

Vliv typu prepregu na vybrané vlastnosti sendvičových struktur

Bc. Marek Tomeček

Diplomová práce
2024



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická
Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2023/2024

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: Bc. Marek Tomeček
Osobní číslo: T22391
Studijní program: N3909 Procesní inženýrství
Studijní obor: Výrobní inženýrství
Forma studia: Prezenční
Téma práce: Vliv typu prepregu na vybrané vlastnosti sendvičových struktur

Zásady pro vypracování

- Literární rešerše na problematiku prepreg sendvičových struktur.
- Přehled prepreg-sendvičových materiálů, výztužní systémy, výroba prepregu, použití.
- Návrh prepreg sendvičové struktury pro zvolenu aplikaci.
- Experimentální výroba sendvičových panelů.
- Experimentální testování mechanických vlastností dle doporučení.
- Vyhodnocení výsledků a formulace závěru.

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

Seznam doporučené literatury:

Barbero, Ever J., Introduction to composite materials design, Third edition, CRC Press, Taylor & Francis Group, CRC Press is an imprint of the Taylor & Francis Group an informa business, Boca Raton, 2018.

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

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

Jim Low, Yu Dong: Composite Materials: Manufacturing, Properties and Applications, Edition: 1st, Elsevier, ISBN 978-0128205129, 2021.

Jawaid Mohammad, Thariq Mohamed, Saba Naheed: Aging Mechanisms in Polymer Composite Materials. Elsevier, ISBN 978-0-08-102298-6, 2019.

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

Datum zadání diplomové práce: **2. ledna 2024**

Termín odevzdání diplomové práce: **10. května 2024**

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

L.S.

doc. Ing. Martin Bednařík, Ph.D. v.r.
ředitel ústavu

Ve Zlíně dne 27. února 2024

PROHLÁŠENÍ AUTORA DIPLOMOVÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že:

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

Prohlašuji,

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

Ve Zlíně dne:

Jméno a příjmení studenta:

.....
podpis studenta

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá porovnáním pryskyřic pro jednotlivé druhy jader a návrhu prototypu. Práce je rozdělena na dvě části, teoretickou a praktickou. V teoretické části jsou zmíněny základní informace o sendvičové struktuře, její historie a použití v leteckém průmyslu a železniční dopravě. První část praktické části je věnována výrobě zkušebních tělísek s následným testováním mechanických vlastností při zkoušce cyklickým ohybem a tahem na plocho. Druhá část praktické části je zaměřena na návrh sendvičové struktury a skladby prepregů pro prototyp sklápěcího stolu.

Klíčová slova: sendvičová struktura, prepreg, jádro, cyklický ohyb, tah na plocho

ABSTRACT

The diploma thesis deals with the comparison of resins for different types of cores and the design of a prototype. The thesis is divided into two parts, theoretical and practical. In the theoretical part, basic information about sandwich structure, its history and its use in aerospace and railway transport are mentioned. The first part of the practical part is devoted to the fabrication of test bodies, their mechanical properties in cyclic bending and flat tensile tests. The second part of the practical part is focused on the design of the sandwich structure and prepreg composition for the prototype of the tilting table.

Keywords: sandwich construction, prepreg, core, flat tensile test, cycling bending

Tímto bych chtěl poděkovat doc. Ing. Soně Rusnákové, Ph.D. za její odborné vedení, rady a vstřícný přístup, který mi věnovala během mé diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat firmě Mezzlik Propellers s.r.o a Ing. Michalu Gruntovi za spolupráci při výrobě zkušebních tělísek. Dále také děkuji Ing. Milanu Žaludkovi, Ph.D. za odbornou pomoc při testování mechanických vlastností sendvičových tělísek. Dále děkuji celé rodině za podporu během mého studia.

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

OBSAH

ÚVOD	9
I TEORETICKÁ ČÁST	10
1 SENDVIČOVÁ STRUKTURA	11
1.1 HISTORIE.....	12
1.2 KRYCÍ DESKY.....	12
1.2.1 Kompozity.....	13
1.2.2 Prepregy.....	18
1.3 JÁDRO.....	21
1.3.1 Voština.....	21
1.3.2 Pěna.....	27
1.3.3 Přírodní materiály.....	28
2 APLIKACE SENDVIČOVÝCH MATERIÁLŮ	29
2.1 LETECKÝ PRŮMYSL.....	29
2.1.1 Budoucnost sendvičových materiálů v leteckém průmyslu.....	33
2.2 ŽELEZNIČNÍ DOPRAVA.....	34
3 TECHNOLOGIE VÝROBY SENDVIČOVÝCH KONSTRUKCÍ	35
3.1 LISOVÁNÍ.....	35
3.2 VYTVRZOVÁNÍ V PECI.....	36
3.3 VYTVRZOVÁNÍ V AUTOKLÁVU.....	37
4 ZKOUŠKY MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ	38
4.1 OHYBOVÁ ZKOUŠKA.....	38
4.2 SMYKOVÁ ZKOUŠKA.....	39
4.3 ZKOUŠKA TAHEM NA PLOCHO.....	40
4.4 VADY VOŠTINOVÉHO JÁDRA.....	41
II PRAKTICKÁ ČÁST	42
5 CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE	43
6 VÝROBA ZKUŠEBNÍCH DESEK	44
6.1 PŘÍPRAVA FORMY.....	45
6.2 NÁSTRŮH PREPREGŮ A JADER.....	45
6.3 PŘÍPRAVA JADER.....	46
6.4 VRSTVENÍ PREPREGU NA JÁDRO.....	47
6.5 DEBULKING.....	48
6.6 LISOVÁNÍ.....	49
7 MECHANICKÉ ZKOUŠKY	50

7.1	ZKOUŠKA OHYBEM (ASTM C393).....	50
7.1.1	Sendvičová struktura s pěnovým jádrem	51
7.1.2	Sendvičová struktura s voštinovým jádrem	53
7.1.3	Sendvičová struktura s korkovým jádrem.....	56
7.1.4	Sendvičová struktura s jádrem z balsy II	58
7.1.5	Sendvičová struktura s jádrem z balsy III + ER 68.....	60
7.1.6	Sendvičová struktura s jádrem z balsy I + IMP 509	61
7.2	ZKOUŠKA CYKlickÝM OHYBEM.....	63
7.2.1	Sendvičová struktura s pěnovým jádrem	64
7.2.2	Sendvičová struktura s nomexovou voštinou.....	66
7.2.3	Sendvičová struktura s korkovým jádrem.....	67
7.2.4	Sendvičová struktura s balsovým jádrem.....	69
7.3	ZKOUŠKA TAHEM NA PLOCHO ASTM C297	70
7.3.1	Sendvičová struktura s pěnovým jádrem	71
7.3.2	Sendvičová struktura s voštinovým jádrem	74
7.3.3	Sendvičová struktura s korkovým jádrem.....	76
7.3.4	Sendvičová struktura s balsovým jádrem.....	79
8	DISKUZE VÝSLEDKŮ.....	82
8.1	OHYBOVÁ ZKOUŠKA.....	82
8.1.1	Vyhodnocení tělísek s pěnovým jádrem	82
8.1.2	Vyhodnocení tělísek s jádrem z nomexové voštiny	83
8.1.3	Vyhodnocení tělísek s jádrem z korku	85
8.1.4	Vyhodnocení tělísek s jádrem z balsového dřeva	86
8.2	ZKOUŠKA CYKlickÝM OHYBEM.....	87
8.3	ZKOUŠKA TAHEM NA PLOCHO	89
8.3.1	Vyhodnocení tělísek s pěnovým jádrem	89
8.3.2	Vyhodnocení tělísek s voštinovým jádrem	89
8.3.3	Vyhodnocení tělísek s korkovým jádrem.....	90
8.3.4	Vyhodnocení tělísek s balsovým jádrem.....	90
8.4	POROVNÁNÍ ZKUŠEBNÍCH TĚLÍSEK	91
9	NÁVRH VÝROBY SENDVIČOVÉ KONSTRUKCE.....	92
9.1	MODEL SKLÁPĚCÍHO STOLU	92
9.2	TECHNOLOGICKÝ POSTUP.....	92
	ZÁVĚR	94
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	95
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	100
	SEZNAM OBRÁZKŮ	101
	SEZNAM TABULEK.....	105
	SEZNAM PŘÍLOH.....	106

ÚVOD

Poptávka po sendvičových konstrukcích bleskově roste napříč širokou škálou aplikací od kosmických družic, letounů a lodí přes automobily, železniční vozy a větrné elektrárny až po stavbu mostů. Tato expanze je umožněna řadou výhod, které sendvičové konstrukce nabízejí a rovněž neustálým vývojem nových materiálů a potřebou vysoce výkonných avšak lehkých konstrukcí. Sendvičové struktury tak s největší pravděpodobností zůstanou žádaným řešením i v budoucnu.

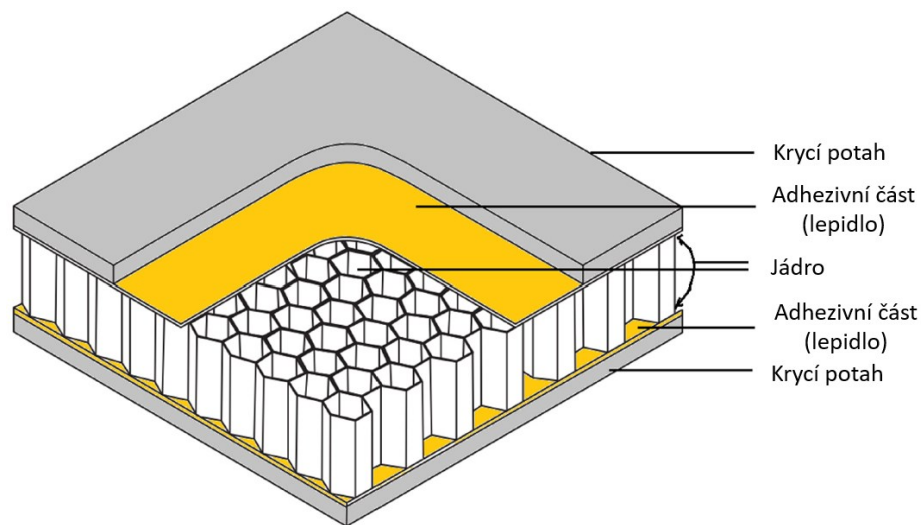
V teoretická části jsou zmíněny obecné informace o sendvičových strukturách, materiálech krycích desek a jader. Dále se také zabývá historickým vývojem sendvičových struktur a popisuje výrobní procesy související s jejich zhotovením. Práce se také zabývá testováním mechanických vlastností a vadami voštinového jádra. Významná pozornost je věnována aplikacím v leteckém průmyslu a železniční dopravě, kde nacházejí sendviče rozsáhlé uplatnění.

Praktická část diplomové práce je složena z několika celků. Prvním z nich je příprava zkušebních tělísek pro mechanické testování. Další část tvoří provedení samotného testování mechanických vlastností těchto tělísek za použití zkoušky cyklickým ohybem a zkoušky tahem na plocho. Poslední částí je návrh sendvičové struktury a skladby prepregů pro prototyp a vypracování rámcového technologického postupu pro výrobu sklápěcího stolu do letadla.

I. TEORETICKÁ ČÁST

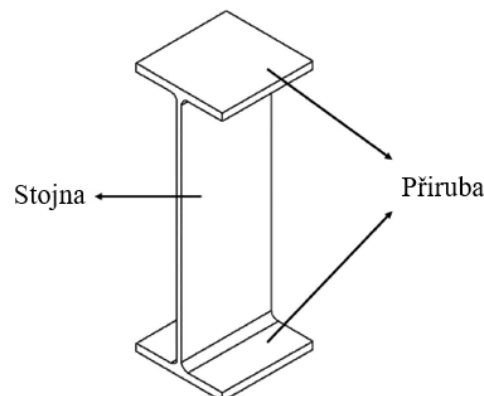
1 SENDVIČOVÁ STRUKTURA

Sendvičové struktury jsou speciální třídou vrstvených kompozitů v nichž jsou různé formy materiálů vzájemně spojeny, aby se dosáhlo požadované funkčnosti. Celkové chování těchto kompozitních konstrukcí je závislé na vlastnostech jednotlivých vrstev. Konvenčně se sendvičový kompozit skládá ze dvou hlavních částí: krycích (čelních) desek a jádra. Krycí desky jsou mnohem tenčí než jádro (Obrázek 1). Lepidlo použité ke spojení těchto dvou celků musí mít dostatečnou pevnost, aby vydrželo napětí vznikající mezi čelní deskou a jádrem. [1]



Obrázek 1 Konstrukce sendvičové struktury [2]

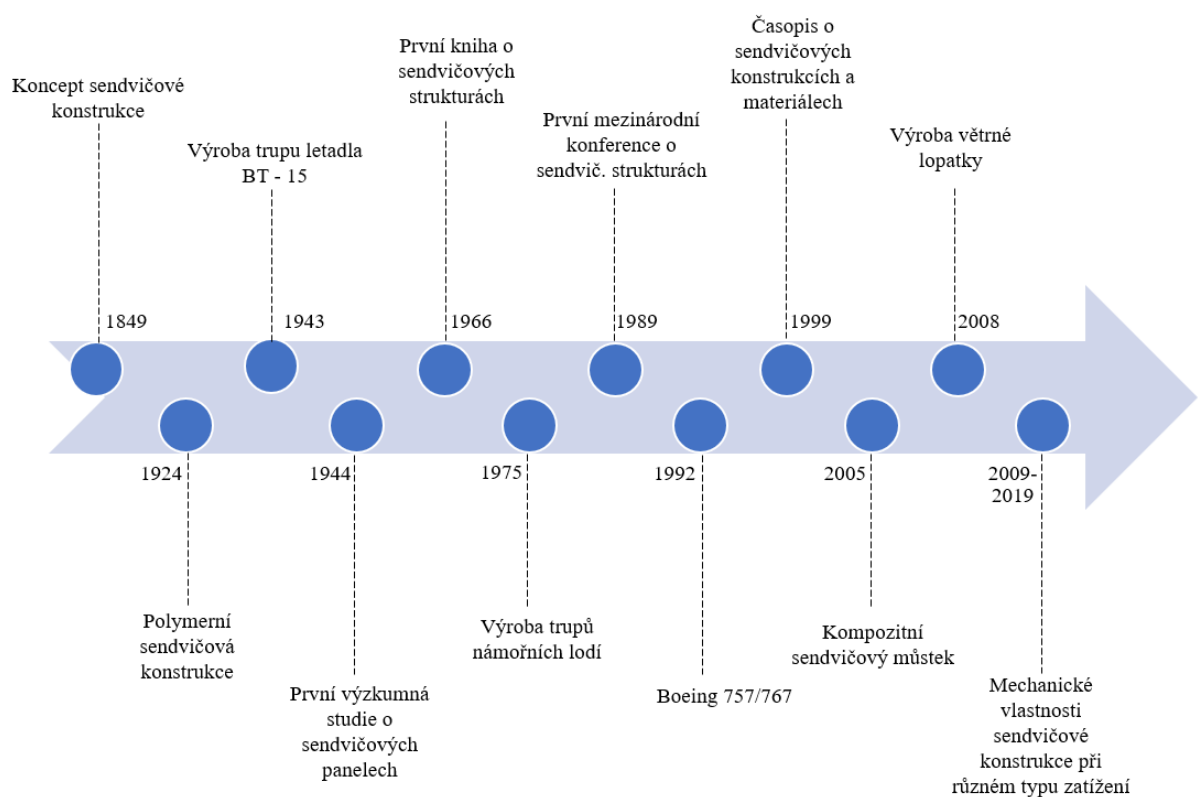
Základní princip sendvičové konstrukce je inspirován I-nosníkem (Obrázek 2). Krycí desky sendviče se podobají přírubám I-nosníku a jádro představuje stojnu I-nosníku, která obě příruby spojuje. Krycí desky tvoří napěťovou dvojici, která působí proti ohybovým napětím působícím na konstrukci, přičemž jedna čelní strana je v tlaku a druhá v tahu. [1]



Obrázek 2 Konstrukce I-nosníku [1]

1.1 Historie

Základní koncept pochází z roku 1849, navržen Noorem, Burtonem a Bertem. První sendvičová struktura z překližky byla použita v bombardéru Mosquito za druhé světové války v Anglii. V roce 1944 byla publikována první vědecká studie týkající se sendvičové konstrukce, která zkoumala sendvičové panely vystavené tlakovému zatížení v rovině. V posledních deseti letech byly zkoumány vlastnosti sendvičových konstrukcí při různých podmínkách zatížení. Rychlý historický vývoj sendvičových struktur lze vidět na Obrázku 3. [3]



Obrázek 3 Historický vývoj sendvičové struktury [3]

1.2 Krycí desky

Hlavním účelem krycích (čelních) desek je odolávat ohybovému namáhání působícímu na strukturu sendvičového laminátu. Mezi další důležité vlastnosti patří vysoká pevnost v tahu a tlaku, dobrá odolnost proti nárazu, odolnost proti vlivům prostředí a odolnost proti opotřebení. Materiály použité pro čelní desky jsou obvykle ve formě tenkých plátů. Běžně se používají jak kovy tak i nekovy. Nekovy jsou široce preferovány kvůli vynikajícímu snížení hmotnosti a zvýšení tuhosti. Mezi kovové materiály patří především ocel, nerezová

ocel a slitiny hliníku. Existují i další slitiny s lepšími pevnostními vlastnostmi. Jejich použití je však omezené kvůli vyšší hustotě materiálu a omezené variabilitě tuhosti. Nejčastěji se pro čelní desky používají nekovové materiály jenž jsou překližka, polymery a polymery vyztužené vlákny a technické plasty (polypropylen, polyamid) a vysoce výkonné polymery. [1]

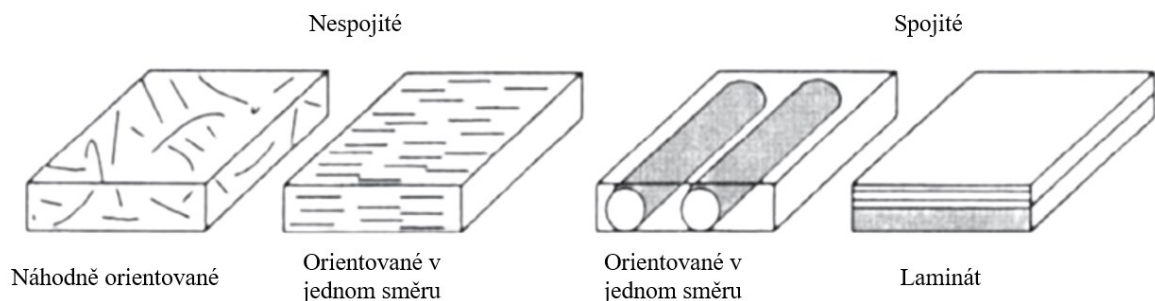
1.2.1 Kompozity

Kompozitní materiál lze definovat jako kombinace dvou složek: výztuže (vláken) a matrice. Jejich hlavní výhodou je vysoká pevnost a tuhost v kombinaci s nízkou hustotou ve srovnání se sypkými materiály, což umožňuje snížit hmotnost hotového dílu. Kompozitní materiály jsou nejčastěji členěny dle typu výztuže na vláknové a částicové. Každá z těchto skupin má jedinečné vlastnosti a aplikační potenciál. [4,5]

1. Vlákňový kompozit se skládá z dlouhých (kontinuálních) nebo krátkých vláken (whiskers)

Kompozity ve kterých jsou nespojitá vlákna nebo whiskery, mají vlákna s orientací v jednom směru nebo orientací náhodnou. Kompozity složené z nespojitých vláken jsou považovány za jednovrstvé. Tyto kompozity mají anizotropní vlastnosti, ale u vláken s náhodnou orientací dosahují téměř izotropních vlastností.

Spojité kompozity mohou být buď jednovrstvé, nebo vícevrstvé. Jednovrstvé kompozity z nekonečných vláken mohou být buď jednosměrné nebo tkané. Vícevrstvé kompozity se obecně označují jako lamináty. Kompozity z nekonečných vláken mají obecně ortotropní vlastnosti. [5]



Obrázek 4 Typy vláknových kompozitů [5]

2. **Částicový kompozit** se vyznačuje svým složením (částice suspendované v matrici). Částice mohou mít prakticky jakýkoliv tvar, velikost nebo konfiguraci. Příklady dobře známých částicových kompozitů jsou beton a dřevotřískové desky. Existují dvě podtřídy:

- a) Vločkový kompozit se obecně skládá z vloček s velkým poměrem rovinné plochy k tloušťce suspendovaných v matrici (např. třísková deska).
- b) Plněné/skeletové kompozity se skládají z matrice prostoupenou nosným skeletem například voštinové jádro vyplněné izolačním materiálem.

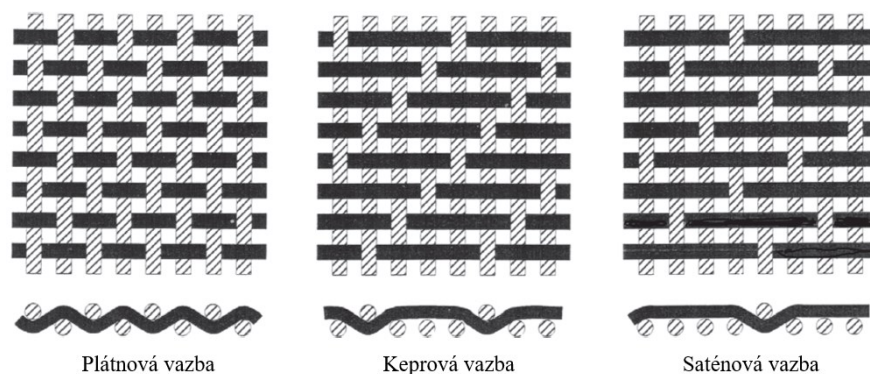
Částicový kompozit může mít anizotropní nebo ortotropní vlastnosti. Používá se pro mnoho aplikací, ve kterých pevnost není významnou složkou konstrukce. [5]



Obrázek 5 Typy částicových kompozitů [5]

1.2.1.1 Vláknna

Vláknna jsou hlavní nosné prvky kompozitního materiálu. Obecně jsou spojitá a mají průměr v rozmezí od 3-200 μm . Jednotlivá vlákna se spojují do svazků zvaných rovingy (pro skleněná vlákna) a koudelky (pro uhlíková vlákna), které lze formovat do pásků nebo tkát do tkanin a následně použít pro výrobu jednotlivých vrstev. Jsou pevnější a tužší než stejný materiál v sypké formě. Nejčastěji používaná vlákna jsou bór, sklo, uhlík a kevlar. [5,6]



Obrázek 6 Typy vazeb tkanin [7]

a) Skleněná vlákna

Díky své nízké ceně, vysoké pevnosti v tahu, vysoké odolnosti proti nárazu a dobré chemické odolnosti se skleněná vlákna hojně používají v komerčních kompozitních aplikacích. Jejich vlastnosti se však nevyrovnají vlastnostem uhlíkových vláken ve vysoce výkonných kompozitních aplikacích. Ve srovnání s uhlíkovými vlákny mají relativně nízký modul pružnosti a horší únavové vlastnosti. Ačkoli existuje mnoho typů skleněných vláken, nejčastěji používané v kompozitech jsou E-sklo, S-2 sklo a křemen. E-sklo je nejběžnější a nejlevnější a poskytuje dobrou kombinaci pevnosti v tahu a modulu pružnosti. S-sklo je dražší, ale je o 40 % pevnější než E-sklo a zachovává si větší procento své pevnosti při zvýšených teplotách. [4]

b) Aramidová vlákna

Aramidová (kevlarová) vlákna jsou organická vlákna s tuhostí a pevností mezi sklem a uhlíkem. Díky své extrémní houževnatosti se často používají pro balistickou ochranu. Hlavní výhodou aramidových vláken je jejich schopnost absorbovat velké množství energie při štěpení a jejich schopnost podléhat plastické deformaci až při vysokých hodnotách tlaku. Kevlarová vláknová struktura a chování v tlaku přispívají k tomu, že kompozity jsou méně citlivé na vruby a na rozdíl od skla a uhlíku selhávají tvárným, nekřehkým způsobem. [4]

c) Uhlíková a grafitová vlákna

Uhlíková a grafitová vlákna jsou nejrozšířenější formou vláken používaných ve vysoce výkonných kompozitních konstrukcích. Vykazují vynikající pevnost v tahu a tlaku, mají vysoký modul, vynikající únavové vlastnosti a nepodléhají korozi. Grafitová vlákna jsou podrobována tepelnému zpracování při teplotách nad 1650 °C, obsah uhlíku je vyšší než 99 %. Uhlíková vlákna mají nižší obsah uhlíku (93 až 95 %) a jsou tepelně zpracovávána při nižších teplotách. [4]

d) Přírodní vlákna

Přírodní vlákna lze získávat ze stonků, listů nebo semen různých rostlin. Vlákna získaná ze stonku se nazývají "lýková". Příkladem lýkových vláken jsou len, konopí a juta. Listová vlákna jsou obecně hrubší než lýková. Sisal a abaka jsou běžná listová vlákna, která jsou obzvláště užitečná pro tuhá pojiva, respektive pro použití v mořské vodě. Vlákna získaná ze semen bývají hrubší a křehčí než lýková vlákna. Bavlna a kokosové vlákno jsou příklady běžných semenných vláken.

