für Umweltschutz
Wilhelm-Greil-Straße
6020 Innsbruck
Tel.: 0512/508 -650, 647

Amt der Vorarlberger Landesregierung
Abt. VIIa, Raumplanung und Baurecht
Römerstraße 15
6901 Bregenz
Tel.: 05574/511 - 2713

Amt der Wiener Landesregierung
MA 22
Ebendorferstraße 4
1010 Wien
Tel.: 1/4000 - 88248, 88238, 88237

9. Technische Angaben

9.1 Physikalische Daten

- 9.1.1 Dichte: ca. 1,40 g/cm³
9.1.2 Löslichkeit in Wasser: keine
9.1.3 Heizwert: 18-20 MJ/kg
9.1.4 Zündtemperatur: ca. 400 °C
9.1.5 Thermische Zersetzung ist oberhalb 250 °C möglich. Toxische Gase können je nach Brandbedingungen (Temperatur, Sauerstoffgehalt) entstehen. FUNDERMAX Schichtstoffplatten schmelzen nicht.
9.1.6 Gefährliche Reaktionen: keine
9.1.7 Schwermetalle: keine, entsprechend den europäischen Vorschriften.
9.1.8 Weitere Angaben: FUNDERMAX Schichtstoffplatten sind kein gefährlicher Stoff im Sinne der Gefahrenstoffverordnung.

9.2 Lagerung, Handhabung und Transport

- FUNDERMAX Schichtstoffplatten zählen nicht zu den gefährlichen Transportgütern.
9.2.1 Schutzausrüstung Handschuhe (scharfe Kanten). Besondere arbeitshygienische Vorkehrungen sind nicht erforderlich.
9.2.2 Brand- und Explosionsschutz: Nicht erforderlich, wie für andere Baustoffe auf Holzbasis.

9.3 Bearbeitung von FUNDERMAX Schichtstoffplatten

- 9.3.1 Arbeitsplätze: Staubgrenzwert 2 mg/m³
9.3.2 Explosionsgrenze: Staubgrenzwert 60 mg/m³

9.4 Feuerlöschmaßnahmen

Alle üblichen Löschmittel sind anwendbar

9.5 Toxische Wirkungen beim Gebrauch: keine.

FUNDERMAX Schichtstoffplattenoberflächen sind physiologisch unbedenklich und für den Kontakt mit Lebensmitteln zugelassen.

9.6 Formaldehydabgabe

- Typische Werte für eine nicht aufgeklebte 1-mm-FUNDERMAX Platte:
< 0,4 mg/h m² bei Prüfung nach ON EN 717-2
< 0,05 ppm bei Prüfung mit der WKI-Prüfkammer

Alle in diesem Merkblatt enthaltenen Angaben basieren auf dem aktuellen technischen Wissensstand, stellen jedoch keine Garantie dar. Es liegt in der persönlichen Verantwortung des einzelnen Anwenders der in diesem Merkblatt beschriebenen Produkte, die bestehenden Gesetze und Vorschriften zu beachten.

Wenn Sie Fragen zum Thema haben, wenden Sie sich bitte an unsere Anwendungstechnik – Fundermax GmbH +43 5 9494 0.

PŘÍLOHA P VI: MATERIÁLOVÝ LIST ECM 6.4-82



EURO-COMPOSITES®

Aluminium honeycomb

Technical Data Sheet for ECM 6.4-82

Material: Alu-Alloy 3003 (AlMnCu)**Coating:** Zirconium oxide

Mechanical Properties	Unit	Test	Typical values
Foil Thickness	µm	ECP 231-04	80
Cell Size, Nominal	mm	DIN 29970	6,4
Density, Nominal	kg/m ³	DIN 29970	82
Compression Strength Unstab.	N/mm ²	DIN 53291	4,25
Compression Strength Stab.	N/mm ²	DIN 53291	4,50
Crush strength	N/mm ²	NHTSATP- 24-214D-02*	1,665
Plate Shear Strength/ L-Dir.	N/mm ²	DIN 53294	2,40
Plate Shear Modul/ L-Dir.	N/mm ²	DIN 53294	430
Plate Shear Strength/ W-Dir.	N/mm ²	DIN 53294	1,40
Plate Shear Modul/ W-Dir.	N/mm ²	DIN 53294	220
Service Temperature	°C	-	-55 °C bis +177 °C

All Honeycomb Core approved according to: DNV-Certificate MED-B-4912 as Non-combustible materials according to SOLAS 74, 2000 HSC Code, IMO FTP Code

All Honeycomb ECM core types can be delivered, if required, as microperforated. These Aluminum core types are called ECM-P.

*- Thickness of test sheet: 25,40 mm