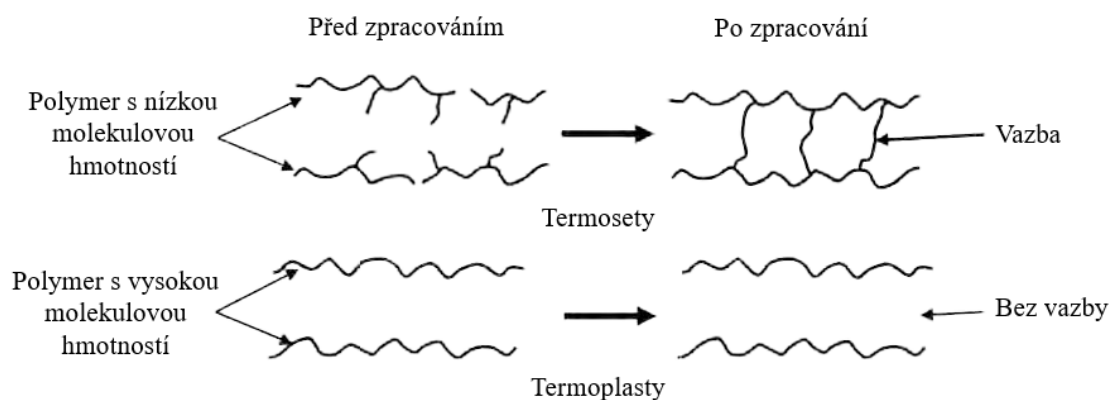
Společnými výhodami přírodních vláken, pokud je posuzujeme společně se skleněnými vlákny jsou dobré specifické mechanické vlastnosti díky nízké hustotě, obnovitelný zdroj s nízkou spotřebou energie, nízké náklady a nízké investice, snadnější manipulace a zpracování, recyklace a dobrá tepelná a zvuková izolace. Na druhou stranu mezi nevýhody patří nízká pevnost, proměnlivá kvalita, vyšší absorpce vlhkosti, omezené teploty zpracování, nižší trvanlivost a horší odolnost proti opětovnému použití. [8]

Tabulka 1 Mechanické vlastnosti vybraných vláken [9,10]

Vlákna	Průměr [μm]	Pevnost v tahu [GPa]	Youngův modul pružnosti [GPa]	Hustota [g/cm ³]	Prodloužení [%]
E - sklo	5 - 20	3,5	73	2,5	2,5
S - sklo	-	4,57	86	2,5	2,8
Kevlar 49	14	3,6	130	1,4	3,30 - 3,70
Uhlík	-	4	230-240	1,4	1,4 - 1,8
Konopí	10 - 20	0,5	35	1,5	1,6
Len	12 - 24	0,95	60	1,5	2,70 - 3,20
Sisal	10 - 20	0,5	17	1,5	2,0 - 2,5
Bavlna	10 - 35	0,6	8	1,5 - 1,6	7,0 - 8,0

1.2.1.2 Matrice

Úkolem matrice je udržet vlákna na svém místě. Přenášet zatížení mezi vlákny, chránit je před vlhkostí, chemikáliemi a dalšími vlivy prostředí. Dalšími vlastnostmi, které jsou ovlivněny vlastnostmi matrice jsou hořlavost, odolnost proti povětrnostním vlivům (např. dlouhodobé vystavení slunečnímu záření) a vlivy prostředí (např. absorpce vlhkosti z okolní atmosféry). [7]



Obrázek 7 Porovnání termosetových a termoplastických polymerních struktur [4]

a) Termosetové pryskyřice

Termosetové pryskyřice mají nízkou viskozitu, což umožňuje vynikající impregnaci vláknové výztuže a vysokou rychlost zpracování. Termosetové pryskyřice jsou nejběžnějšími pryskyřicemi používanými v kompozitních systémech pro jejich snadné zpracování a široký rozsah vlastností. Díky nízkým pořizovacím nákladům jsou cenově velmi výhodné. Mezi termosetové pryskyřice patří polyestery, vinylestery, epoxidy, polyimidy, bismaleidy a fenoly. [4,8]

Epoxidové pryskyřice jsou široce používány díky své univerzálnosti, vysokým mechanickým vlastnostem a vysoké odolnosti proti korozi. Epoxidy se smršťují méně než jiné materiály, což pomáhá vysvětlit jejich vynikající vlastnosti při lepení. Používají se pro nízké a střední teploty (135 °C). Pro aplikace při velmi vysokých teplotách (290-315 °C) se obvykle volí polyimidy. Jednou z hlavních oblastí použití epoxidů je letecký průmysl. Epoxidy se používají jako lepidla pro voštinové konstrukce letadel, jako laminovací pryskyřice pro drak letadel, pro raketové aplikace a na výrobu nástrojů. [4,8]

Polyesterové pryskyřice jsou vysoce kvalitní a levné pryskyřice s vysokým poměrem cena/výkon. Polyesterové pryskyřice se používají v aplikacích vyžadujících odolnost proti chemickému působení.

Vinyl esterové pryskyřice mají lepší korozní vlastnosti než polyestery. K dispozici je široká škála vinylesterových pryskyřic pro aplikace až do 121 °C. Jsou vysoce odolné vůči kyselinám, zásadám, rozpouštědlům, chlornanům a peroxidům. Náklady na vinylesterové pryskyřice se pohybují mezi cenou polyesterů a epoxidů. [8]

Fenolické pryskyřice mají dobrou rozměrovou stabilitu při teplotních změnách a dobré adhezní vlastnosti. Fenolické pryskyřice se často používají pro vozidla hromadné dopravy a vnitřní součásti letadel z důvodu jejich požární odolnosti. Z hlediska ceny jsou tyto pryskyřice konkurenceschopné polyesterovým pryskyřicím. [4,8]

b) Termoplastické pryskyřice

Termoplastický polymer nepodléhá během zpracování žádné chemické přeměně. Namísto toho je polymer z pevného stavu změkčen, aby mohl být zpracován a po dokončení zpracování se opět vrátí do pevného stavu. Termoplasty mají při teplotách zpracování vysokou viskozitu, což znesnadňuje jejich zpracování. Mezi 5 nejdůležitějších termoplastických pryskyřic patří polyetheretherketon (PEEK), polyetherketoneketon (PEKK), polyfenylsulfid (PPS) a polypropylen (PP), jedná se o semikrystalické termoplasty, zatímco polyetherimid (PEI) je amorfní termoplast. [4,8]

1.2.2 Prepregy

Prepreg je tenká deska materiálu obsahující tkaninu impregnovanou předem stanoveným množstvím částečně vytvrzené polymerní matrice. Základním materiálem matrice v prepregových deskách je epoxid, ačkoli pro vysokoteplotní aplikace se používají i jiné termosety (například BMI). Existují také prepregy s termoplastickou matricí.

Výrobci prepregů dodávají desky v rolích. Šířka prepregových desek se může pohybovat od méně než 25 do více než 457 mm. Tloušťka jedné vrstvy vytvrzeného prepregového listu se obvykle pohybuje v rozmezí 0,125 - 0,25 mm. Obsah pryskyřice u komerčně dostupných prepregů se pohybuje mezi 30 % a 45 % hmotnosti. [7]

Výhody použití prepregů při výrobě kompozitních dílů jsou:

- 1) lze z něj vyrábět kompozitní díly s vysokým objemovým podílem vláken
- 2) snadno se řeže
- 3) má regulovatelnou přilnavost, která umožňuje, aby vrstvy zůstaly na svém místě i po uložení na sebe
- 4) má nízkou variabilitu.

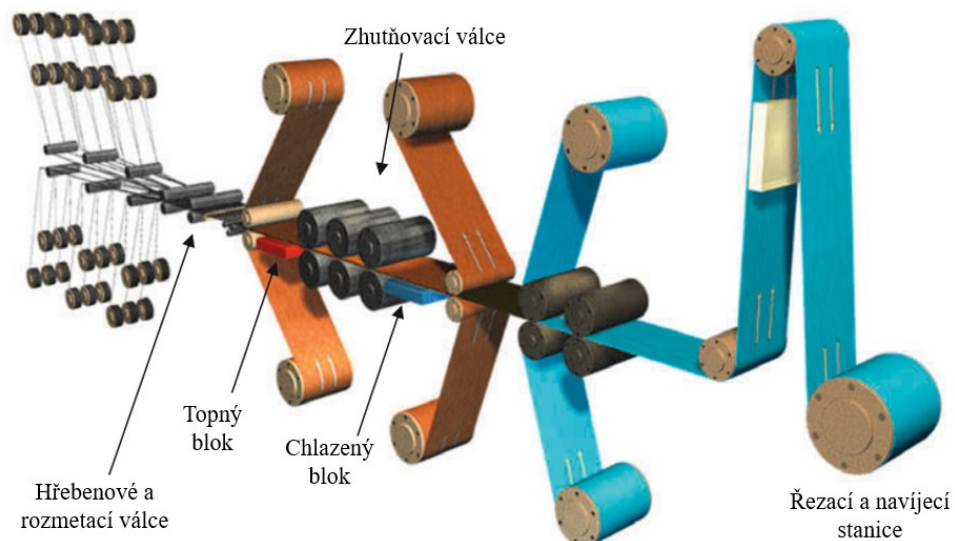
Hlavní nevýhodou je, že prepreg se musí skladovat v mrazničce, jinak by se pryskyřice v B-fázi dále vytvrzovala. Pokud je prepreg během zpracování příliš suchý a tuhý v důsledku postupu vytvrzování během skladování, nelze jej použít a musí se vyřadit. [7]

1.2.2.1 Výroba prepregu

Prepregy se vyrábějí především dvěma způsoby. Metodou tavení za tepla, která se používá stále častěji z důvodu ochrany životního prostředí (likvidace odpadu z rozpouštědel). Je vhodná jak pro jednosměrné vlákna tak pro textilní prepregy. Druhou metodou je proces namáčení do rozpouštědla a funguje pouze u tkaninových prepregů. [6,11]

a) Metoda tavení za tepla

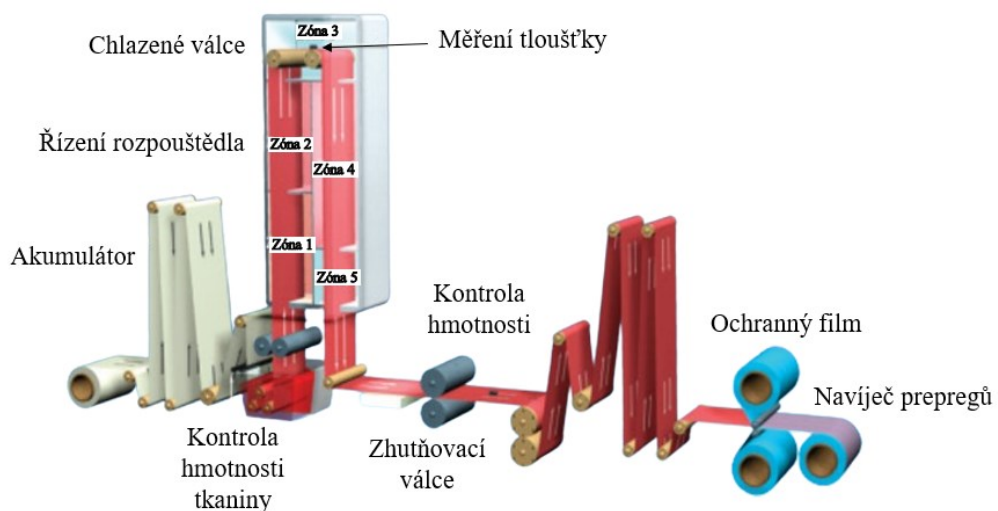
Proces impregnace za tepla umožňuje kontinuální impregnaci skleněných, uhlíkových a aramidových vláken škálou levných termoplastických pryskyřic (PP, PA, PC a PU). Při tomto procesu se vlákno vytáhne z cívky a zahřeje se na teplotu taveniny polymeru nebo vyšší. K nanesení pryskyřice se používá jednošnekový nebo dvoušnekový extrudér. Zahřátý roving se impregnuje roztavenou pryskyřicí tak, že se svazky vláken rozevrou přes speciálně navržené roznášecí plochy. Svazek vláken se rozprostře, aby se usnadnilo pronikání taveniny před vstupem do extrudéru, která je obvykle určena k výrobě tenké ploché pásky nebo prepregu. Po kalibraci na konečný obsah vláken může být impregnovaný materiál tvarován ve formě pásků, profilů, navinutý na cívky nebo nasekaný na pelety o délce obvykle 12-50 mm. Obsah vláken v materiálu impregnovaném za tepla se pohybuje v rozmezí 10-80 hmotnostních procent wt ($\pm 2\%$). [12]



Obrázek 8 Schéma výroby prepregu pomocí metody tavení za tepla [11]

b) Metoda rozpouštědlového máčení

Viskozita většiny termoplastických pryskyřic je vysoká, proto se termoplastické kompozitní prepregy vyrábějí metodou rozpouštědlového máčení. Snížení viskozity roztoku polymeru umožňuje smáčení jednosměrných kompozitních vláken a tkanin. Při impregnaci amorfních polymerů (např. PEI) roztokem lze upravit koncentraci polymeru a jeho teplotu tak, aby se jeho viskozita snížila, což umožní impregnaci tkaniny. Po průchodu lázně s rozpuštěným polymerem prochází výztuž přes válečky, které regulují stupeň absorpce roztoku. Impregnovaná výztuž pak prochází jednotkou pro odpařování rozpouštědla. [12]



Obrázek 9 Schéma výroby prepregu pomocí metody rozpouštědlového máčení [11]

Proces máčení v rozpouštědle má oproti procesu tavení za tepla určité výhody. Například lze poměrně snadno zpracovávat pryskyřice s velmi vysokou viskozitou nebo s nerozpustnými částicemi, vhodnou úpravou obsahu rozpouštědla. Také smáčení tkaniny je velmi dobré, protože pryskyřice téměř úplně proniká do vláken a vyplňuje mezery. Prepregy vyrobené rozpouštědlovým máčením často vykazují vyšší přilnavost než prepregy vyrobené metodou tavení za tepla. [11]

1.3 Jádno

Jádno sendvičové konstrukce slouží především k oddělení, podepření a stabilizaci čelních materiálů tak, aby bylo dosaženo požadované tuhosti v ohybu. Jádno přenáší hlavní vnější nebo příčné smykové zatížení sendvičové konstrukce. Další funkce, jako je tepelná a zvuková izolace jsou rovněž do značné míry závislé na vlastnostech materiálu jádra. Aby tyto funkce sendvičová konstrukce dosahovala při minimální hmotnosti, má materiál jádra obvykle relativně nízkou hustotu ve srovnání s krycími materiály a lepicími složkami. V mnoha případech potřebuje materiál jádra speciální manipulaci, aby byla zachována rozměrová stabilita, a to z důvodu jeho relativní křehkosti nebo nestability v samostatném stavu. [13]

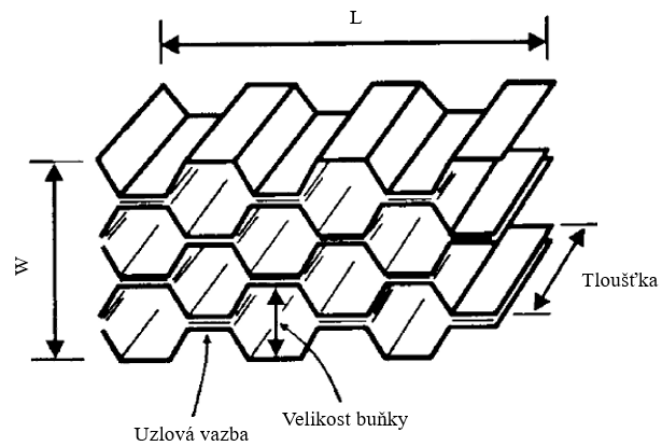
1.3.1 Voština

Voštinová struktura je typ buněčných materiálů s pravidelným a periodicky se opakujícím uspořádáním hexagonálních buněk a skládá se ze dvou tenkých, tuhých a pevných desek, které slouží jako primární nosné prvky a silné vrstvy jádra s nízkou hustotou, které zajišťuje odolnost proti smyku a tuhost. Mezi jedinečné vlastnosti, díky nimž je voštinová konstrukce pro tyto aplikace preferována, patří vysoký poměr tuhosti k hmotnosti, eliminace svařování, vynikající kvalita izolace a konstrukční univerzálnost. Mezi nejpoužívanější materiály voštin patří hliník, sklolamináty, papír, avšak voštiny lze vyrobit z jakýchkoliv tenkých deskových materiálů. Voština je nehořlavá, pružná a lehká a má dobrou odolnost proti nárazu. [14, 15]



Obrázek 10 Voština a její struktura v sendviči [16]

Velikost buněk voštinového jádra je určena průměrem kružnice, kterou lze do buňky vepsat. V letadlech se pohybuje v rozmezí přibližně 1,57 mm až 11,13 mm, obvykle v násobcích 1,57 mm. Na obrázku 11 jsou znázorněny rozměry pro typickou šestihrannou voštinu. Směr L je pevnější než směr šířky (vazba uzlů) nebo směr W. [4,13]



Obrázek 11 Popis voštinového jádra [4]

1.3.1.1 Materiály voštin

Samotná voština může být vyrobena z hliníku, skleněné tkaniny, aramidového papíru, aramidové tkaniny nebo uhlíkové tkaniny. [4]

Hliníková voština poskytuje jeden z nejvyšších poměrů pevnosti vůči hmotnosti ze všech konstrukčních materiálů. Vlastnosti lze regulovat změnou tloušťky fólie, velikostí buněk a geometrickými tvary buněk. Voština se obvykle dodává v nerozvinuté blokové formě. Není vhodné ji používat tam, kde dochází ke styku se slanou vodou (problémy s korozi). Hliníková voština nemá mechanickou paměť, při nárazu se nenávratně deformuje. Hliníková voština má nejlepší kombinaci pevnosti a tuhosti ze všech jader, následují nekovové voštiny a po nich PVC pěna. [4,17]

Nomexová voština se vyrábí z nomexového papíru, což je forma papíru na bázi kevlaru (nikoliv celulósových vláken). Původní papírová voština se obvykle máčí ve fenolové pryskyřici, čímž vzniká voštinové jádro s vysokou pevností a velmi dobrou požární odolností. Ve spojení s fenolovými pryskyřicemi v čelních deskách se hojně používá pro lehké vnitřní panely letadel. Mohou se také vyrábět speciální druhy pro použití v ohnivzdorných aplikacích (např. v interiérech veřejné dopravy), které mají voštinové buňky vyplněné fenolickou pěnou pro zvýšení plochy spoje a izolace. Nomexová voština se stále častěji používá ve vysoce výkonných neleteckých komponentech díky svým vysokým mechanickým vlastnostem, nízké hustotě a dobré dlouhodobé stabilitě. Je však podstatně dražší než jiné jádrové materiály.

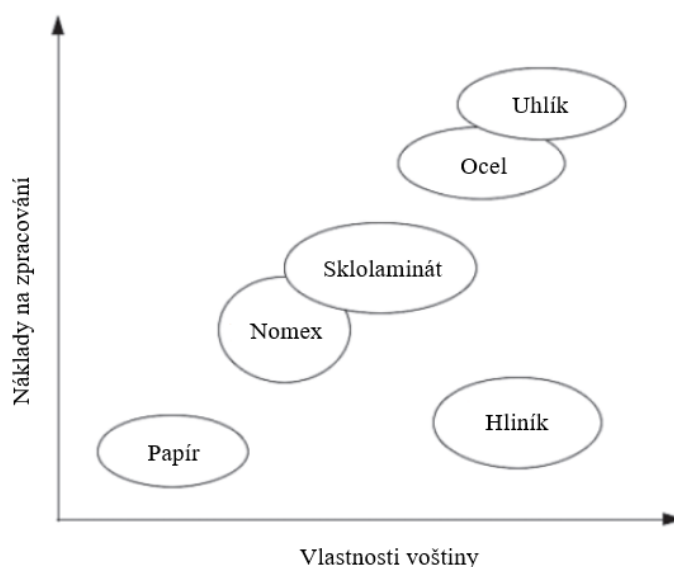
Termoplastická voština

Jádrové materiály vyrobené z termoplastů mají nízkou hmotnost, nabízejí některé užitečné vlastnosti a umožňují snadnější recyklaci. Jejich hlavní nevýhodou je obtížné dosažení dobrého mezifázového spojení mezi voštinou a krycími deskami.

- ABS: pro tuhost, rázovou pevnost, houževnatost, povrchovou tvrdost a rozměrovou stálost.
- Polykarbonát: pro UV stabilitu, vynikající propustnost světla, dobrou tepelnou odolnost a samozhášecí vlastnosti.
- Polypropylen: pro dobrou chemickou odolnost
- Polyethylen: univerzální levný materiál pro jádro. [17]

Tabulka 2 Porovnání vlastností voštinových materiálů [13]

Materiál	Velikost buňky [mm]	Hustota [kg · m ⁻³]	Tloušťka [mm]	L		W	
				Síla [MPa]	Modul [MPa]	Síla [MPa]	Modul [MPa]
Nomex	4,78	64,07	0,0051	1,703	55,17	1,103	351,72
Kevlar		64,07	0,0457	2,303	140,00	1,703	937,93
Hliník 5052		70,48	0,0381	2,289	406,90	1,496	186,21
Hliník 5056		70,48	0,0381	2,916	406,90	1,703	175,86
Sklolaminát		64,07	-	1,965	96,55	1,103	48,28

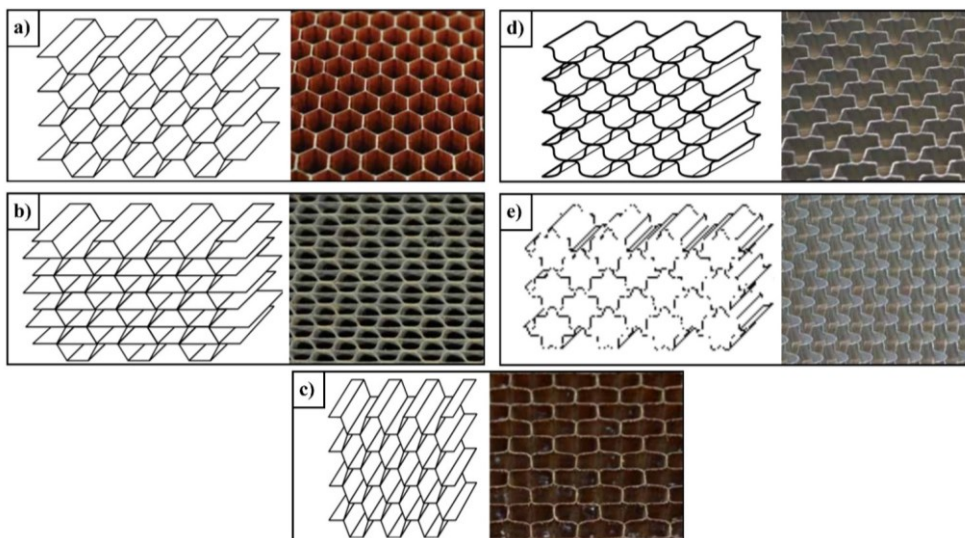


Obrázek 12 Křivka závislosti nákladů na zpracování a vlastností voštinových materiálů [18]

1.3.1.2 Tvary buněk

Nejběžnějšími tvary buněk jsou šestihranné, obdélníkové a flex core. Některé varianty těchto konfigurací (seskupení) jsou rozšířená (overexpanded), nerozšířená (underexpanded) a vyztužená (reinforced).

- a) **Šestihranný tvar buněk** je nejběžnější pro lepené voštiny, odporově svařovaná a pájená jádra mají čtvercový tvar buněk. Šestihran se vyrábí z hliníku nebo ze všech nekovových materiálů. Jeho hlavní nevýhodou je jeho omezená tvarovatelnost, hliníková šestihranná jádra bývají obvykle tvarována válcováním, zatímco nekovová se musí tvářet za tepla.
- b) **Vyztužená šestihranná voština** má ve směru uzlů umístěný podkladový pás materiálu, který zvyšuje mechanické vlastnosti.
- c) **Konfigurace OX** je šestiúhelníková voština, která byla rozšířena ve směru W, čímž vzniká obdélníková konfigurace buněk, která usnadňuje zakřivení nebo tvarování ve směru L. Ve směru W poté dosahuje vyšších smykových vlastností a ve směru L se snižují smykové vlastnosti L ve srovnání s šestihrannou buňkou.
- d) **Konfigurace buněk Flex-Core** zajišťuje výjimečnou tvarovatelnost zakřivených voštin bez prohýbání stěn. Při tvarování do malých poloměrů poskytuje vyšší pevnost ve smyku než srovnatelné šestihranné jádro s identickou hustotou. Jádro se vyrábí z hliníku, aramidových papírů a skleněných vláken.
- e) **Double-Flex** je jedinečné velkobuněčné jádro Flex-Core pro vynikající tvarovatelnost a vysoké specifické tlakové vlastnosti. Tvářitelnost materiálu je podobná jako u Flex jádra. [4,13,19]



Obrázek 13 Typy buněk voštiny [19]

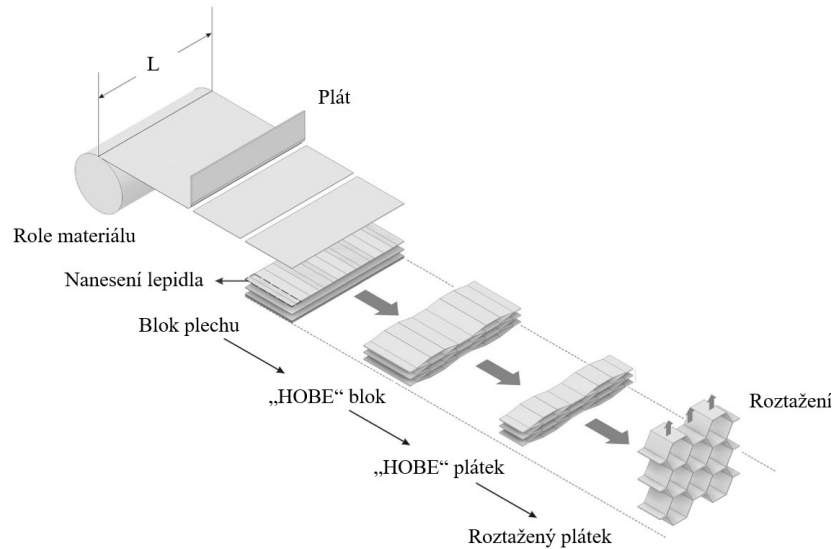
a) Šestihhranná b) Vyztužená šestihhranná c) Rozšířená šestihhranná (OX) d) Flex-Core e) Double Flex-Core

1.3.1.3 Technologie výroby voštinových materiálů

Existuje pět základních způsobů výroby voštin, lepení, odporové svařování, pájení, difúzní lepení a tepelné tavení. Z těchto způsobů je nejčastějším způsobem výroby lepení. Ostatní technologie se používají pouze pro jádra, která se používají při velmi vysokých teplotách. Existují dvě základní metody výroby voštinového jádra lepením. Rozšířenějším je expanzní proces, který se používá pro výrobu hliníkových a nomexových (aramidových) voštin. [14,15]

a) Expanzní proces pro výrobu voštin

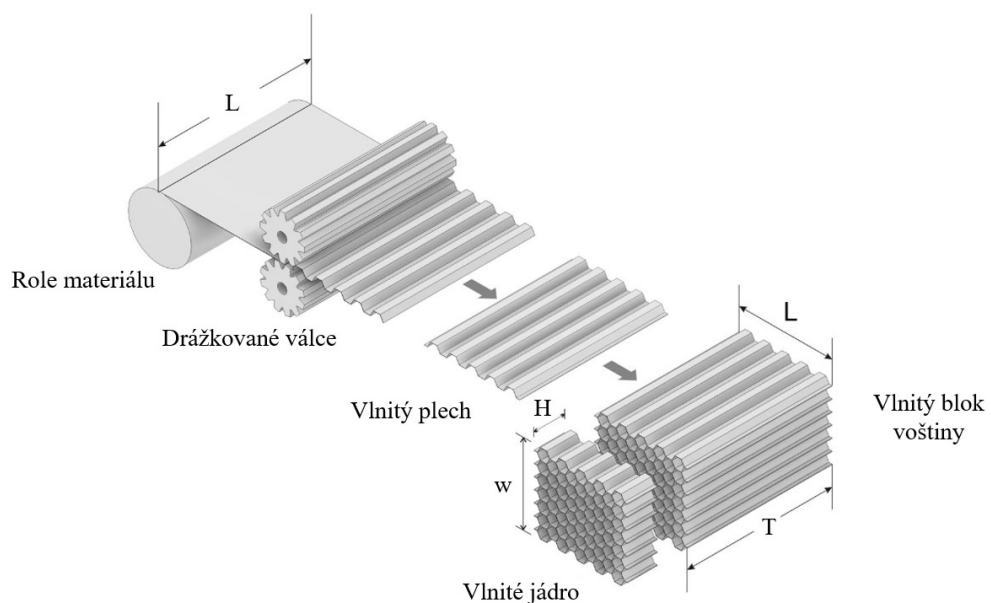
Při expanzním výrobním procesu (Obrázek 14) se nařežou pláty, poskládají se na sebe a vzájemně se spojí, čímž se vytvoří "voština před expanzí" neboli HOBE blok. Po vytvrzení lepidla se nařeže na požadovanou tloušťku jádra a poté se HOBE plátek podélně roztáhne a vytvoří šestiúhelníkovou voštinovou strukturu. Voštiny vyrobené expanzním výrobním procesem mají obvykle nízkou relativní hustotu, protože listy v bloku HOBE musí zůstat během procesu natahování spojeny. S rostoucí relativní hustotou se síla potřebná k natažení HOBE plátek blíží k pevnosti mezi spoji plátů. [14,20]



Obrázek 14 Expanzní proces výroby voštin [20]

b) Proces výroby voštin tvarováním

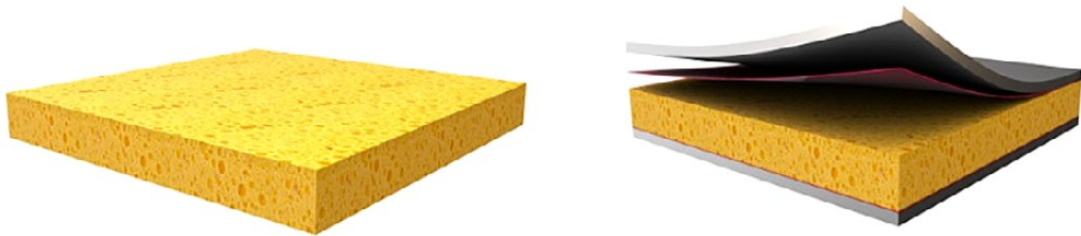
Naproti tomu při výrobě vlnitých plechů, jak je znázorněno na (Obrázku 15), se jednotlivé vrstvy plechů lisují do vlnité struktury v tvářecím stroji, poté se skládají na sebe a nakonec se slepí nebo svaří. Bylo provedeno mnoho studií o zdokonalování voštinových struktur na základě vlnitého výrobního procesu. V porovnání s expanzním výrobním procesem je jednou z výhod, že je možné měnit zvlnění každé vrstvy voštinové struktury samostatně a nakonec je kombinovat do různých tvarů. [20]



Obrázek 15 Proces výroby voštin tvarováním [20]

1.3.2 Pěna

Používá se v komerčních aplikacích při stavbě lodí a konstrukci lehkých letadel. Pěnová jádra se vyrábějí za použití nadouvadla nebo pěnotvorného činidla, které se během výroby rozpíná a poskytuje porézní buněčnou strukturu. Buňky mohou být otevřené a vzájemně propojené nebo uzavřené. Platí, že čím vyšší hustota, tím větší procento uzavřených buněk. Téměř všechny pěny používané pro konstrukční aplikace mají uzavřené buňky. Pěny s otevřenými buňkami lépe absorbují zvuk. Mechanické vlastnosti pěnových jader nedosahují takových vlastností jako voštinová jádra. Termoplastické pěny vykazují lepší tvarovatelnost, zatímco termosetové pěny mají lepší mechanické vlastnosti a vyšší teplotní odolnost. [4]



Obrázek 16 Pěna a její struktura v sendviči [16]

Pěnová jádra byla vyvinuta k překonání hlavních nevýhod přírodních (dřevěných nebo papírových) materiálů, zejména nežádoucího kolísání hustoty a absorpce vlhkosti. Polymerní jádra se napěňují, expandují nebo zpracovávají jiným způsobem, aby se snížila zdánlivá hustota. Požadovaných vlastností jádra lze dosáhnout řízením procesu expanze těchto jader. Kovová napěněná jádra lze vyrobit smícháním roztavených slitin hliníku a hořčíku s vhodnými pěnidly a ochlazením směsi za vzniku porézní pevné látky. Dále mohou být vyrobeny také skleněné pěny. [13]

Polystyrenové pěny jsou lehké, levné a snadno se brousí, ale zřídka se používají v konstrukčních aplikacích kvůli jejich nízkým mechanickým vlastnostem. Nemohou být použity s polyesterovými pryskyřicemi, protože styren v pryskyřici rozpustí jádro, proto je nahrazují epoxidové pryskyřice.

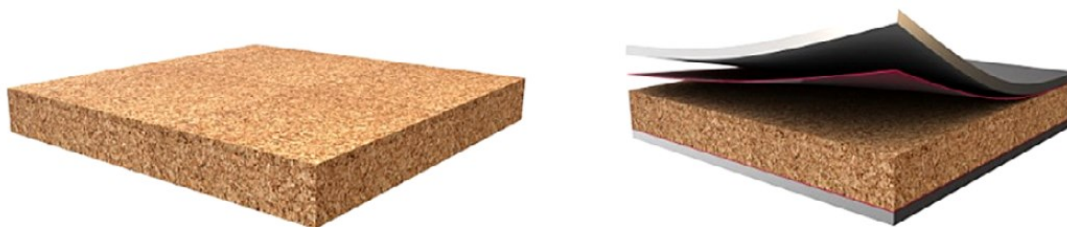
Polyuretanové pěny jsou k dispozici jako termoplasty nebo termosety s různým stupněm uzavřených buněk. Polyuretanové pěny vykazují pouze mírné mechanické vlastnosti a vazba pryskyřice na povrch má tendenci se s věkem zhoršovat, což může vést k delaminaci krycí desky. Polyuretanové pěny lze snadno řezat, i když by se při řezání neměly používat horké dráty, protože se mohou uvolňovat škodlivé výpary.

Polyvinylchloridové (PVC) pěny patří mezi nejpoužívanější jádrové materiály pro sendvičové konstrukce. Tyto pěny mohou být nezesíťované (termoplastické) nebo zesíťované (termosety). Nezesíťované jsou houževnatější, odolnější proti poškození a snáze se tvarují za tepla. Zesíťované mají vyšší mechanické vlastnosti, jsou odolnější vůči rozpouštědlům a mají lepší teplotní odolnost. Zesíťované pěny jsou však křehčí a obtížněji tvarovatelné za tepla než nezesíťované.

Polymethylmethakrylimidové pěny jsou lehce zesíťované pěny s uzavřenými buňkami, které mají vynikající mechanické vlastnosti a dobrou odolnost vůči rozpouštědlům a teplu. Mohou být tepelně tvarovány do kontur a jsou schopny odolat vytvrzování v autoklávu s prepregy. Tyto pěny jsou drahé a jsou obvykle vyhrazeny pro vysoce výkonné letecké aplikace. [4]

1.3.3 Přírodní materiály

Výběr přírodních materiálů pro jádro sendvičové konstrukce se omezuje především na balsaové dřevo, pro výplně a lemy se používá mahagon, smrk a topol. Balsaové dřevo se používá při stavbě letadel již mnoho let. Používá se také jako tepelná izolace trupů lodí a pro chladírenské vozidla v silniční dopravě. V moderních letadlech se používá především jako základní materiál sendvičových konstrukcí s čelními deskami z hliníkové slitiny nebo ze skleněných vláken. Tyto sendviče se používají především na podlahové systémy, kuchyňské kabiny a skříně. Sendviče z balsaového dřeva se nesmí používat ve vlhkých prostorách, protože balsa absorbuje velké množství vody, což způsobuje vážné zvýšení hmotnosti a korozi krycích materiálů z hliníkové slitiny. [13,21]



Obrázek 17 Korek a jeho struktura v sendviči [16]

2 APLIKACE SENDVIČOVÝCH MATERIÁLŮ

Sendvičové konstrukce se hojně používají téměř ve všech průmyslových odvětvích, ve stavebnictví, leteckém a kosmickém průmyslu, v námořních a biomedicínských aplikacích. Pro letecké aplikace jsou typické vícevrstvé čelní desky z grafit-epoxidu a uhlíkového epoxidu a hliníkového nebo voštinového jádra z nomexu. Sendvičové konstrukce s auxetickým jádrem a sklo-epoxidovými nebo sklo-vinylesterovými krycími deskami se běžně používají pro námořní konstrukce. V pozemním stavitelství mají sendvičové konstrukce obvykle jádro z pěny s uzavřenými nebo otevřenými buňkami a dvě skleněno-epoxidové nebo skleněno-vinylesterové krycí desky. Vývoj sendvičových panelů FRP (krycí materiál ze skleněných vláken) se zdokonalenou strukturou jádra poskytl příležitost k rozšíření použití v lehké stavební infrastruktuře. Inteligentní materiály použité v inteligentní sendvičové struktuře poskytují potenciál v biomedicině. Bylo prokázáno, že hybridní kompozitní sendvičová struktura se skleněnými/epoxidovými deskami a lněným/epoxidovým jádrem je ideálním kandidátem pro fixaci zlomenin kostí s mechanickými vlastnostmi blízkými lidské kortikální kosti. [18]

2.1 Letecký průmysl

Šéfkonstruktor společnosti De Havilland E. Bishop byl prvním, kdo použil sendvičový koncept u motorového letadla. Sendvičovou konstrukci použil v trupu letounů Comet Racer, Albatros a v křídle a trupu nástupce legendárního letounu slavného Mosquito DH 98. U těchto letadel bylo sendvičové jádro vyrobeno z balsového dřeva, zatímco čelní (krycí) desky se skládaly z březové překližky a k jádru byly připojeny lepidlem na bázi fenolových pryskyřic (bakelitů). Jedná se o letadlo, které je nejznámější a nejcitovanější pro své sendvičové struktury z překližky a balsového jádra. Ukázalo se, že je to jedno z nejlepších letadel druhé světové války a to jak pro svůj výkon, tak i pro své mimořádné mise, kterých dosáhlo. [22,23]



Obrázek 18 Mosquito DH 98 [24]

XB-70 „Valkyrie“ byl nadzvukový bombardér MACH 3, který byl vyroben (pouze ve dvou prototypech) společností North American Aviation. První let se uskutečnil v roce 1964. Vzhledem k rychlosti MACH 3 se teplota jeho pláště pohybovala od 246 °C do 332 °C, aby se vyhnula použití vzácného a drahého titanu, byl použit sendvič. Sendvič byl celý z nerezové oceli a krycí desky byly připájeny k voštinám ze stejného materiálu. Ukázalo se, že byl velmi účinný nejen z konstrukčního hlediska, ale také z hlediska tepelné izolace (zejména palivových nádrží). Zajímavý byl také z hlediska aerodynamické hladkosti a akustické únavy v přívodním potrubí. Pokrýval plochu 2000 m², tedy 68 % draku letadla. [23]



Obrázek 19 Superbomber XB-70 „Valkyrie“ [25]

Na *Obrázku 20* je letadlo Voyager, který jako první letadlo obletělo svět bez doplňování paliva. Jeho výroba začala v létě 1982 a první let se uskutečnil o dva roky později. Drak letadla byl postaven bez kovových součástí. Hlavním použitým materiálem byl kompozitní sendvič z papírové voštiny a grafitových vláken, lisovaný a vytvrzovaný v peci. Díky úsporným materiálům měl drak letadla konstrukční hmotnost pouhých 939 kg. [23,26]



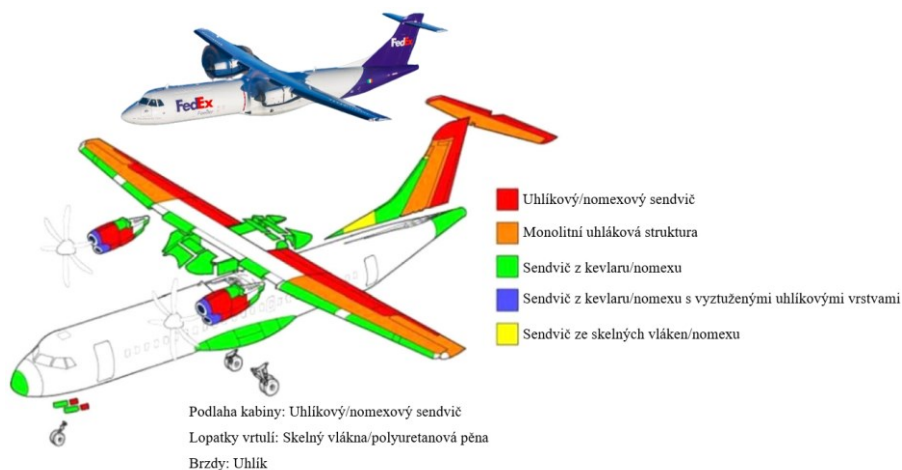
Obrázek 20 Rutan Voyager [27]

Nejznámějším letadlem sendvičové konstrukce je Beechcraft Starship, který byl navržen v roce 1982 Burtem Rutanem a začal se vyrábět v roce 1988. Jednalo se o první „celokompozitové“ letadlo certifikované FAA. Přibližně 72 % hmotnosti jeho konstrukce tvořily kompozitní materiály, především uhlíkové krycí desky a voštinová jádra z nomexu. Kryty křídel byly dlouhé 16 m z jednoho kusu. [23]



Obrázek 21 letadlo Beechcraft Starship [28]

Použití kompozitů se od té doby výrazně rozšířilo, zejména díky letounu ATR 72. První let byl uskutečněn v roce 1988. Jednalo se o první civilní letadlo s certifikovanou uhlíkovou primární konstrukcí (skříň křídla). Obsahovalo mnoho vedlejších kompozitních sendvičových konstrukcí se skleněnými, kevlarovými a uhlíkovými krycími materiály
Obrázek 22. [23]



Obrázek 22 Použité materiály v letadle ATR 72 [23,29]

Sendvičová technologie a její výhody se rozšířily i do lehkého letectví díky výrobci letadel Elixir Aircraft se sídlem ve Francii, který v roce 2020 získal certifikaci EASA CS 23 pro svůj dvoumístný karbonový letoun s názvem "Elixir". Letoun Elixir byl vyvinut na základě sendvičové technologie metodou OneShot. Tato technika spočívá v návrhu a výrobě složitých prvků (jako je křídlo) v jednom dílu a jedné operaci bez složitých konstrukčních sestav, díky čemuž se letadlo skládá z pouhých 600 dílů oproti více než 10 000 dílům u běžné kovové konstrukce lehkých letadel. Díky jednoduchosti konstrukce se tak zvyšuje bezpečnost a díky nižší hmotnosti se zlepšuje výkon. Elixir Aircraft představuje Elixir jako One-Shot uhlíkovou 4. generace lehkého letectví, po 1. generaci dřeva a plátna, 2. generaci hliníku a nýtů a 3. generaci kompozitů a hliníku. [23]



Obrázek 23 Letadlo Elixir [30]

Společnost Cobra představila na konferenci AUVSI XPONENTIAL 2022 kompozitní drak letounu Swiftlet o hmotnosti 30 kg. Jedná se o obráběnou sendvičové strukturu ze skleněných a uhlíkových vláken s jádrem z PVC pěny. Tento letoun byl vyroben pro širokou škálu průzkumných, monitorovacích pátracích záchranných operací. [31]



Obrázek 24 Bezpilotní letoun Swiftlet [31]

2.1.1 Budoucnost sendvičových materiálů v leteckém průmyslu

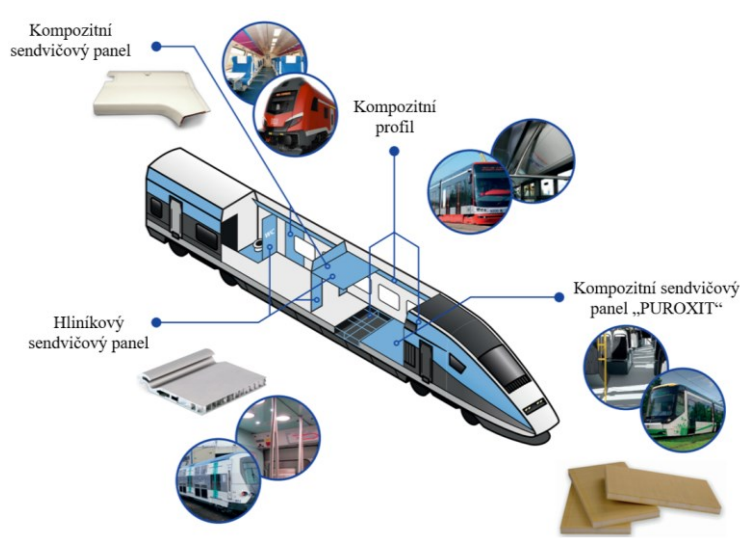
Nová generace vrtulníků eVTOLy je budoucností pro přepravu a doručování. Jedná se o vozidlo, které je lehké, energeticky účinné a mechanicky spolehlivé. Pro trh ve vývojovém cyklu jsou správné kompozitní materiály klíčové pro prototypy a konečné návrhy pro výrobu. Ideální sendvičové konstrukční kompozity pro eVTOL zahrnují lehký sendvičový materiál s leteckou certifikací, jako je strukturální pěna ROHACELL a ROHAFORM pro městskou letovou mobilitu s uhlíkovými vlákny na vnější straně. [32]



Obrázek 25 Vrtulník eVTOLy [32]

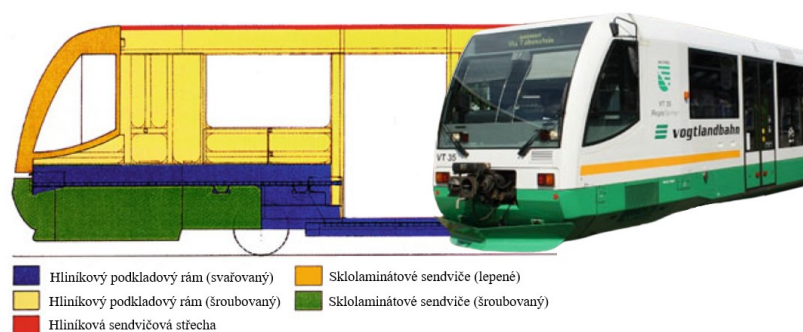
2.2 Železniční doprava

Kompozitní materiály a sendvičové panely jsou velmi lehkým a pevným konstrukčním prvkem, který umožňuje snížit celkovou hmotnost vlaků nebo tramvají, aniž by došlo k omezení mechanických vlastností. Díky skladbě panelů lze dosáhnout požadovaných vlastností v různých částech, což zvyšuje jejich efektivitu. Jedním z kompozitních panelů je PUROXIT, lehký panel nahrazující překližku v konstrukci podlahy. Toto řešení pomáhá snížit hmotnost podlahy až o 35 %. Kromě odolnosti proti ohni je odolný i proti slané vodě, další výhodou jsou dostatečné tepelně-izolační vlastnosti se schopností tlumit hluk. Díky těmto vlastnostem našel uplatnění zejména v konstrukci podlah pro vlaky, tramvaje nebo autobusy. [33]



Obrázek 26 Použití materiálů v železniční dopravě [33]

Mezi materiály, které byly použity jako jádra sendvičových kompozitů, patří voštinový nomex, polypropylen (PP), hliník, balsové dřevo a pěnová jádra. Mezi těmito jádry je voština z PP atraktivní pro dopravní aplikace díky svým vynikajícím vlastnostem jako je nízká hmotnost, odolnost proti nárazu, výborná přilnavost, recyklovatelnost a tepelná izolace. [12]



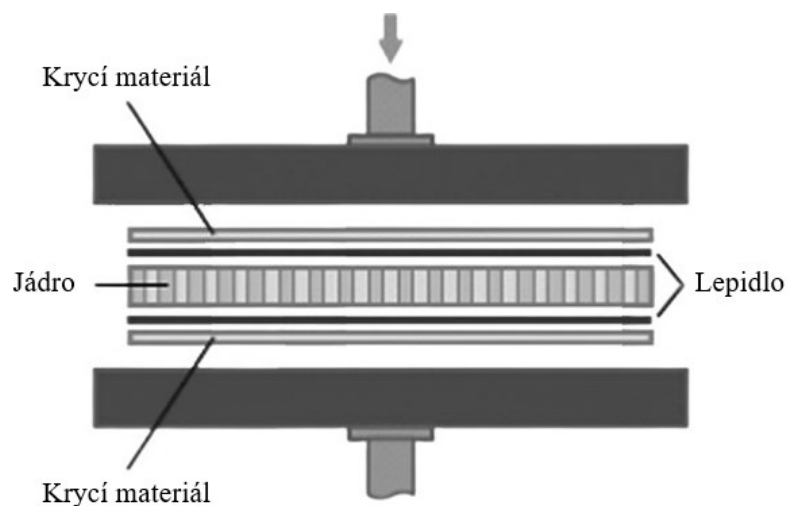
Obrázek 27 Vlak společnosti Vogtlandbahn [34]

3 TECHNOLOGIE VÝROBY SENDVIČOVÝCH KONSTRUKCÍ

Pokud jde o výrobu finálních konstrukčních sendvičových kompozitních dílů, existují dvě hlavní možnosti. První možností je lepení samostatně připravených krycích desek k jádrům. Druhou možností je proces spojování, který vyžaduje přísnou kontrolu kvality. Při této metodě dochází k současnému vytvrzení lepidla sendvičových panelů a kompozitních materiálů. Mezi nejpoužívanější výrobní technologie patří vakuové tvarování a lisování v autoklávu, technologie vstřikování kapalin RTM a infuze, lisování, navíjení vláken a ruční kladení. [15]

3.1 Lisování

Technologie lisování používaná při výrobě sendvičových konstrukcí je podobná technologii používané při výrobě monolitických kompozitů. Tato metoda umožňuje rychlou hromadnou výrobu ve srovnání s jinými metodami používanými při výrobě sendvičových laminátů. Při výrobě laminátových dílů se postupuje ve dvou krocích. Zpočátku se dutina formy naplní v otevřené poloze. Jakmile je naplněna, forma se rychle uzavře a musí na ni působit tlak, který nutí desky spojit se s jádrem. Během působení tlaku dochází také k vytvrzování materiálů působením tepla. Materiál jádra musí odolat lisovacímu tlaku a pokud je termoplastické povahy, může posílit přilnavost k čelním deskám. Díky jejich zahřívání dojde následně k roztavení povrchu jádra. Po dokončení vytvrzování se tlak uvolní a díl se vyjme. Touto metodou lze vyrábět díly s menšími rozměrovými odchylkami a lepší povrchovou úpravou ve srovnání s ručním kladením. Díly mají dobré mechanické vlastnosti se zvýšenou únavovou životností. Vložení nanočástic může vést ke zlepšení mechanických vlastností výrobků. [1,15]



Obrázek 28 Lisování sendvičové konstrukce [35]

3.2 Vytvrzování v peci

Přenos tepla v pecích je založen na stejném principu jako v autoklávu spočívá v konvekčním ohřevu. Teplonosné médium, kterým je obvykle vzduch, je jiné než v autoklávu, kde je jím obvykle stlačený dusík. Měrná tepelná kapacita vzduchu je však nižší než u stlačeného dusíku, a proto reaguje pomaleji. To znamená, že účinek a riziko exotermické reakce lze omezit pouze velmi pomalým zvyšováním teploty a velmi přesnou kontrolou. Ve srovnání s autoklávem jsou pece mnohem levnější, ale stále se jedná o dávkové výrobní procesy. Pokud je vyráběný díl příliš velký na stávající pec, je třeba pořídit zcela nové zařízení na výrobu. [36]



Obrázek 29 Pec od firmy ASC [37]

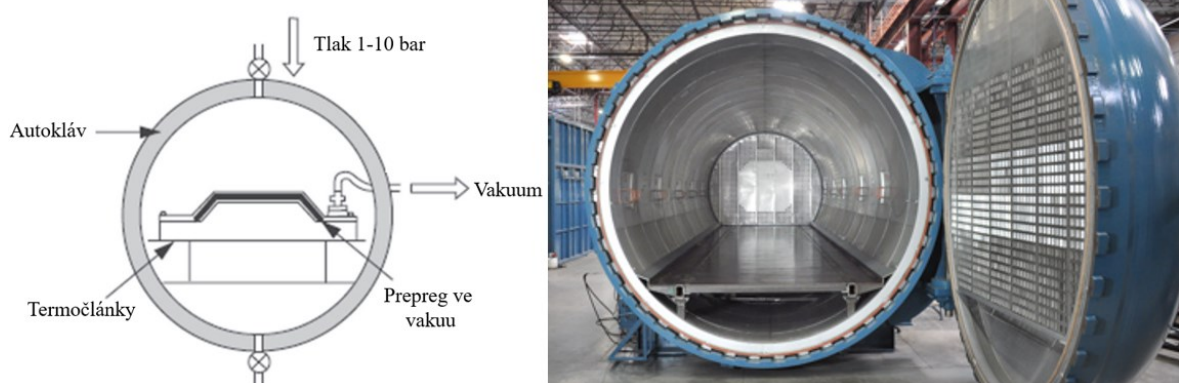
- Výhody:** nízké investice,
snadné použití,
velký počet dílů lze vytvrdit za jeden cyklus
- Nevýhody:** rychlost přestupu tepla je nižší než v autoklávu,
vysoká spotřeba energie,
dlouhá doba zpracování (především chlazení)
omezený prostor [36]

3.3 Vytvrzování v autoklávu

Vysoce výkonné kompozitní materiály se obvykle zpracovávají v autoklávech, které vyžadují vysoké kapitálové investice do zařízení. Náklady na zařízení exponenciálně rostou s velikostí autoklávu, což je jedno z hlavních omezení pro výrobu kompozitních materiálů pro výrobu velkých kompozitních konstrukcí. V případě zpracování v autoklávu lze sendvičové konstrukce obvykle pokládat a vytvrzovat v jednom cyklu. Při použití autoklávu může použití nadměrného tlaku vést k rozdrčení jádra. [15]

Vytvrzování v autoklávu je rozšířený proces vakuového tvarování (balení), při kterém se vyrábí přesnější a kvalitnější díly, kterých nelze dosáhnout procesem vakuového tvarování. Tento proces je pokročilý z hlediska kvality vyráběných dílů. Při této metodě se používá vysoký tlak a teplota s přesnou kontrolou, aby se kompozit zpevnil a zbavil dutin. Metoda používá jako vstupní materiál především kompozitní prepregy. Kvalita vyrobených dílů závisí na použitém tlaku, teplotě vytvrzování, době vytvrzování a použitých materiálech.

Toto uspořádání se natlakuje na tvarovací desku a později se vytvrdí, aby se dosáhlo požadovaného tvaru. Odlupovací vrstvy a odtrhové tkaniny plní podobnou funkci, jakou u procesu vakuového balení. Později se celá tato sestava vakuově zabalí, aby se odstranil veškerý vzduch přítomný ve vrstvách. Nakonec se vakuované díly později přemístí do autoklávu k vytvrzení. Tento proces je nákladný a vyžaduje mnoho úsilí a času k získání kvalitních dílů. Použití tohoto procesu je často omezeno na letecké a vojenské díly. [1]



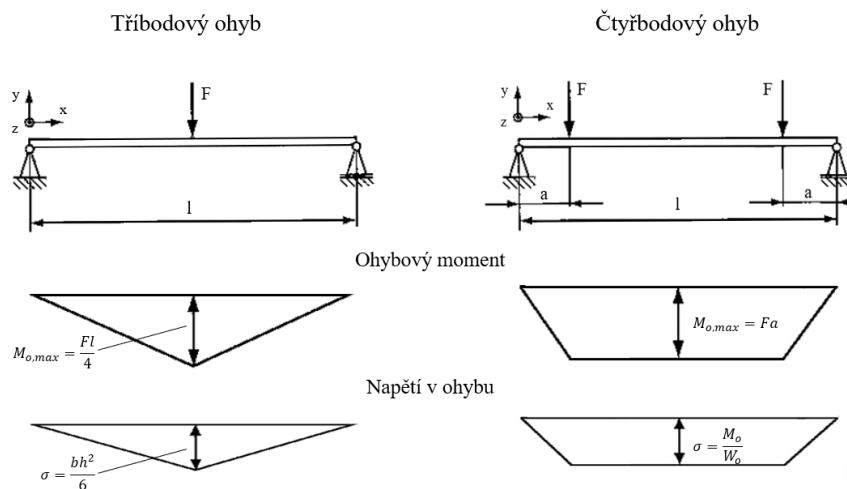
Obrázek 30 Vytvrzování v autoklávu [15,37]

4 ZKOUŠKY MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ

Byla vyvinuta řada zkušebních metod pro posouzení strukturálního chování sendvičových konstrukcí. Sendvičové konstrukce mohou selhat různými způsoby v závislosti na geometrických a výrobních vlastnostech spoje a způsobu zatížení, a proto byly vyvinuty zkušební metody, které simulují různé způsoby selhání. [38]

4.1 Ohybová zkouška

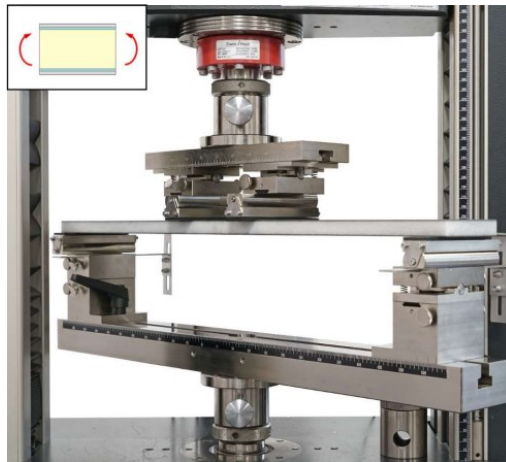
Hodnoty pevnosti v ohybu závisí na poloze vláken vzhledem k neutrální rovině. Zkouška se může provádět třibodovým nebo čtyřbodovým ohybem. Výhodou čtyřbodového je konstantní ohybový moment po celé délce vzorku, což je důležité pro stanovení modulu pružnosti. Při třibodovém vzniká napjatost s maximálním zatížením ve středu délky tělesa (v bodě lomu). Maximální smykové napětí se nachází uprostřed tloušťky tělesa. Je důležité sledovat typ porušení zkušebního tělesa. Přijatelným způsobem porušení je lom vyvolaný tlakem nebo tahem. Existuje mnoho norem pro ohyb různě vyztužených vzorků. [39]



Obrázek 31 Průběh třibodového a čtyřbodového ohybu [39]

Při zkouškách ohybem jsou nosníky obvykle vystaveny rovinnému ohybu. U sendvičových konstrukcí je ohyb pravděpodobně nejdůležitější zkouškou na úrovni konstrukčních prvků. Ohybové zkoušky mohou pokrýt celou řadu klíčových vlastností materiálu. Vzhledem k mechanickému principu fungování sendvičových nosníků se zkoušky ohybem používají nejen ke stanovení ohybové tuhosti sendvičové konstrukce, ale také k určení modulu pružnosti ve smyku, pevnosti jádra, ale také i modul pružnosti a pevnost krycích desek. Kromě toho mohou ohybové zkoušky také ukázat porušení vazby mezi krycí deskou a

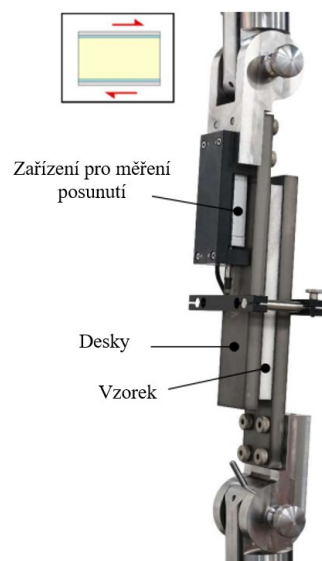
jádrem. Čtyřbodové ohýbání je standardní konfigurace pro sendvičové ohybové zkoušky. Předpokládaným způsobem selhání je selhání krycí desky. [40, 41]



Obrázek 32 Zkouška čtyřbodovým ohybem [40]

4.2 Smyková zkouška

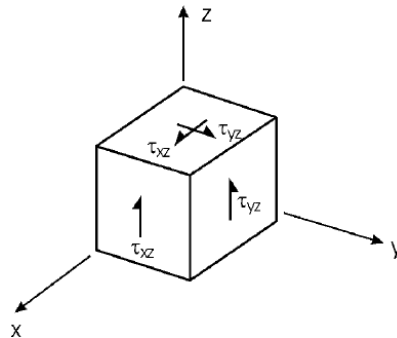
Cílem zkoušky příčným smykem je stanovit modul pružnosti ve smyku a pevnost jádra. Stejně jako ostatní zkoušky jádra je příčný smyk normalizovanou zkouškou. Jádro sendviče je vystaveno především smykovému zatížení, přestože je velmi lehké, musí vykazovat dostatečné smykové vlastnosti. Porušení ve smyku jádra je jediným přípustným způsobem porušení. Tato zkouška neprodukuje čistý smyk, podle technických norem však mají vedlejší napětí minimální vliv, pokud je délka vzorku dostatečná. [40,41]



Obrázek 33 Zkouška příčným smykem [40]

U jádrových materiálů má zásadní význam smyková odezva mimo rovinu. Moduly ve smyku mimo rovinu G_{xz} a G_{yz} a pevnosti ve smyku S_{xz} a S_{yz} se určují vystavením jádrového prvku

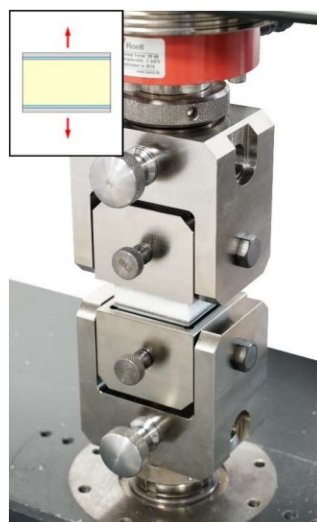
smykovým napětím τ_{xz} a τ_{yz} podle Obrázku 34. Rozměry zkušební vzorku (délka, tloušťka a šířka) by měly být změřeny před lepením vzorku na zatěžovací desky. Pro stanovení pevnosti ve smyku silných materiálů s jádrem je zapotřebí velmi silné epoxidové lepidlo letecké kvality. Vzorek by měl být zatěžován rychlostí 0,5 mm/min, přičemž se zaznamenává závislost zatížení na smykovém posunu, dokud nedojde k selhání zkušební vzorku. [42]



Obrázek 34 Jádro při smykovém napětí τ_{xz} a τ_{yz} [42]

4.3 Zkouška tahem na plocho

Tato zkušební metoda umožňuje především stanovit modul a pevnost v tahu naplocho sendvičového jádra. V případě, že se zkouší lepený sendvičový panel, může rovněž umožnit stanovení vazby mezi jádrem a čelními deskami. Při této zkoušce jsou vzorky vystaveny tahovému zatížení v normálu k rovině sendviče pomocí samonastavených tuhých desek, aby byl zajištěn středový přenos zatížení. Zkouškou plošného tahu se zjišťuje nejslabší pevnost sendvičové konstrukce při tahovém zatížení ve směru tloušťky. Cílem této zkoušky je zjistit pevnost materiálu jádra a krycích desek, lepicího spoje mezi krycí deskou a jádrem. [40, 41]



Obrázek 35 Zkouška tahem na plocho [40]

4.4 Vady voštinového jádra

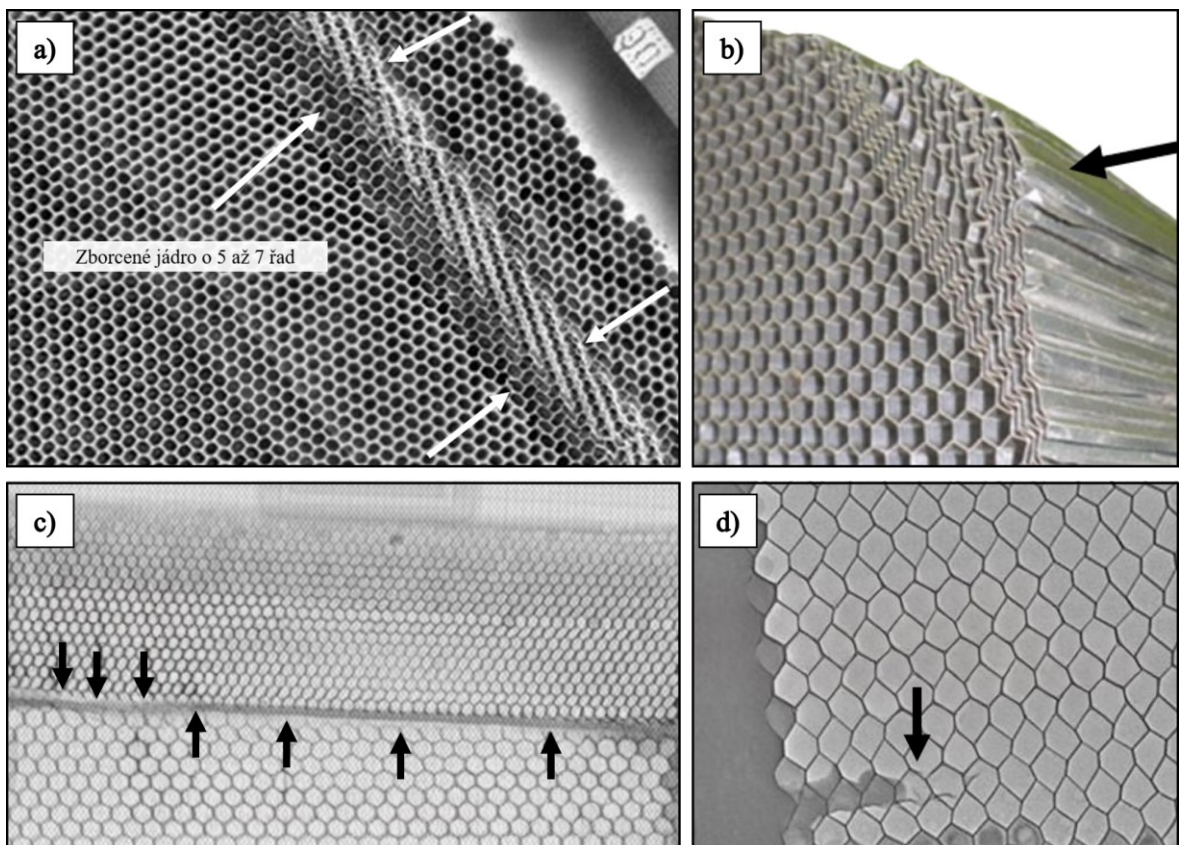
Kromě rozdrcení (zhroucení jádra rovnoběžně s osou buněk) mohou jádra trpět dalšími vadami, které se mohou vyskytovat při výrobě, ale také během provozu:

a) **zborcení jádra**, které je obecným příčným posunem buněk vzhledem k jejich ose,

b) **stlačení jádra**, které je příčným narušením velikosti buněk vzhledem k jejich ose,

c) **rozpojení jádra**, neplánované nepřilnutí (neslepení)

d) **roztržené jádro**, které je charakterizováno lámáním buněk ve směru kolmém na osu buněk, přičemž tato vada často souvisí s nadměrným rozdrcením jádra. [43]



Obrázek 36 Vady voštin [43]

a) zborcení jádra b) stlačení jádra c) rozpojení jádra d) roztržení jádra

II. PRAKTICKÁ ČÁST

5 CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE

Cílem diplomové práce je porovnat prepregy s odlišným prosycením pryskyřice a více druhů jader s cílem určit vhodnější sendvičovou strukturu pro dále zvolený prototypový díl do leteckého průmyslu.

Byly vyrobeny zkušební tělíska pro čtyři typy jader (pěna 50 RS, korek NL 10 a NL 20, nomexová voština a balsové dřevo) s prepregem GG 90 P s pryskyřicí IMP 509 a prepregem CC 95 P s pryskyřicí ER 68 se zvolenou orientací (0-45°-0-45°-jádro-0-45°-0-45°)

Z dosažených výsledků byla vybrána skladba prepregů, typ prepregu a materiál jádra vhodný pro výrobu prototypu. V rámci prototypové výroby byl navržen sklápěcí stůl do letadla a následně vypracován jeho technologický postup.

Cíle diplomové práce můžeme formulovat:

- Volba prepregu vhodného pro technologii lisování.
- Výroba zkušebních sendvičových desek s různým typem jader a dvěma typy prepregů.
- Nařezání zkušebních tělísek pro experimentální testování dle technických norem.
- Experimentální testování v souladu s technickými normami.
- Návrh dílu a jeho technologického postupu pro prototypovou výrobu.
- Vyhodnocení naměřených výsledků a diskuze.
- Závěr diplomové práce.

6 VÝROBA ZKUŠEBNÍCH DESEK

Před výrobou zkušebních desek bylo nezbytné vybrat vhodné typy prepregů s plátovou vazbou pro lisování za tepla. Pro tento účel byly zvoleny 2 typy uhlíkových prepregů s odlišným prosycením pryskyřice prepreg GG 90 P s pryskyřicí IMP 509 a prepreg CC 95 P s pryskyřicí ER 68 uvedeno v Tabulce 3.

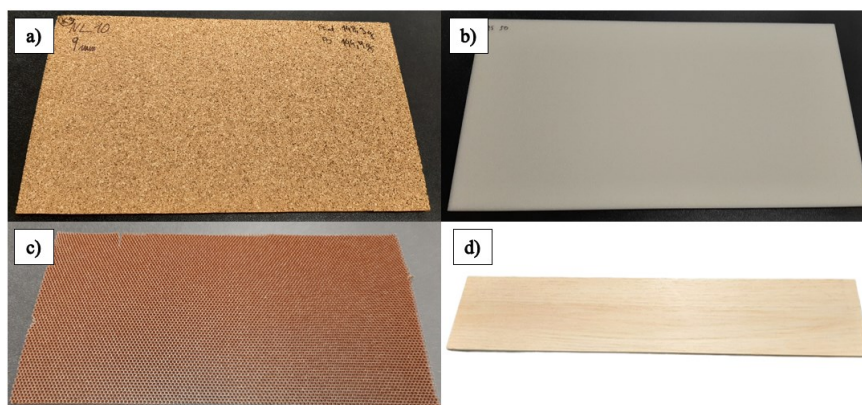
Tabulka 3 Vlastnosti matric pro zvolené prepregy

Vlastnosti	IMP 509	ER 68
Obsah pryskyřice	43 %	50 %
Hustota	1,19 - 1,22 g·cm ⁻³	1,2 g·cm ⁻³
Lepivost	střední	vysoká
Doba skladování při 23 °C	4 týdny	3 týdny
Doba skladování při -18 °C	12 měsíců	6 měsíců

Dále byly vybrány a použity 4 typy jader: pěna 50 RS od firmy Cascell [44], nomexová voština s šestihrannými buňkami [45], balsové dřevo a korek NL 10 a NL 20 [46, 47] viz. Obrázek 37.

Tabulka 4 Tloušťka jednotlivých jader

Jádro	Tloušťka jader
Nomexová voština	5
Balsa	6
Korek	9
Pěna 50 RS	10



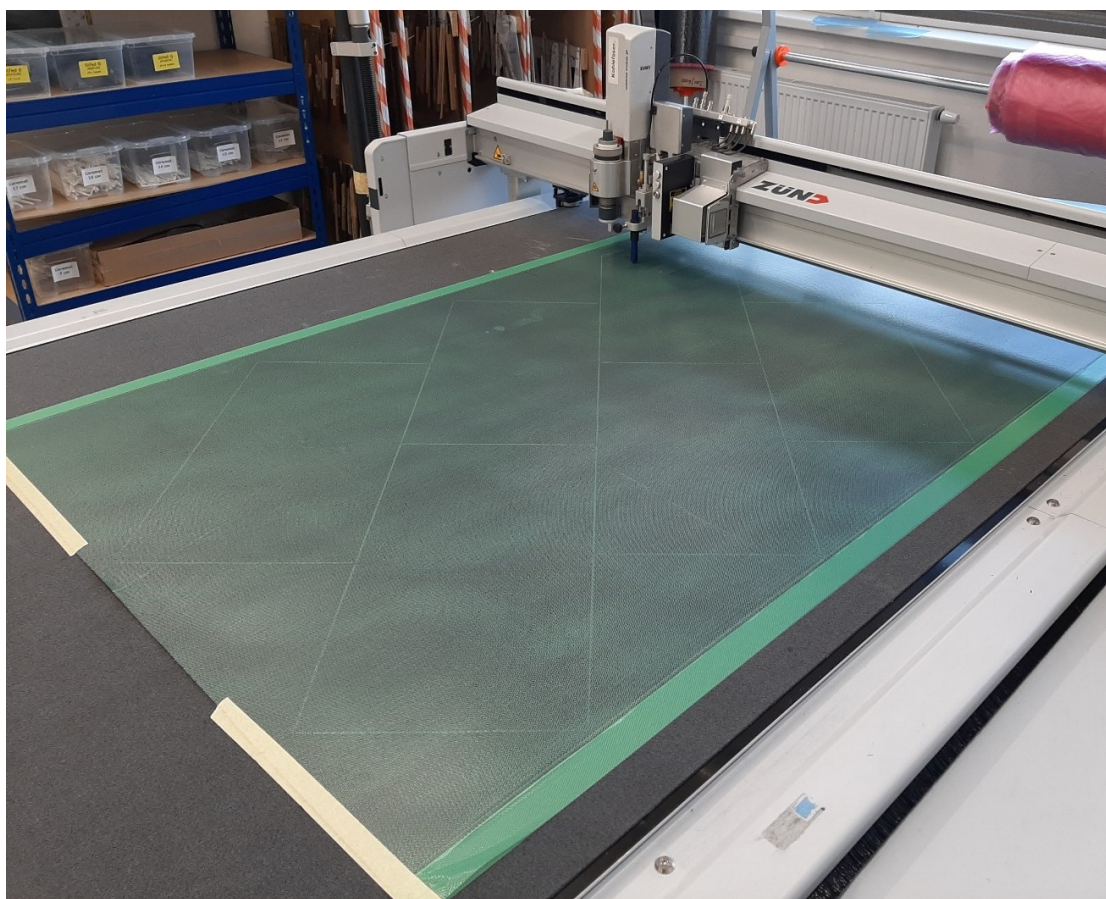
Obrázek 37 Použitá jádra a) korek b) pěna c) nomexová voština d) balsa

6.1 Příprava formy

Jako forma byla použita broušená deska z hliníkové slitiny CERTAL. Nejprve se očistila od zaschlé pryskyřice z předešlého vytvrzování a následně na ní byl nanesen za pomoci papírového ubrousku plnič pórů Sealer15 Chemtrend. Tento postup se opakoval 4x po 15 minutách dle technického listu výrobce. Po posledním nanesení a rozleštění plniče se forma nechala zaschnout, poté na ní byly nanесeny 4 vrstvy separátoru PMR90-EZ. Následně byla forma připravena k používání.

6.2 Nástřih prepregů a jader

Prepreg byl dostatečně předem vytažen z mrazáku, který byl nastaven na $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$. Po několika hodinách byl nařezán na CNC plotteru na pláty pod úhlem 0° a 45° dle nástřihového plánu. Jádra byla nařezána ručně pomocí odlamovacího nože.



Obrázek 38 Řezání prepregů na CNC plotteru

6.3 Příprava jader

Kvůli minimalizaci vzniku trhlin a deformaci byla jádra z přírodních materiálů (balsa a korek) vložena do sušárny značky Memmert UF 750 m. Jádra byla volně rozložena, tak aby se navzájem nedotýkala. Poté byly na sušárně nastaveny jednotlivé parametry dle Tabulky 5.

Tabulka 5 Nastavené hodnoty sušárny

Teplota	Ventilátor	Čas	Klapka
70 °C	40 %	1h 30 m	20 %



Obrázek 39 Balsa a korek v sušárně

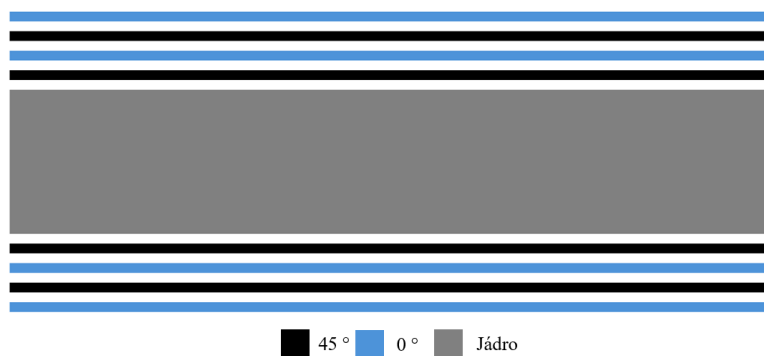
Před sušením byl korek s balsou zvážen na laboratorních vahách. Stejný postup byl proveden i po vysušení a vychladnutí. V Tabulce 6 lze vidět rozdíl v hmotnostech před a po vysušení jednotlivých jader. Všechny nařezaná jádra byla následně očištěna technickým benzínem za pomoci papírového ubrousku a následně odložena na připravený stůl taktéž očištěný technickým benzínem.

Tabulka 6 Hmotnosti jader před a po vysušení

	Balsa I	Balsa II	Balsa III	Korek 1 (NL 20)	Korek 2 (NL 10)
Hmotnost (před sušením)	69,1 g	65,0 g	80,6 g	148,3 g	148,3 g
Hmotnost (po sušením)	65,8 g	61,9 g	76,7 g	144,9 g	144,9 g

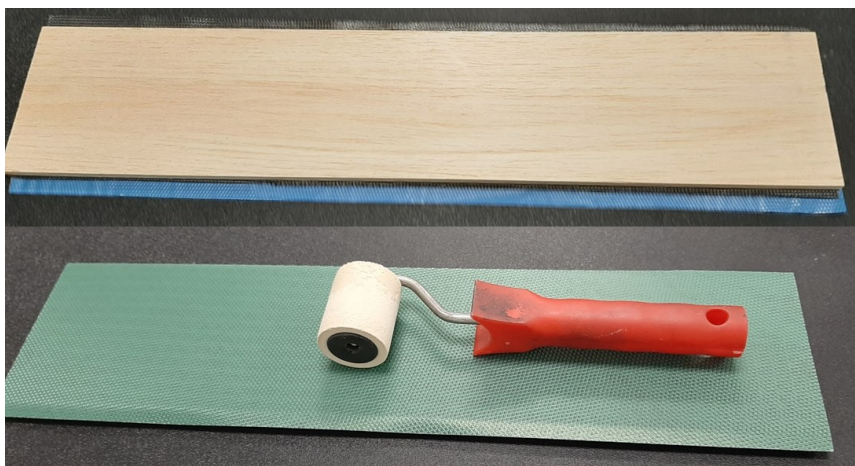
6.4 Vrstvení prepregu na jádro

Skládání prepregů je rozděleno na 2 typy výroby. Pro korek, pěnu a balsu bylo skládání totožné. Vrstvení probíhalo položením 4 vrstev prepregů (ze kterých byla odtrhnuta fólie) střídavě pod úhlem 45° a 0° . Tento postup se opakoval i pro druhou stranu sendviče. Skladba sendvičové struktury lze vidět na Obrázku 40.



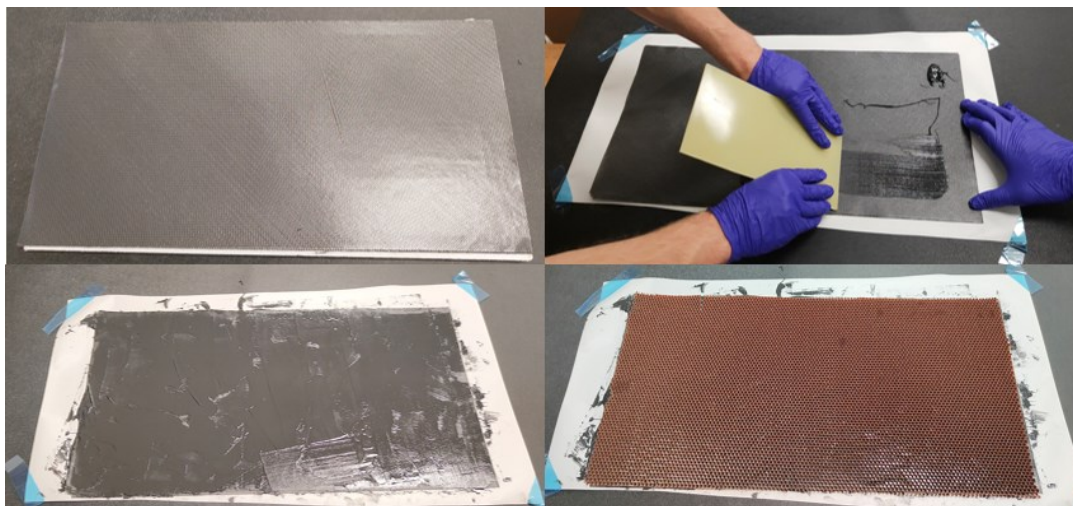
Obrázek 40 Schéma vrstvení sendvičové konstrukce

Po položení každé vrstvy byly za pomoci válečku odstraněny vzduchové bubliny z prepregu jak lze vidět na Obrázku 41.



Obrázek 41 Položení 1. vrstvy na jádro a odstraňování bublin pomocí válečku

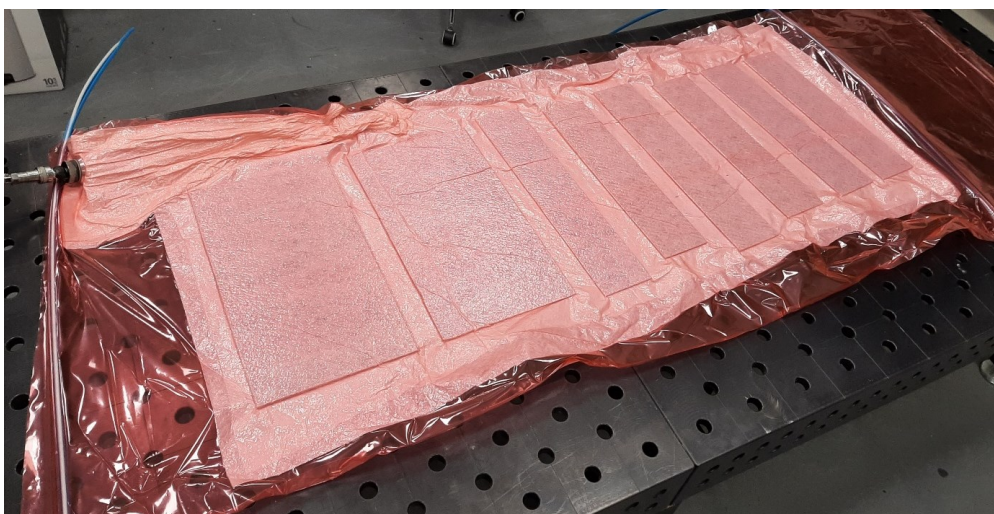
Pro nomexovou voštinu bylo skládání prepregů odlišné, oproti ostatním jádrům. Jednotlivé vrstvy prepregů se naskládaly na sebe (4 vrstvy). Po každé vrstvě se taktéž za pomoci válečku odstraňovaly vzduchové bubliny. Po debulkingu se na navrstvené prepregy nanasla černá epoxidová pasta IMPAS-01. Na rozetřené pastu se byla položena a přitlačena voština. Tento postup se opakoval stejně i pro druhou stranu sendvičové struktury.



Obrázek 42 Postup výroby sendvičové konstrukce s voštinovým jádrem

6.5 Debulking

Po naskládání prepregů na jádro se desky zabalily do odsávací rohože a vložily do vakuové folie, která byl dostatečně uzavřena, aby mohl vzniknout podtlak. Debulking slouží k vytlačení možných bublinek a lepšímu spojení jednotlivých vrstev prepregu s jádrem. Celý proces trval 15 minut pod tlakem 0,94 bar.



Obrázek 43 Debulking

6.6 Lisování

Sendvičové desky byly lisovány na lisu od firmy Meccatronica Automazioni Obrázek 44. Lis byl nahřátý na teplotu 135 °C. Do lisu byla vložena spodní část formy, na kterou byla položena sendvičová deska a následně byla zakryta horní částí formy. Vzdálenost a tlak který působil na sendvičové desky se lišil podle použitého jádra. Každá deska byla lisována 11 minut. Po vyjmutí desek a ochlazení, byly následně nařezány na tělíska o rozměrech dle technických norem. V Tabulce 7 je znázorněno nastavení lisu, při kterém byly vyráběny sendvičové desky.



Obrázek 44 Lis

Tabulka 7 Nastavení lisu

Uzavírací síla	10 t
Čas	660 s
Teplota	135 °C
Rozměry formy	60x30x1 cm

7 MECHANICKÉ ZKOUŠKY

Na zkušebních tělískách byly provedeny zkoušky ohybem, cyklickým ohybem a zkouška tahem na plocho. Všechny zkoušky byly provedeny v laboratořích fakulty technologické Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně. Z vytvrzených desek byla nařezány tělíska, jednotlivé rozměry tělísek jsou zapsány u jednotlivých zkoušek.

7.1 Zkouška ohybem (ASTM C393)

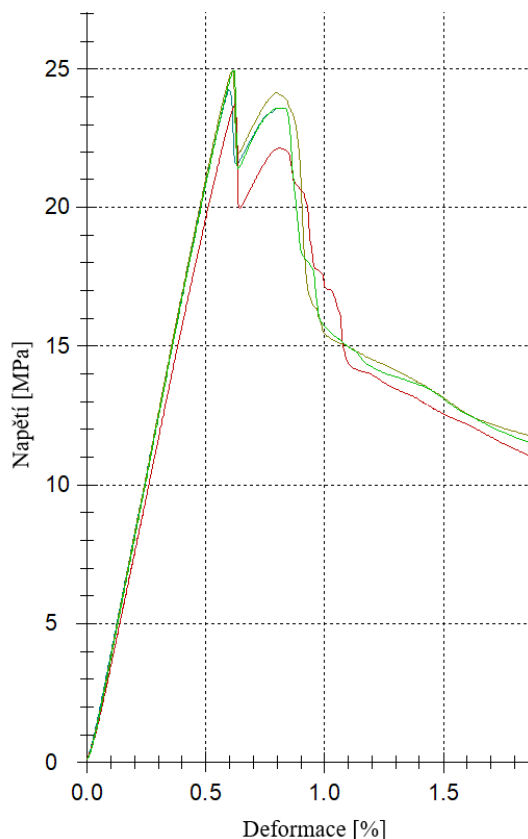
Zkouška byla provedena na univerzálním (trhacím) stroji ZWICK/Roell 1456. Zkušební tělíska byla o rozměrech 210x50 mm. Tloušťka sendvičů se pro jednotlivé typy jader lišila a byla měněna v průběhu měření. Podpěry od sebe byly vzdáleny 160 mm, jak uvádí norma. Zkušební tělíska byla mezi podpěry vkládána symetricky.



Obrázek 45 Zkouška ohybem

7.1.1 Sendvičová struktura s pěnovým jádrem

a) Prepreg s pryskyřicí ER 68



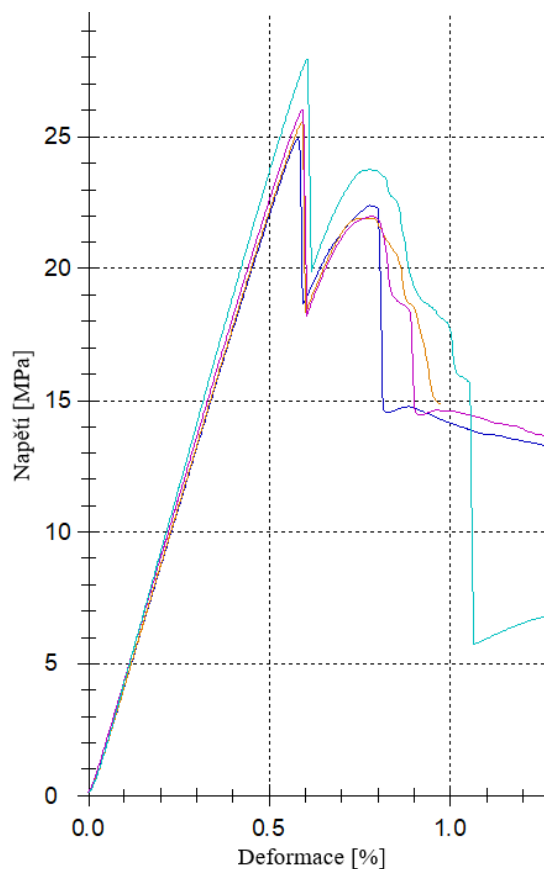
Obrázek 46 Závislost ohybového napětí na deformaci pro tělíska s pěnou + ER 68

Na Obrázku 46 je zobrazen průběh měření tělísek se sendvičovou strukturou z uhlíkového prepregu CC 95 P s pryskyřicí ER 68 a pěnového jádra 50 RS. V Tabulce 8 je vypočítán aritmetický průměr se směrodatnou odchylkou ze 4 měření pro pružnost v ohybu $E_f = 4280 \pm 141$ MPa, síla potřebná k porušení tělíska je 581 ± 14 N, pevnost v ohybu $\sigma_f = 24,46 \pm 0,58$ MPa, pro vykonanou práci $W_f = 710,2 \pm 18,3$ Nmm, pro deformaci ohybem $\varepsilon_f = 0,61 \pm 0,01$ % a pro průhyb $s = 2,4 \pm 0,1$ mm.

Tabulka 8 Naměřené hodnoty z ohybové zkoušky pro tělíska s pěnou + ER 68

n	E_f [MPa]	F [N]	σ_f [MPa]	W_f [Nmm]	ε_f [%]	s [mm]
1	4330	576	24,24	691,0	0,59	2,3
2	4380	592	24,91	722,0	0,61	2,4
3	4070	564	23,74	698,6	0,61	2,4
4	4330	593	24,96	729,2	0,61	2,4
\bar{x}	4280	581	24,46	710,2	0,61	2,4
$s_{\bar{x}}$	141	14	0,58	18,3	0,01	0,1
$v_{\bar{x}}$ [%]	3,3	2,4	2,39	2,6	2,11	2,1

b) Prepreg s pryskyřicí IMP 509



Obrázek 47 Závislost ohybového napětí na deformaci pro tělíska s pěnou + IMP 509

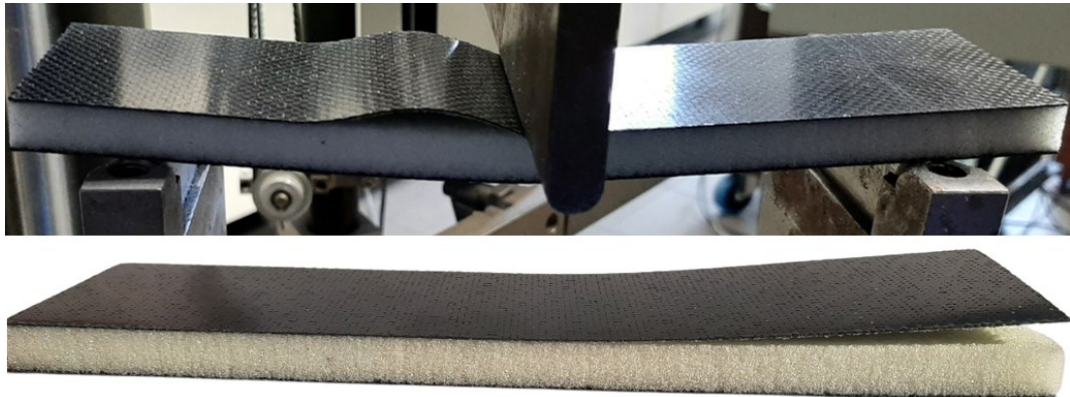
Obrázek 47 znázorňuje průběh měření tělísek se sendvičovou strukturou z uhlíkového prepregu GG 90 P s pryskyřicí IMP 509 a pěnovým jádrem 50 RS. Tabulka 9 prezentuje naměřené hodnoty z tohoto měření a je zde také vypočítán aritmetický průměr se směrodatnou odchylkou ze 4 měření pro pružnost v ohybu $E_f = 4670 \pm 162$ MPa, sílu potřebnou k porušení tělíska 610 ± 30 N, pevnost v ohybu $\sigma_f = 26,1 \pm 1,3$ N, také pro vykonanou práci $W_f = 724,9 \pm 49,9$ Nmm, pro deformaci ohybem $\varepsilon_f = 2,35 \pm 0,05$ % a průhyb $s = 2,33 \pm 0,05$ mm.

Tabulka 9 Naměřené hodnoty z ohybové zkoušky pro tělíska s pěnou + IMP 509

n	E_f [MPa]	F [N]	σ_f [MPa]	W_f [Nmm]	ε_f [%]	s [mm]
1	4560	582	24,9	672,9	2,33	2,30
2	4590	597	25,6	707,4	2,33	2,30
3	4630	608	26,1	727,8	2,33	2,30
4	4910	652	27,9	791,7	2,43	2,40
\bar{x}	4670	610	26,1	724,9	2,35	2,33
$s_{\bar{x}}$	162	30	1,3	49,9	0,05	0,05
$v_{\bar{x}}$ [%]	3	5	4,9	6,9	2,15	2,15

7.1.1.1 Poruchy sendvičů s pěnovým jádrem

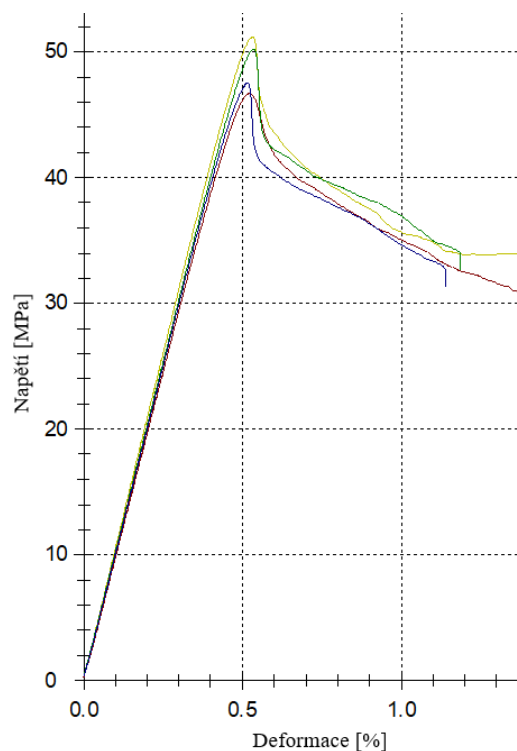
Obrázek 48 znázorňuje běžné typy selhání, ke kterým docházelo u sendvičových struktur s pěnovým jádrem. Jedním z nejčastějších poruch byla delaminace (odloupnutí vrstev prepregu) z tlakové strany od středu jádra. Dalším typem selhání, které lze na obrázku pozorovat je delaminace v oblasti okraje sendvičové struktury, avšak k tomu došlo pouze v ojedinělém případě.



Obrázek 48 Poruchy sendvičů s pěnovým jádrem

7.1.2 Sendvičová struktura s voštinovým jádrem

a) Prepreg s pryskyřicí ER 68



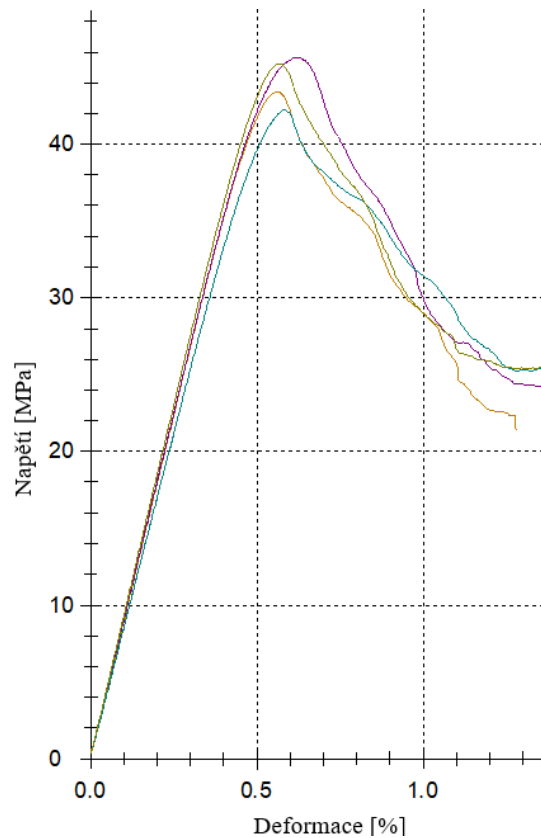
Obrázek 49 Závislost ohybového napětí na deformaci pro tělíska s voštinou + ER 68

Na Obrázku 49 je zobrazen průběh měření tělísek se sendvičovou strukturou z uhlíkového prepregu ER 68 a nomexovou voštinou. V Tabulce 10 jsou shrnuty naměřené výsledky a také aritmetický průměr se směrodatnou odchylkou ze 4 provedených měření pro pružnost v ohybu $E_f = 10100 \pm 219$ MPa, sílu potřebnou k porušení tělíska 360 ± 16 N, pevnost v ohybu $\sigma_f = 48,9 \pm 2,1$ N, pro vykonanou práci $W_f = 718,6 \pm 38,0$ Nmm, pro deformaci ohybem $\varepsilon_f = 2,11 \pm 0,03$ % a průhyb $s = 3,75 \pm 0,06$ mm.

Tabulka 10 Naměřené hodnoty z ohybové zkoušky pro tělíska s voštinou + ER 68

n	E_f [MPa]	F [N]	σ_f [MPa]	W_f [Nmm]	ε_f [%]	s [mm]
1	10400	376	51,2	755,6	2,14	3,80
2	9880	343	46,7	685,8	2,08	3,70
3	10100	369	50,2	747,0	2,14	3,80
4	10000	350	47,6	686,0	2,08	3,70
\bar{x}	10100	360	48,9	718,6	2,11	3,75
$s_{\bar{x}}$	219	16	2,1	38,0	0,03	0,06
$v_{\bar{x}}$ [%]	2,2	4,3	4,32	5,3	1,54	1,54

b) Prepreg s pryskyřicí IMP 509



Obrázek 50 Závislost ohybového napětí na deformaci pro tělíska s voštinou + IMP 509

Na Obrázku 50 je zobrazen průběh měření tělísek se sendvičovou strukturou z uhlíkového prepregu IMP 509 s nomexovou voštinou. V Tabulce 11 je vypočítán aritmetický průměr se směrodatnou odchylkou ze 4 měření pro pružnost v ohybu $E_f = 8880 \pm 307$ MPa, sílu potřebná k porušení tělíska 324 ± 12 N, pevnost v ohybu $\sigma_f = 44,1 \pm 1,6$ N, pro vykonanou práci $W_f = 760,4 \pm 57,4$ Nmm, pro deformaci ohybem $\varepsilon_f = 2,33 \pm 0,11$ % a průhyb $s = 4,15 \pm 0,19$ mm.

Tabulka 11 Naměřené hodnoty z ohybové zkoušky pro tělíska s voštinou + IMP 509

n	E_f [MPa]	F [N]	σ_f [MPa]	W_f [Nmm]	ε_f [%]	s [mm]
1	8960	319	43,4	719,2	2,25	4,00
2	8950	335	45,6	844,3	2,48	4,40
3	8440	310	42,2	728,0	2,36	4,20
4	9160	333	45,3	750,2	2,25	4,00
\bar{x}	8880	324	44,1	760,4	2,33	4,15
$s_{\bar{x}}$	307	12	1,6	57,4	0,11	0,19
$v_{\bar{x}}$ [%]	3	4	3,7	7,6	4,61	4,61

7.1.2.1 Poruchy sendvičů s voštinovým jádrem

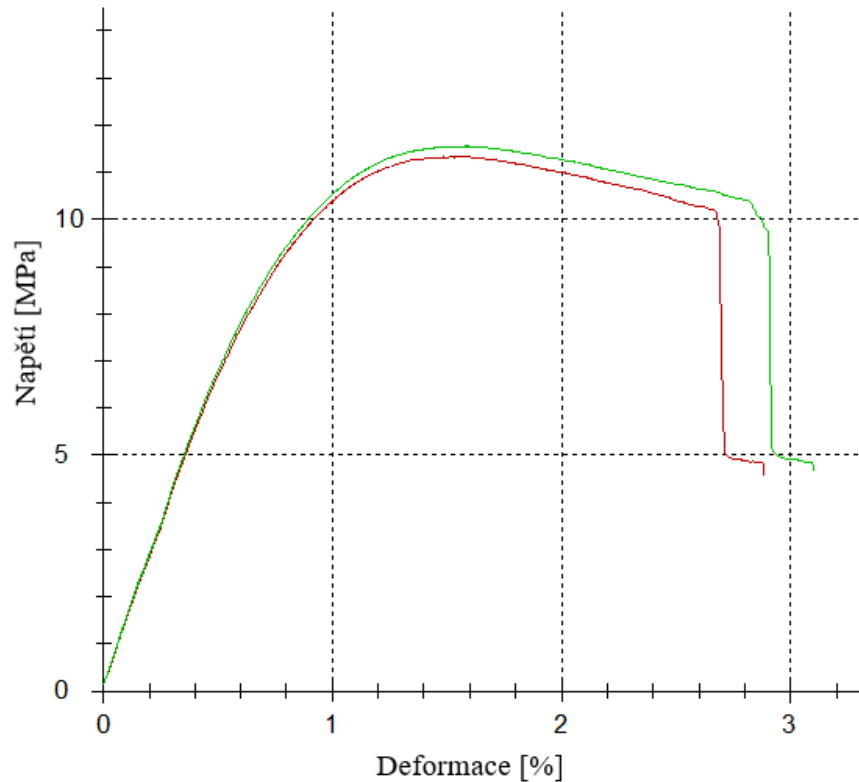
Sendvičové struktury s voštinovým jádrem vykazovaly pouze jeden typ porušení. Jednalo se o smykovou poruchu doprovázenou porušením voštinového jádra, které lze vidět na Obrázku 51.



Obrázek 51 Poruchy sendvičů s voštinovým jádrem

7.1.3 Sendvičová struktura s korkovým jádrem

a) Korek NL 20 s prepregem ER 68



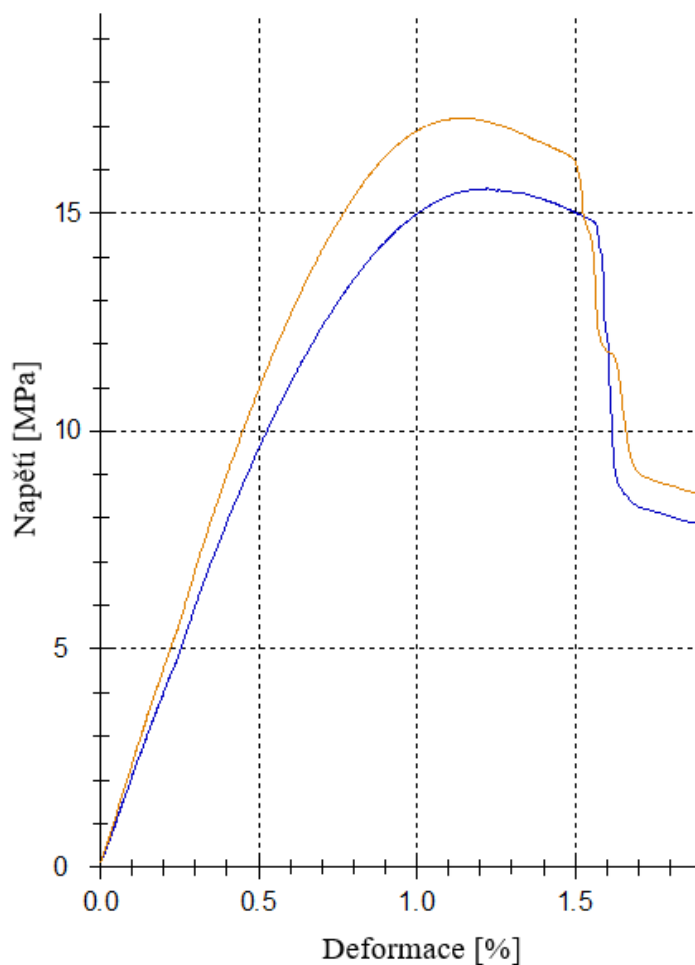
Obrázek 52 Závislost ohybového napětí na deformaci pro tělíska s korkem + ER 68

Na Obrázku 52 je zobrazen průběh měření tělísek se sendvičovou strukturou z uhlíkového prepregu ER 68 s jádrem z korku. V Tabulce 12 je vypočítán aritmetický průměr se směrodatnou odchylkou ze 2 měření pro pružnost v ohybu $E_f = 1330 \pm 15$ MPa, sílu potřebnou k porušení tělíska je 212 ± 3 N, pevnost v ohybu $\sigma_f = 11,46 \pm 0,15$ N, vykonanou práci $W_f = 1048,7 \pm 41,5$ Nmm, deformaci ohybem $\varepsilon_f = 6,30 \pm 0,13$ % a pro průhyb $s = 7,10 \pm 0,14$ mm.

Tabulka 12 Naměřené hodnoty z ohybové zkoušky pro tělíska s korkem + ER 68

n	E_f [MPa]	F [N]	σ_f [MPa]	W_f [Nmm]	ε_f [%]	s [mm]
1	1320	210	11,35	1019,4	6,21	7,00
2	1340	214	11,57	1078,0	6,39	7,20
\bar{x}	1330	212	11,46	1048,7	6,30	7,10
$s_{\bar{x}}$	15	3	0,15	41,5	0,13	0,14
$v_{\bar{x}}$ [%]	1	1	1,33	4,0	1,99	1,99

b) Korek NL 10 s prepregem IMP 509



Obrázek 53 Závislost ohybového napětí na deformaci pro tělíska s korkem + IMP 509

Na Obrázku 53 je zobrazen průběh měření tělísek se sendvičovou strukturou z uhlíkového prepregu IMP 509 s jádrem z korku. V Tabulce 13 je vypočítán aritmetický průměr se směrodatnou odchylkou ze 2 měření pro pružnost v ohybu $E_f = 2060 \pm 190$ MPa, sílu potřebnou k porušení tělíska 303 ± 21 N, pevnost v ohybu $\sigma_f = 16,38 \pm 1,15$ N, vykonanou práci $W_f = 1024,7 \pm 3,3$ Nmm, deformaci ohybem $\varepsilon_f = 4,71 \pm 0,25$ % a pro průhyb $s = 5,30 \pm 0,28$ mm.

Tabulka 13 Naměřené hodnoty z ohybové zkoušky pro tělíska s korkem + IMP 509

n	E_f [MPa]	F [N]	σ_f [MPa]	W_f [Nmm]	ε_f [%]	s [mm]
1	1930	288	15,57	1022,4	4,88	5,50
2	2190	318	17,19	1027,1	4,53	5,10
\bar{x}	2060	303	16,38	1024,7	4,71	5,30
$s_{\bar{x}}$	190	21	1,15	3,3	0,25	0,28
$v_{\bar{x}}$ [%]	9,2	7,0	7,00	0,3	5,34	5,34

7.1.3.1 Poruchy sendvičů s korkovým jádrem

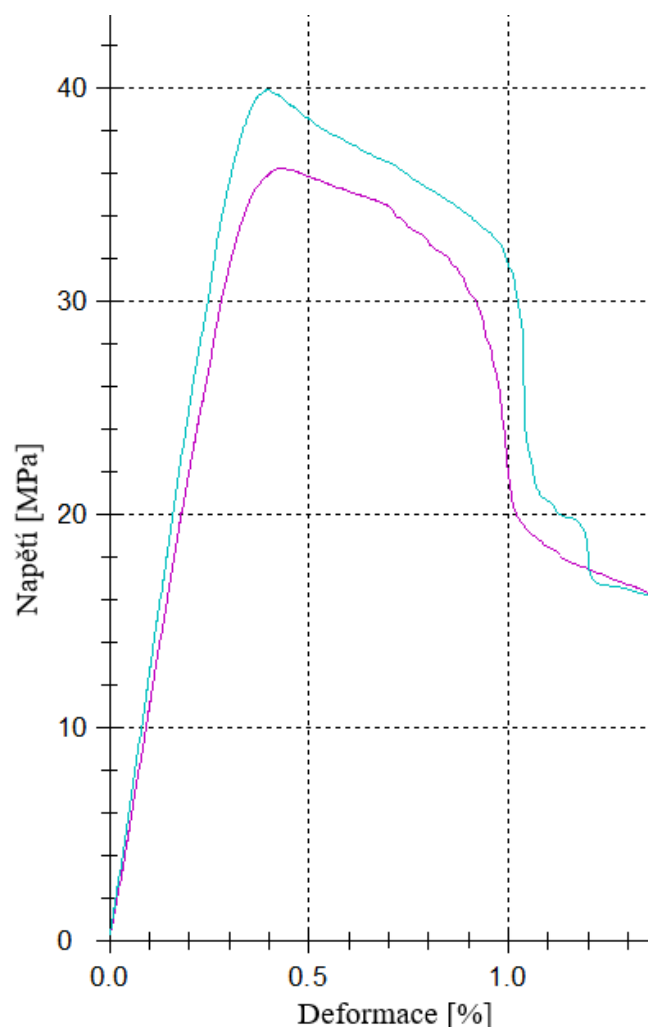
Obrázek 54 znázorňuje typický způsob porušení sendvičových struktur s korkovým jádrem. V místě zatížení docházelo k porušení povrchové vrstvy krycího materiálu (prepregu). Toto porušení se projevovalo v podobě trhlin a promáčknutí vrchní vrstvy.



Obrázek 54 Poruchy sendvičů s korkovým jádrem

7.1.4 Sendvičová struktura s jádrem z balsy II

a) Prepreg s pryskyřicí ER 68



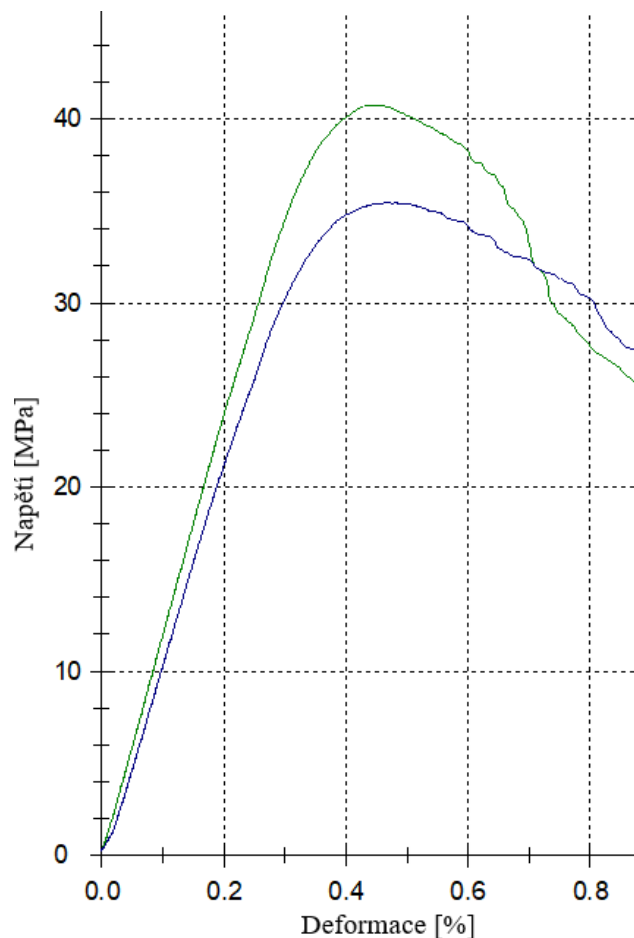
Obrázek 55 Závislost ohybového napětí na deformaci pro tělíska s balsou II + ER 68

Na Obrázku 55 je zobrazen průběh měření tělísek se sendvičovou strukturou z uhlíkového prepregu ER 68 s jádrem z balsového dřeva. V Tabulce 14 je vypočítán aritmetický průměr se směrodatnou odchylkou ze 2 měření pro pružnost v ohybu $E_f = 11600 \pm 954$ MPa, sílu potřebnou k porušení tělíska 399 ± 27 N, pevnost v ohybu $\sigma_f = 38,1 \pm 2,6$ N, vykonanou práci $W_f = 575,0 \pm 7,9$ Nmm, deformaci ohybem $\varepsilon_f = 1,62 \pm 0,10$ % a pro průhyb $s = 2,40 \pm 0,14$ mm.

Tabulka 14 Naměřené hodnoty z ohybové zkoušky pro tělíska z balsy II + ER 68

n	E_f [MPa]	F [N]	σ_f [MPa]	W_f [Nmm]	ε_f [%]	s [mm]
1	10900	379	36,2	580,6	1,69	2,50
2	12300	418	40,0	569,5	1,55	2,30
\bar{x}	11600	399	38,1	575,0	1,62	2,40
$s_{\bar{x}}$	954	27	2,6	7,9	0,10	0,14
$v_{\bar{x}}$ [%]	8,2	6,8	6,9	1,4	5,89	5,89

b) Prepreg s pryskyřicí IMP 509



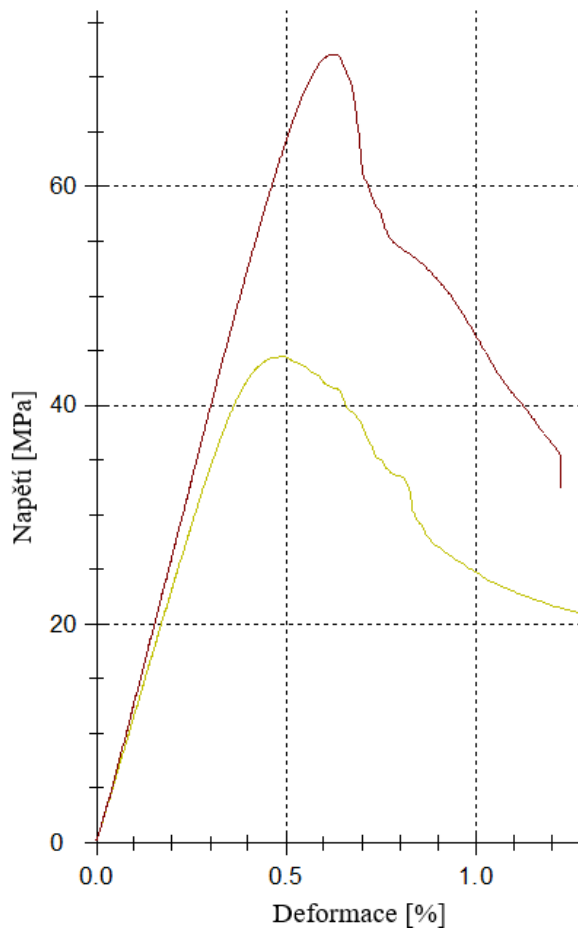
Obrázek 56 Závislost ohybového napětí na deformaci pro tělíska s balsou II + IMP 509

Na Obrázku 56 je zobrazen průběh měření tělísek se sendvičovou strukturou z uhlíkového prepregu IMP 509 s jádrem z balsového dřeva. V Tabulce 15 je vypočítán aritmetický průměr se směrodatnou odchylkou ze 2 měření pro pružnost v ohybu $E_f = 11300 \pm 754$ MPa, sílu potřebnou k porušení tělíska 387 ± 38 N, pevnost v ohybu $\sigma_f = 38,1 \pm 3,8$ N, vykonanou práci $W_f = 656,3 \pm 24,4$ Nmm, deformaci ohybem $\varepsilon_f = 1,82 \pm 0,05$ % a pro průhyb $s = 2,75 \pm 0,07$ mm.

Tabulka 15 Naměřené hodnoty z ohybové zkoušky pro tělíska z balsy II + IMP 509

n	E_f [MPa]	F [N]	σ_f [MPa]	W_f [Nmm]	ε_f [%]	s [mm]
1	11800	414	40,8	673,5	1,78	2,70
2	10700	360	35,5	639,1	1,85	2,80
\bar{x}	11300	387	38,1	656,3	1,82	2,75
$s_{\bar{x}}$	754	38	3,8	24,4	0,05	0,07
$v_{\bar{x}}$ [%]	6,7	9,9	9,9	3,7	2,57	2,57

7.1.5 Sendvičová struktura s jádrem z balsy III + ER 68



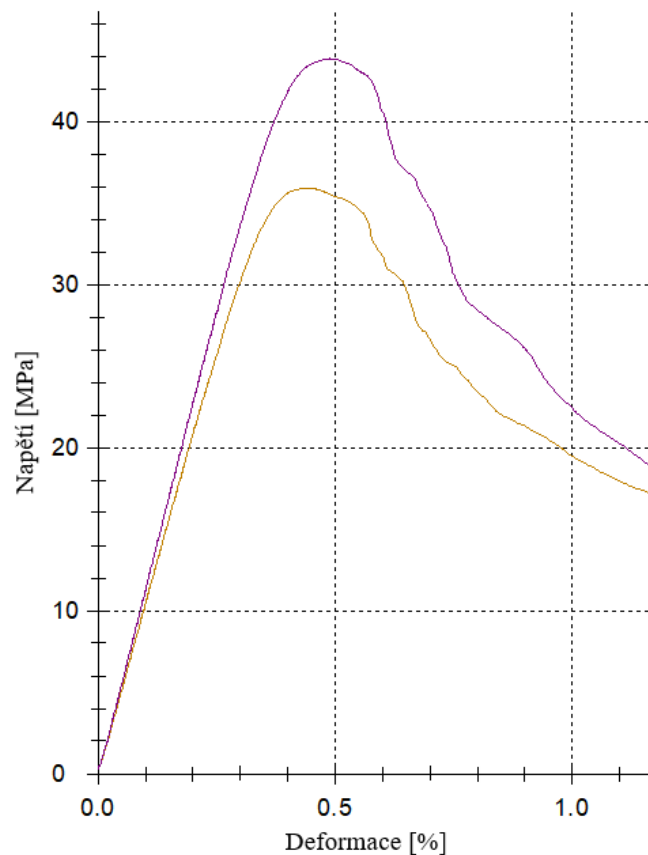
Obrázek 57 Závislost ohybového napětí na deformaci pro tělíska s balsou III + ER 68

Na Obrázku 57 je zobrazen průběh měření tělísek se sendvičovou strukturou z uhlíkového prepregu ER 68 s jádrem z balsového dřeva. V Tabulce 16 je vypočítán aritmetický průměr se směrodatnou odchylkou ze 2 měření pro pružnost v ohybu $E_f = 12500 \pm 1300$ MPa, síla potřebná k porušení tělíska je 618 ± 207 N, pevnost v ohybu $\sigma_f = 58,3 \pm 19,5$ N, pro vykonanou práci $W_f = 1184,1 \pm 526,5$ Nmm, pro deformaci ohybem $\varepsilon_f = 2,2 \pm 0,4$ % a pro průhyb $s = 3,3 \pm 0,6$ mm.

Tabulka 16 Naměřené hodnoty z ohybové zkoušky pro tělíska z balsy III + ER 68

n	E_f [MPa]	F [N]	σ_f [MPa]	W_f [Nmm]	ε_f [%]	s [mm]
1	11600	472	44,5	811,8	2,0	2,9
2	13400	765	72,1	1556,4	2,5	3,7
\bar{x}	12500	618	58,3	1184,1	2,2	3,3
$s_{\bar{x}}$	1300	207	19,5	526,5	0,4	0,6
$v_{\bar{x}}$ [%]	10,4	33,5	33,5	44,5	17,1	17,1

7.1.6 Sendvičová struktura s jádrem z balsy I + IMP 509



Obrázek 58 Závislost ohybového napětí na deformaci pro tělíska s balsou I + IMP 509

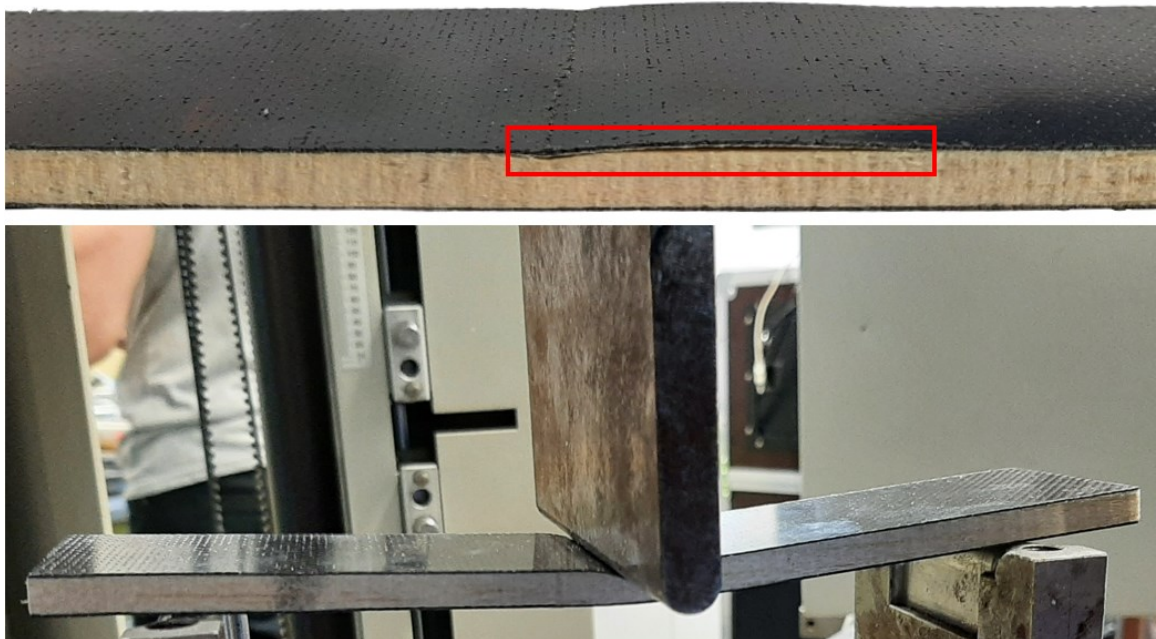
Na Obrázku 58 je zobrazen průběh měření tělísek se sendvičovou strukturou z uhlíkového prepregu ER 68 s jádrem z balsového dřeva. V Tabulce 17 je vypočítán aritmetický průměr se směrodatnou odchylkou ze 2 měření pro pružnost v ohybu $E_f = 10900 \pm 785$ MPa, sílu potřebnou k porušení tělíska 399 ± 56 N, pevnost v ohybu $\sigma_f = 39,9 \pm 5,6$ N, vykonanou práci $W_f = 670,8 \pm 144,4$ Nmm, deformaci ohybem $\varepsilon_f = 1,87 \pm 0,14$ % a pro průhyb $s = 2,85 \pm 0,21$ mm.

Tabulka 17 Naměřené hodnoty z ohybové zkoušky pro tělíska z balsy I + IMP 509

n	E_f [MPa]	F [N]	σ_f [MPa]	W_f [Nmm]	ε_f [%]	s [mm]
1	10300	360	36,0	568,7	1,77	2,70
2	11500	439	43,9	772,9	1,97	3,00
\bar{x}	10900	399	39,9	670,8	1,87	2,85
$s_{\bar{x}}$	785	56	5,6	144,4	0,14	0,21
$v_{\bar{x}}$ [%]	7,2	14,05	14,0	21,5	7,44	7,44

7.1.6.1 Poruchy sendvičů s jádrem z balsy

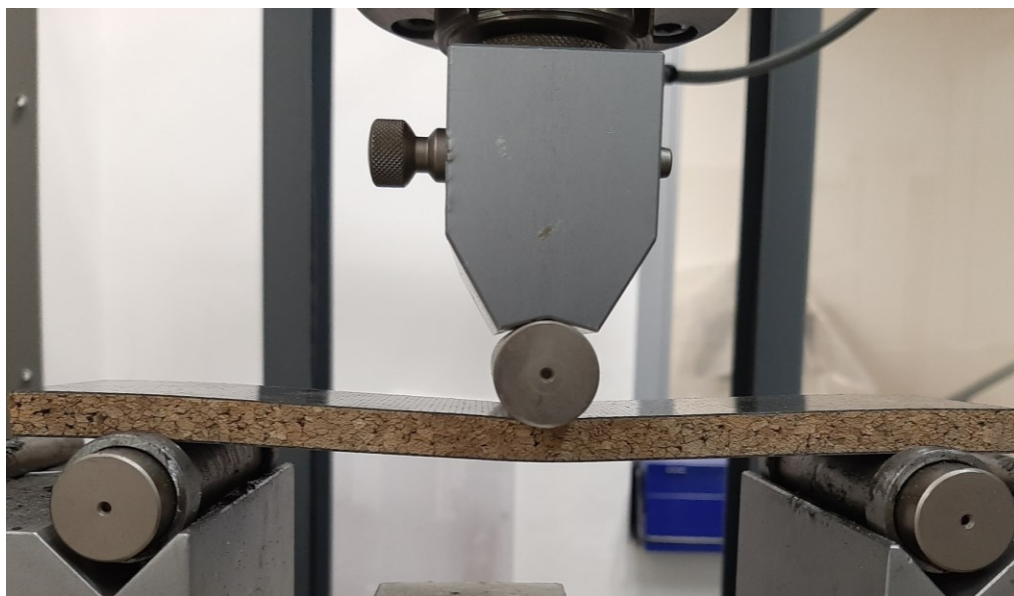
Nejčastěji docházelo u sendvičových struktur s balsovým jádrem k delaminaci z tlakové strany ze středu tělíska a stejně jako u korku k povrchovému porušení krycího materiálu v místě zatížení z tlakové strany jak je patrné z Obrázku 59.



Obrázek 59 Poruchy sendvičů s jádrem z balsy

7.2 Zkouška cyklickým ohybem

Zkouška byla provedena na dynamickém servohydraulickém stroji Zwick/Roell HC 25. Rozměry zkušebních tělísek byly stejná jako u ohybové zkoušky (210x50 mm). Podpěry byly rovněž jako u zkoušky statickým ohybem vzdáleny od sebe 160 mm, jak uvádí norma.



Obrázek 60 Zkouška cyklickým ohybem

Zkouška probíhala při frekvenci 5 Hz. Ze statické ohybové zkoušky byla zjištěna maximální síla F_{max} při které došlo k porušení sendvičové struktury. Z této síly byly následně dopočítány síly pro cyklický ohyb (70 %, 75 % a 80 % z F_{max}) pro jádro s pěnou 50 RS a nomexovou voštinou viz Tabulka 18.

Tabulka 18 Síly použité pro tělíska pěny a voštiny

Sendvičová struktura		F_{max} [N]		
Jádro	Prepreg	70 %	75 %	80 %
Pěna 50 RS	ER 68	407	436	465
	IMP 509	427	458	488
Nomexová voština	ER 68	252	270	288
	IMP 509	227	243	259

V Tabulce 19 a 20 jsou zaznačeny zatěžující síly pro balsu a korek. Z důvodu vyšší únavové odolnosti nebylo nutné testovat tak v malých intervalech jako u pěny a nomexového jádra.

Tabulka 19 Síly použité pro tělíska korku a balsy II

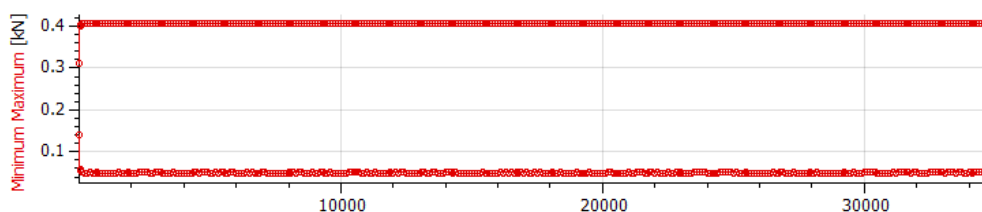
Sendvičová struktura		F_{\max} [N]	
Jádro	Prepreg	70 %	90 %
Balsa II	ER 68	279	359
	IMP 509	271	348
Korek	ER 68	148	191
	IMP 509	212	273

Tabulka 20 Síly použité pro tělíska balsy I a III

Jádro	Prepreg	F_{\max} [N]	
Balsa III	ER 68	320	448
Balsa I	IMP 509	320	342

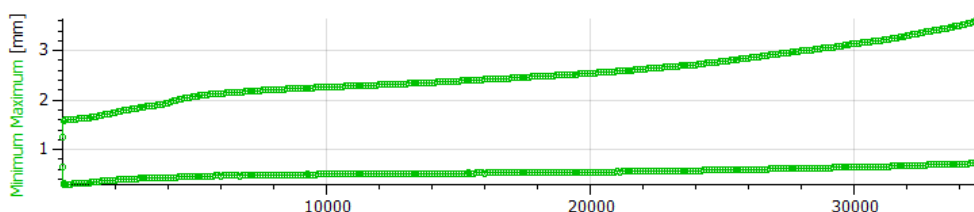
7.2.1 Sendvičová struktura s pěnovým jádrem

Na Obrázku 61 lze vidět minimální a maximální síla během testování pěny 50 RS s prepregem ER 68 při 70 % F_{\max} . Maximální zatěžující síla byla po celou dobu testování konstantní, avšak u minimální síly docházelo k mírným odchylkám.

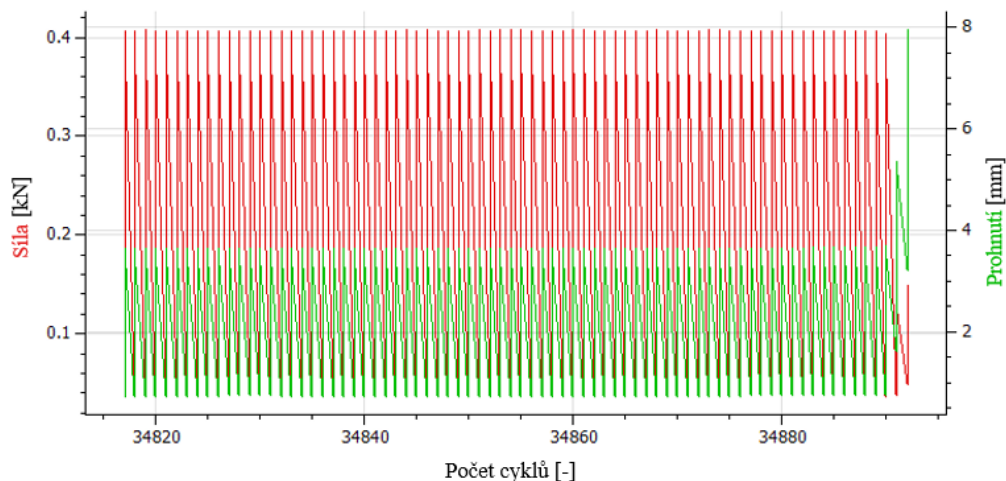


Obrázek 61 Velikost zatěžujících sil pro tělíska z pěny během zkoušky cyklickým ohybem

Nárůst prohnutí pro tento typ jádra a prepregu byl poměrně exponenciální jak je zřejmé z Obrázku 62. K nejvýraznějšímu nárůstu prohnutí docházelo na počátku testování a ke konci díky narůstající únavě tělíska. Maximální možné prohnutí před prasknutím dosahovalo kolem 3,5 mm. Na Obrázku 63 je znázorněno závěrečné cyklování při kterém došlo k porušení tělíska. V této části lze pozorovat nárůst prohnutí, ale také pokles zatěžující síly.



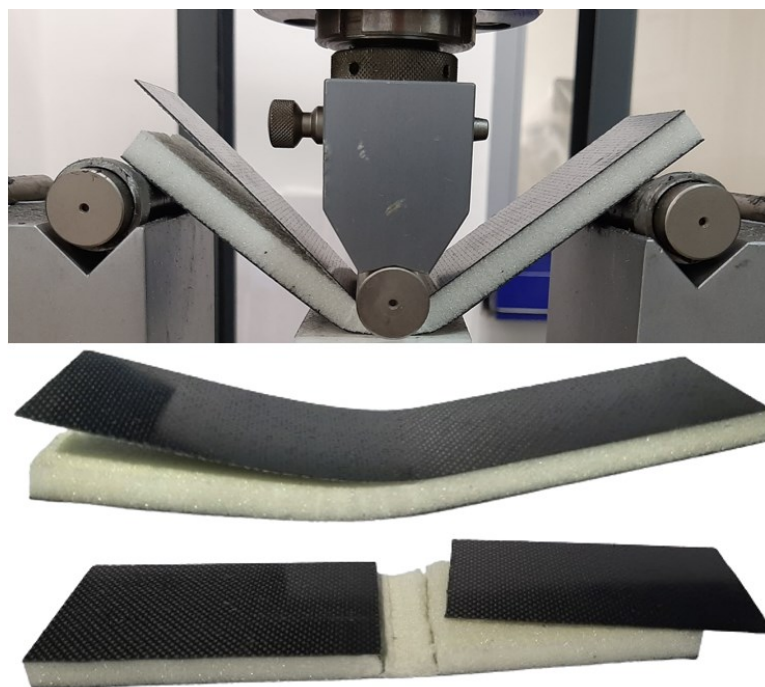
Obrázek 62 Velikost prohnutí pro tělíska z pěny během zkoušky cyklickým ohybem



Obrázek 63 Závěrečné cykly před selháním zkušebního těliska z pěny

7.2.1.1 Poruchy sendvičů s jádrem z balsy

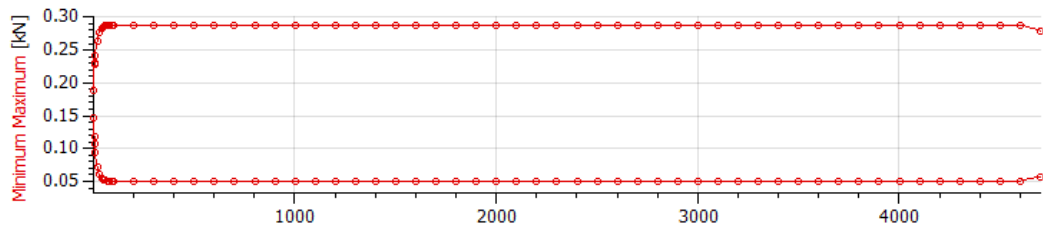
Na Obrázku 64 lze vidět typické porušení, ke kterému docházelo u sendvičů s pěnovým jádrem. Nejčastěji docházelo k delaminaci prepregu od jádra z tlakové strany stejně jako u zkoušky statickým ohybem. Tato delaminace může být dána nedostatečnou adhezí mezi prepregy nebo výrobními vadami.



Obrázek 64 Poruchy sendvičové struktury s pěnovým jádrem u zkoušky cyklickým ohybem

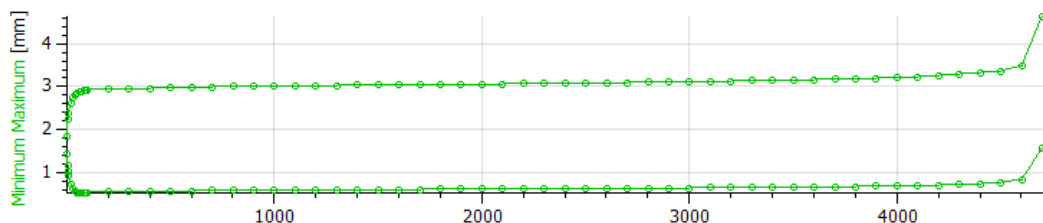
7.2.2 Sendvičová struktura s nomexovou voštinou

Na Obrázku 65 lze vidět minimální a maximální síla během testování nomexové voštiny s prepregem ER 68 při 80 % zatížení F_{\max} . Zatěžující síla se po určité prvotní části, než došlo k jejímu ustálení, udržovala na konstantní hodnotě po celou dobu zkoušky až do okamžiku porušení.

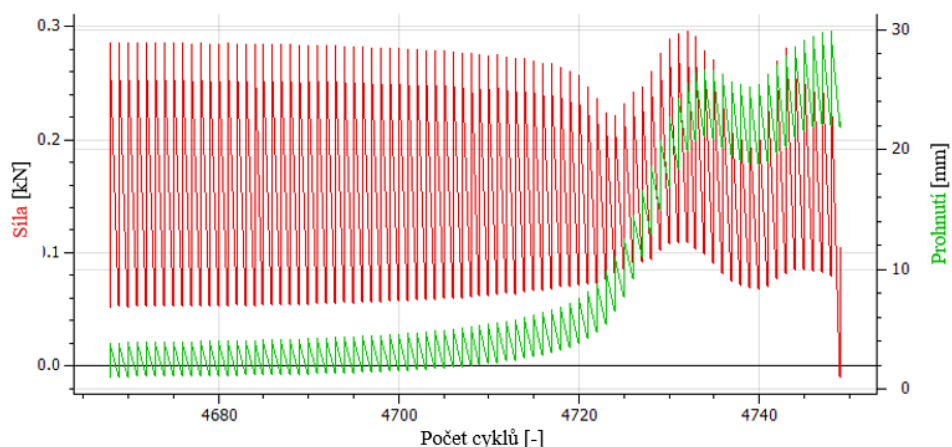


Obrázek 65 Velikost zatěžujících sil pro tělíska z voštiny během zkoušky cyklickým ohybem

Z Obrázku 66 lze konstatovat, že v případě sendvičové struktury s nomexovou voštinou byl nárůst prohnutí dlouho dobu konstantní, až při narůstající únavě (4600 cyklech) začalo docházet k náhlému nárůstu prohnutí na 4,5 mm. Na Obrázku 67 je znázorněno závěrečné cyklování při kterém došlo k porušení tělíska. Dochází zde k značnému nárůstu prohnutí, ale také k poklesu zatěžující síly.



Obrázek 66 Velikost prohnutí pro tělíska z voštiny během zkoušky cyklickým ohybem



Obrázek 67 Závěrečné cykly před selháním zkušebního tělíska z voštiny

7.2.2.1 Poruchy sendvičů s voštinovým jádrem

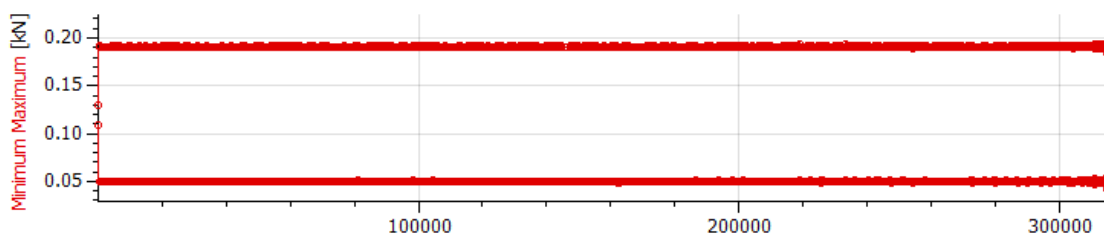
Na Obrázku 68 lze vidět porušení ke kterým docházelo u sendvičů s voštinovým jádrem. Převažující poruchou byla deformace voštinové struktury, nicméně v jednom případě také došlo k delaminaci prepregu od jádra na tahové straně vzorku.



Obrázek 68 Poruchy sendvičové struktury s voštinovým jádrem u zkoušky cyklickým ohybem

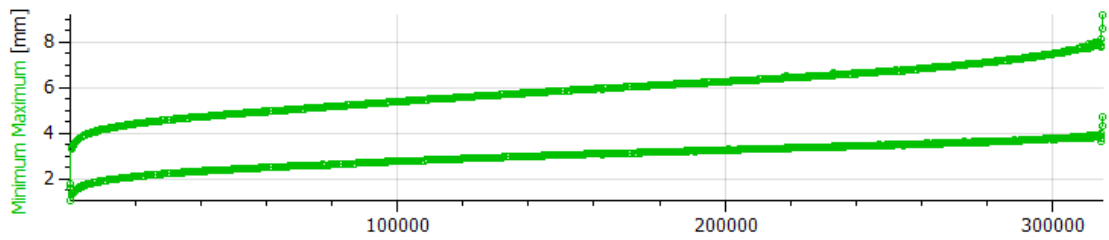
7.2.3 Sendvičová struktura s korkovým jádrem

Na Obrázku 69 lze vidět minimální a maximální síla během testování korku s prepregem ER 68 při 90 % F_{max} , kde maximální zatěžující síla byla konstantní po celou dobu testování, kromě okamžiku při kterém došlo k porušení tělíska. U minimální síly docházelo k mírným odchylkám.

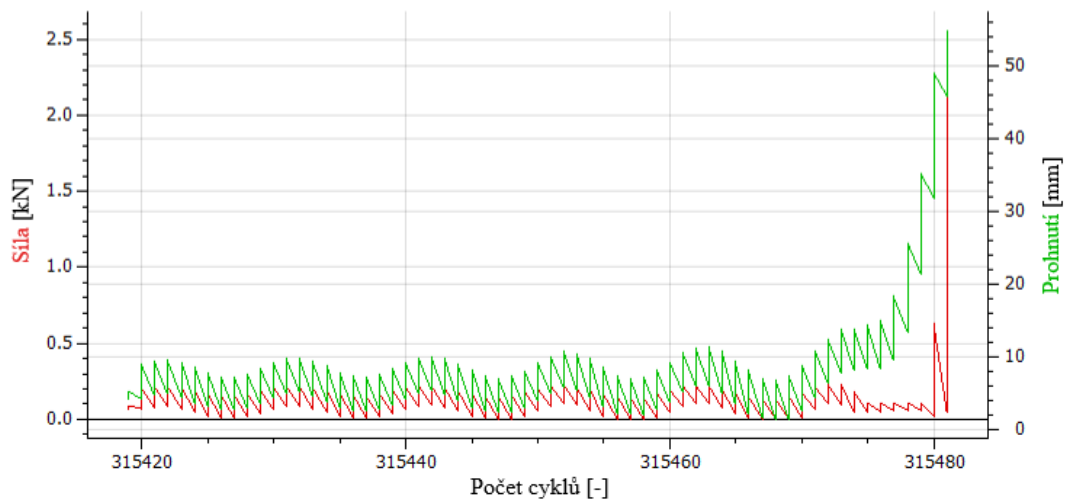


Obrázek 69 Velikost zatěžujících sil pro tělíska z korku během zkoušky cyklickým ohybem

U sendvičové struktury s korkovým jádrem měl nárůst prohnutí mírně vzrůstající tendenci po celou dobu testování, které lze vidět na Obrázku 70. Nejvyšší nárůst nastal po 300000 cyklech a dosahoval prohnutí 8,5 mm. Na Obrázku 71 je znázorněno závěrečné cyklování při kterém došlo k porušení tělíska. Dochází zde ke značnému nárůstu prohnutí, ale také k poklesu zatěžující síly.



Obrázek 70 Velikost prohnutí pro tělíska z voštiny během zkoušky cyklickým ohybem



Obrázek 71 Závěrečné cykly před selháním zkušebního tělíska z korku

7.2.3.1 Poruchy sendvičů s korkovým jádrem

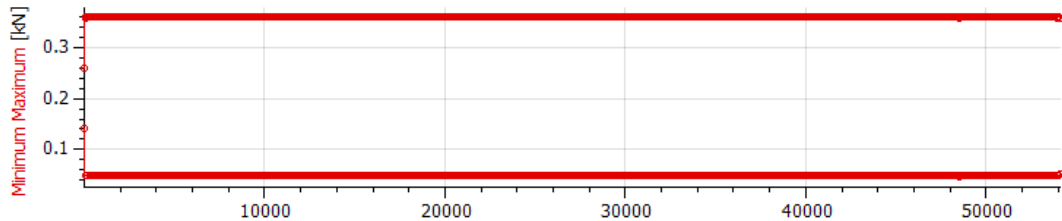
U sendvičů s korkovým jádrem docházelo k jednomu typu porušení. Konkrétně lze toto porušení vidět na Obrázku 72. Jedná se o deformaci korku s následným poškozením tlakové části prepregu.



Obrázek 72 Poruchy sendvičové struktury s korkovým jádrem u zkoušky cyklickým ohybem

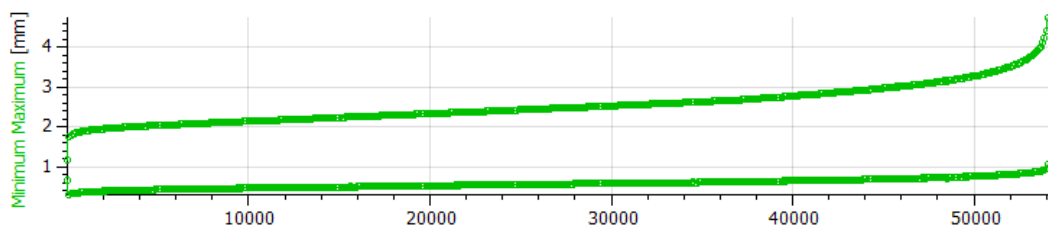
7.2.4 Sendvičová struktura s balsovým jádrem

Na Obrázku 73 lze vidět minimální a maximální síla během testování korku s prepregem ER 68 při 90 % F_{max} , kde minimální i maximální zatěžující síla byla konstantní po celou dobu zkoušky.

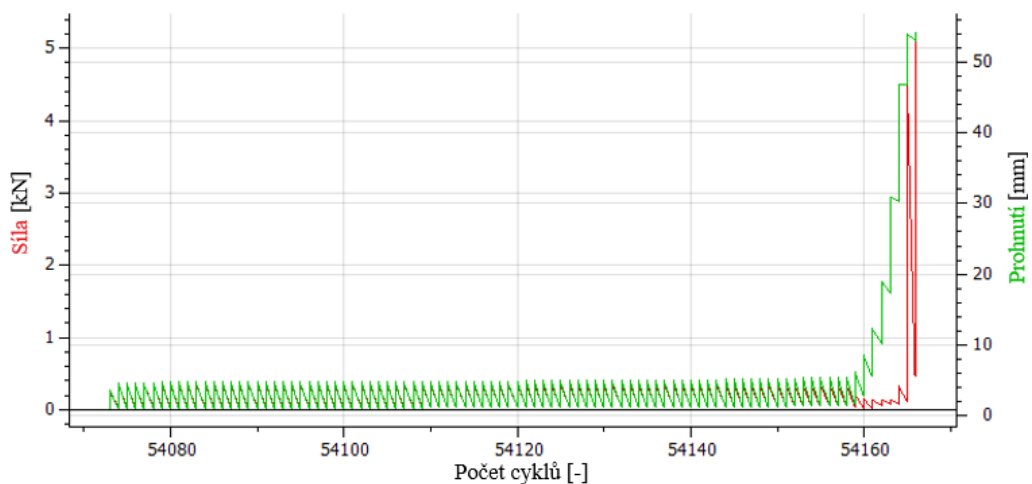


Obrázek 73 Velikost zatěžujících sil pro tělíska z balsy během zkoušky cyklickým ohybem

Na Obrázku 74 byl nárůst prohnutí po celou dobu mírně rostoucí, až při dosažení 50000 cyklů došlo k exponenciálnímu nárůstu prohnutí až na 4,5 mm. Na Obrázku 75 je znázorněno závěrečné cyklování při kterém došlo k porušení tělíska. Dochází zde k značnému nárůstu prohnutí, ale také k poklesu zatěžující síly.



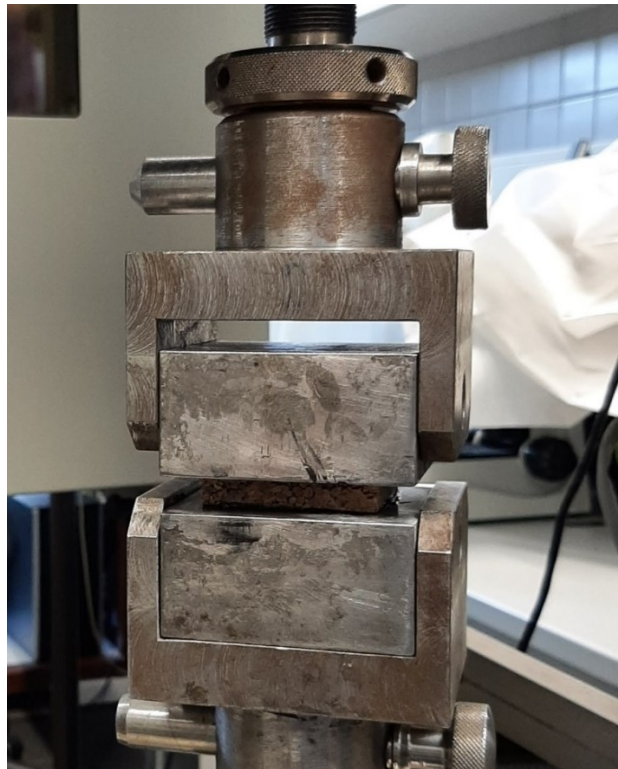
Obrázek 74 Velikost prohnutí pro tělíska z voštiny během zkoušky cyklickým ohybem



Obrázek 75 Závěrečné cykly před selháním zkušebního tělíska z balsy

7.3 Zkouška tahem na plocho ASTM C297

Zkouška byla stejně jako u statické zkoušky ohybem provedena na univerzálním (trhacím) stroji ZWICK/Roell 1456. Byly zde měřeny zkušební tělíska rozměrech 50x50 mm, tloušťka sendvičů se pro jednotlivé typy jader lišila. Zkouška spočívala v přilepení zkušebních tělísek na ocelové kostky pomocí epoxidového dvousložkového lepidla DP490 od firmy 3M. Doba vytvrzení lepidla byla 48 h, poté byly vzorky testovány.



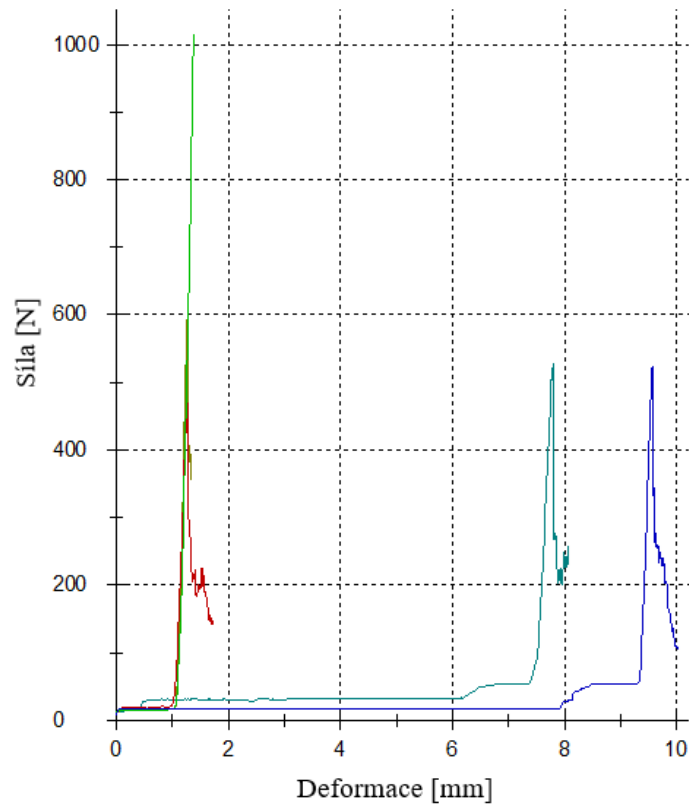
Obrázek 76 Zkouška tahem na plocho

Výpočet maximální síly:

$$F_{max} = \frac{\sigma_z}{S} = \frac{\sigma_z}{a \cdot b} \text{ [MPa]} \quad (1)$$

7.3.1 Sendvičová struktura s pěnovým jádrem

a) Prepreg s pryskyřicí ER 68



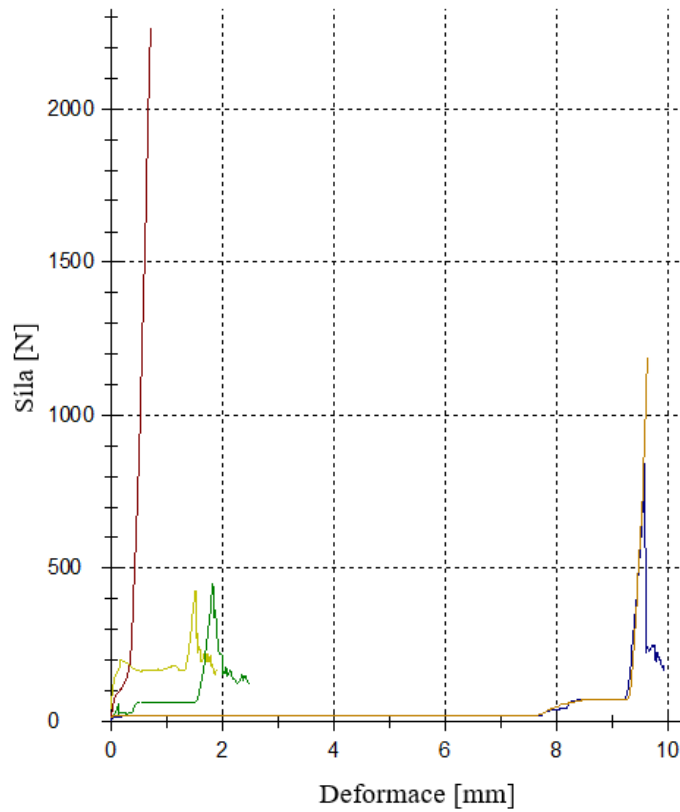
Obrázek 77 Diagram tahové zkoušky pro tělíska s pěnou + ER 68

Na Obrázku 77 je zobrazen průběh měření tělísek se sendvičovou strukturou z uhlíkového prepregu ER 68 s pěnovým jádrem 50 RS. V Tabulce 21 je zapsáno 5 měření s aritmetický průměr a směrodatnou odchylkou pro maximální sílu $F_{\max} = 626 \pm 222$ N a pro pevnost v tahu $\sigma_z = 0,25 \pm 0,09$ MPa.

Tabulka 21 Maximální hodnoty síly a napětí u tělísek s pěnovým jádrem + ER 68

n	F_{\max} [N]	σ_z [MPa]
1	528,4	0,21
2	592,3	0,24
3	470,4	0,19
4	1015,0	0,41
5	524,9	0,21
\bar{x}	626,2	0,25
$s_{\bar{x}}$	221,6	0,09
$v_{\bar{x}}$ [%]	35,4	35,39

b) Prepreg s pryskyřicí IMP 509



Obrázek 78 Diagram tahové zkoušky pro tělíska s pěnou + IMP 509

Na Obrázku 78 je zobrazen průběh měření tělísek se sendvičovou strukturou z uhlíkového prepregu IMP 509 s pěnovým jádrem RS50. Tabulka 22 shrnuje výsledky a vyjadřuje je za pomoci aritmetického průměru se směrodatnou odchylkou z 5 měření pro sílu $F_{\max} = 1035 \pm 756$ N a pevnost v tahu $\sigma_z = 0,41 \pm 0,30$ MPa.

Tabulka 22 Maximální hodnoty síly a napětí u tělísek s pěnovým jádrem + IMP 509

n	F_{\max} [N]	σ_z [MPa]
1	427,4	0,17
2	2266,5	0,91
3	450,5	0,18
4	843,5	0,34
5	1187,7	0,48
\bar{x}	1035,1	0,41
$s_{\bar{x}}$	756,2	0,30
$v_{\bar{x}}$ [%]	73,1	73,06

7.3.1.1 Poruchy sendvičů s pěnovým jádrem

U tělísek s pěnovým jádrem docházelo nejčastěji k delaminaci prepregu od jádra. Tato porucha mohla být pravděpodobně způsobena nedostatečnou přilnavostí prepregu k jádru.

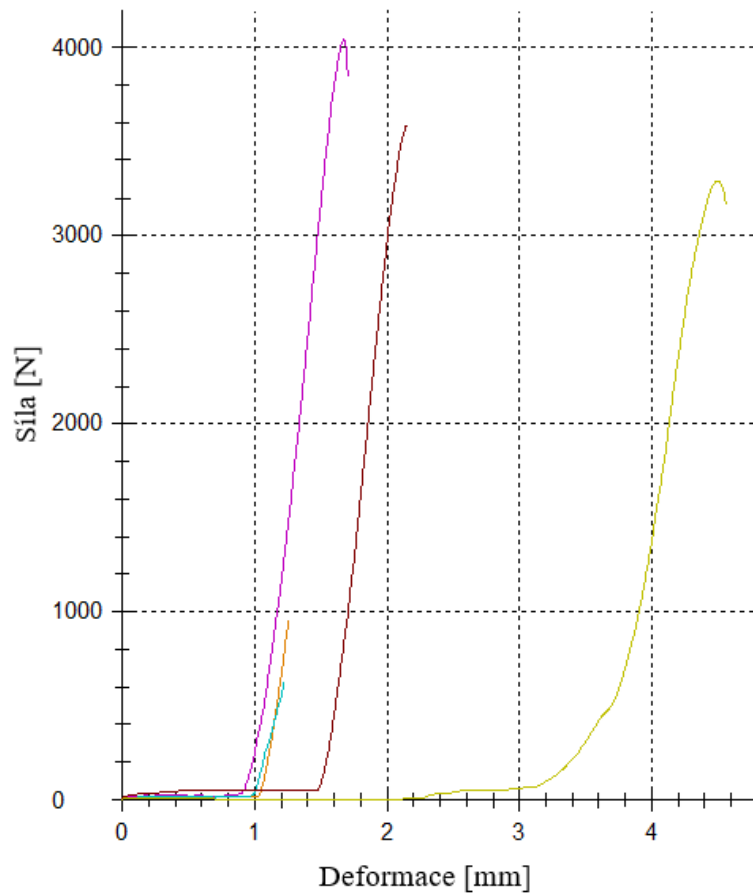
Taktéž docházelo k roztržení pěny, které lze vidět na Obrázku 79.



Obrázek 79 Poruchy sendvičů s pěnovým jádrem

7.3.2 Sendvičová struktura s voštinovým jádrem

a) Prepreg s pryskyřicí ER 68



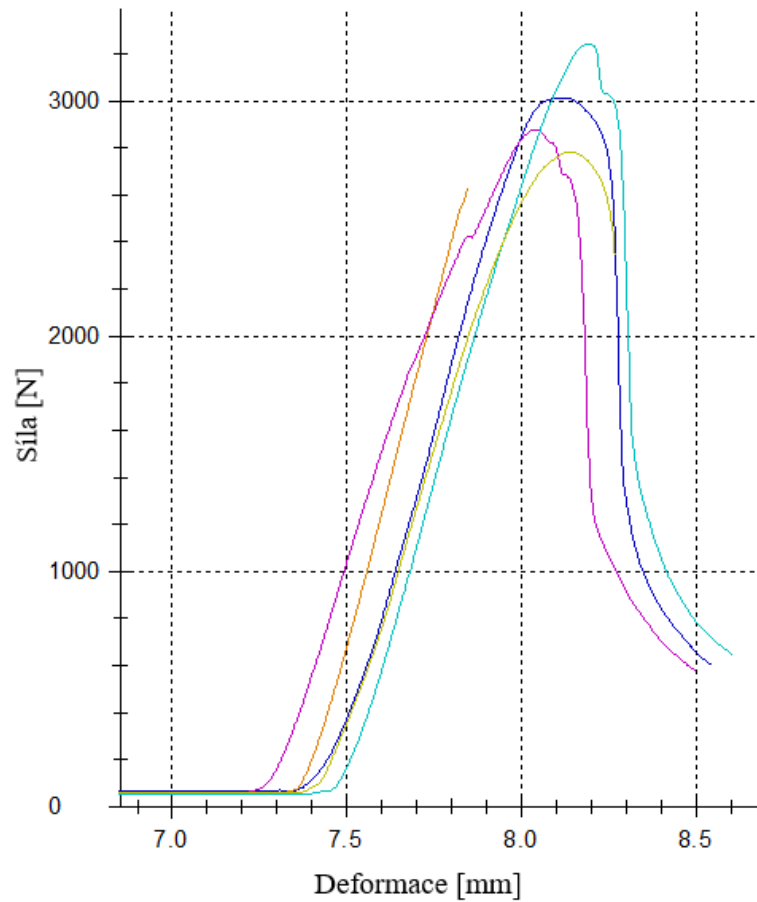
Obrázek 80 Diagram tahové zkoušky pro tělíska s voštinou + ER 68

Na Obrázku 80 je zobrazen průběh měření tělísek se sendvičovou strukturou z uhlíkového prepregu ER 68 s voštinovým jádrem. V Tabulce 23 lze pozorovat aritmetický průměr se směrodatnou odchylkou z 5 měření je pro maximální sílu $F_{\max} = 2502 \pm 1585$ N a pevnost v tahu $\sigma_z = 1,00 \pm 0,63$ MPa.

Tabulka 23 Maximální hodnoty síly a napětí u tělísek s voštinovým jádrem + ER 68

n	F_{\max} [N]	σ_z [MPa]
1	960,5	0,38
2	4043,7	1,62
3	630,4	0,25
4	3290,8	1,32
5	3583,5	1,43
\bar{x}	2501,8	1,00
$s_{\bar{x}}$	1584,9	0,63
$v_{\bar{x}}$ [%]	63,4	63,35

b) Prepreg s pryskyřicí IMP 509



Obrázek 81 Diagram tahové zkoušky pro tělíska s voštinou + IMP 509

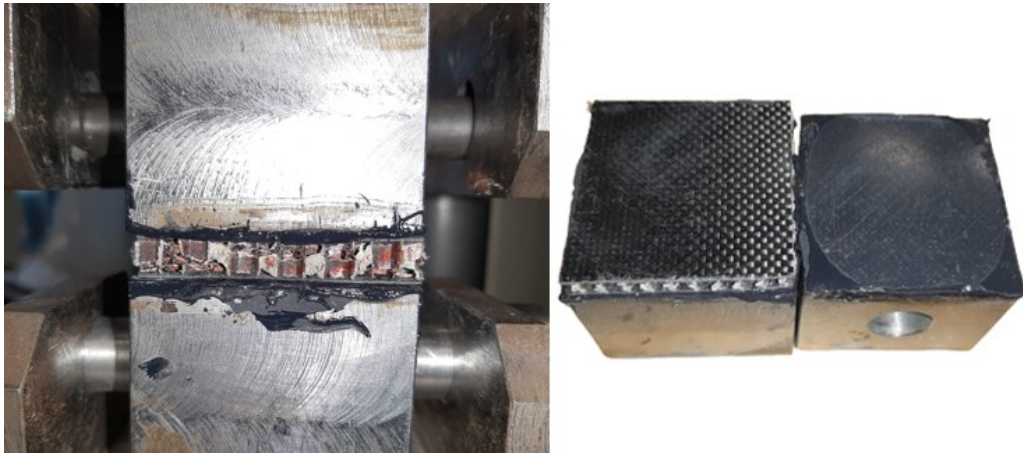
Na Obrázku 81 je zobrazen průběh měření tělísek se sendvičovou strukturou z uhlíkového prepregu IMP 509 s nomexovou voštinou. V Tabulce 24 lze pozorovat aritmetický průměr se směrodatnou odchylkou z 5 měření pro maximální sílu $F_{\max} = 2910 \pm 232$ N a pro pevnost v tahu $\sigma_z = 1,16 \pm 0,09$ MPa.

Tabulka 24 Maximální hodnoty síly a napětí u tělísek s voštinovým jádrem + IMP 509

n	F_{\max} [N]	σ_z [MPa]
1	3012,9	1,21
2	2632,3	1,05
3	2876,7	1,15
4	3242,6	1,30
5	2783,3	1,11
\bar{x}	2909,6	1,16
$s_{\bar{x}}$	232,1	0,09
$v_{\bar{x}}$ [%]	8,0	7,98

7.3.2.1 Poruchy sendvičů s voštinovým jádrem

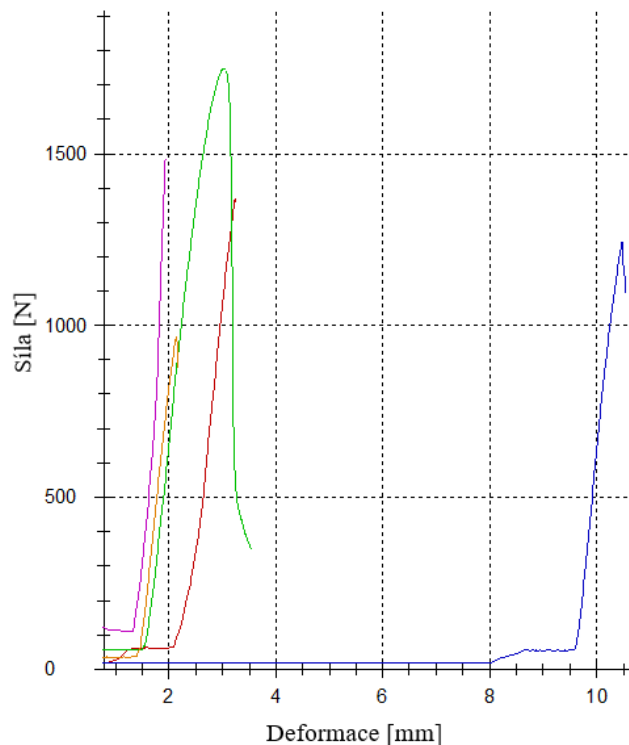
Sendvičové konstrukce s jádrem z nomexové voštiny byly taktéž deformovány v jádru, avšak docházelo zde i k delaminaci prepregu od kostky, což bylo způsobeno nedostatečným vytvrzením lepidla nebo jeho nedostatečnou vrstvou. Toto porušení je zobrazeno na Obrázku 82.



Obrázek 82 Poruchy sendvičů s voštinovým jádrem

7.3.3 Sendvičová struktura s korkovým jádrem

a) Prepreg s pryskyřicí ER 68



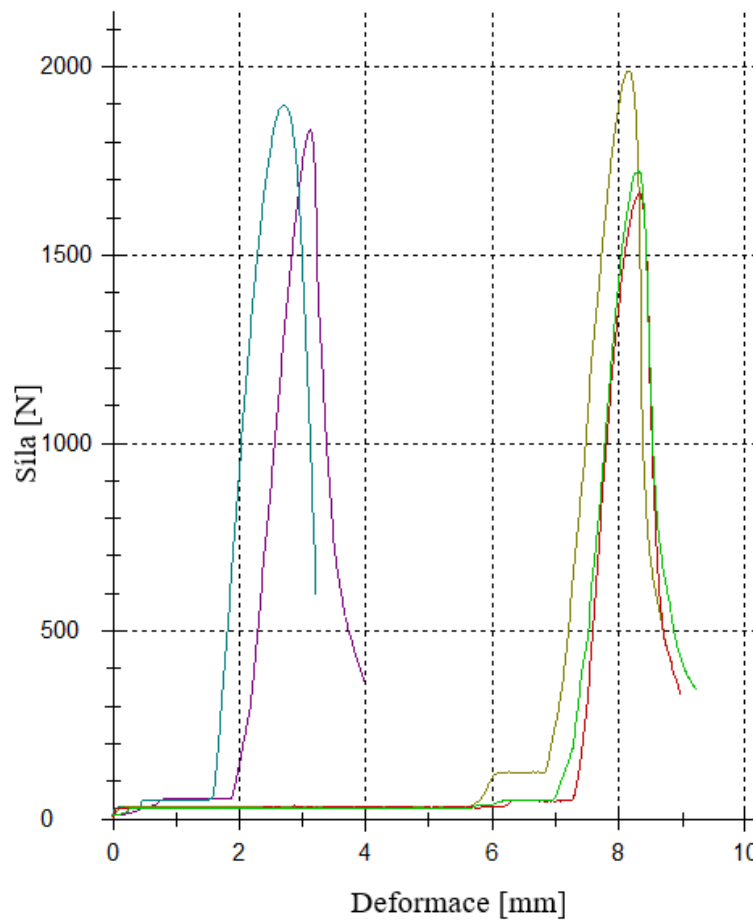
Obrázek 83 Diagram tahové zkoušky pro tělíska s korkem + ER 68

Na Obrázku 83 je zobrazen průběh měření tělísek se sendvičovou strukturou z uhlíkového prepregu ER 68 s korkovým jádrem. Aritmetický průměr se směrodatnou odchylkou z 5 měření je pro maximální sílu $F_{\max} = 1363 \pm 288$ N a pro pevnost v tahu $\sigma_z = 0,55 \pm 0,12$ MPa je zobrazen v Tabulce 25.

Tabulka 25 Maximální hodnoty síly a napětí u tělísek s korkovým jádrem + ER 68

n	F_{\max} [N]	σ_z [MPa]
1	1370,4	0,55
2	1746,6	0,70
3	1244,5	0,50
4	967,9	0,39
5	1485,5	0,59
\bar{x}	1363,0	0,55
$s_{\bar{x}}$	288,3	0,12
$v_{\bar{x}}$ [%]	21,1	21,15

b) Prepreg s pryskyřicí IMP 509



Obrázek 84 Diagram tahové zkoušky pro tělíska s korkem + IMP 509

Na Obrázku 84 je zobrazen průběh měření tělísek se sendvičovou strukturou z uhlíkového prepregu IMP 509 s korkovým jádrem. V Tabulce 26 je zobrazen aritmetický průměr se směrodatnou odchylkou z 5 měření pro maximální sílu $F_{\max} = 1822 \pm 131$ N a pro pevnost v tahu $\sigma_z = 0,73 \pm 0,05$ MPa.

Tabulka 26 Maximální hodnoty síly a napětí u tělísek s korkovým jádrem + IMP 509

n	F_{\max} [N]	σ_z [MPa]
1	1832,9	0,73
2	1897,3	0,76
3	1990,4	0,80
4	1664,5	0,67
5	1725,1	0,69
\bar{x}	1822,0	0,73
$s_{\bar{x}}$	130,7	0,05
$v_{\bar{x}}$ [%]	7,2	7,17

7.3.3.1 Poruchy sendvičů s korkovým jádrem

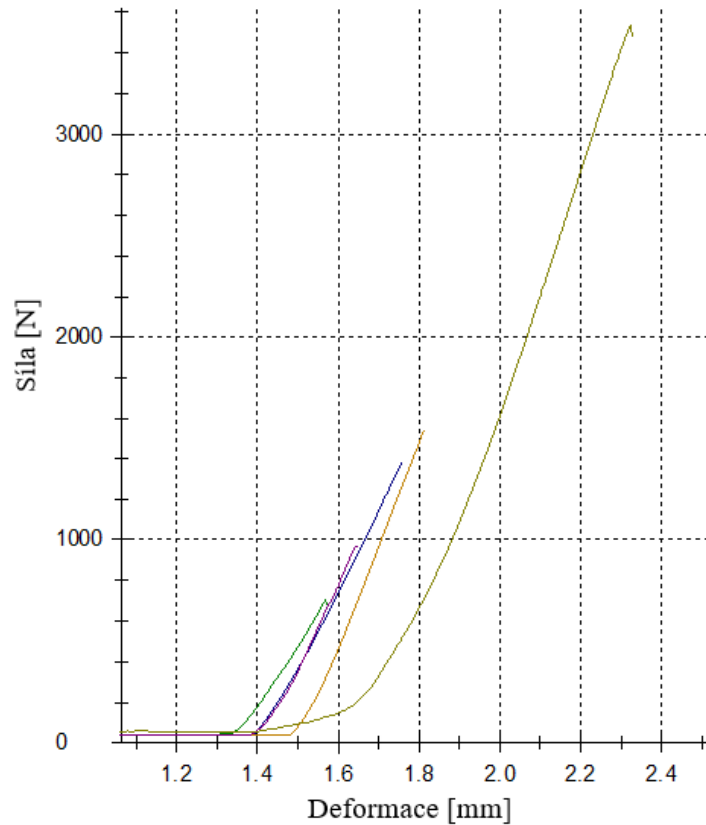
U tělísek s jádrem z korku docházelo k roztržení jádra, což je zřejmé z Obrázku 85. Avšak také docházelo k delaminaci prepregu od kostky, což mohlo být způsobeno nerovnoměrnou vrstvou lepidla.



Obrázek 85 Poruchy sendvičů s pěnovým jádrem

7.3.4 Sendvičová struktura s balsovým jádrem

a) Prepreg s pryskyřicí ER 68



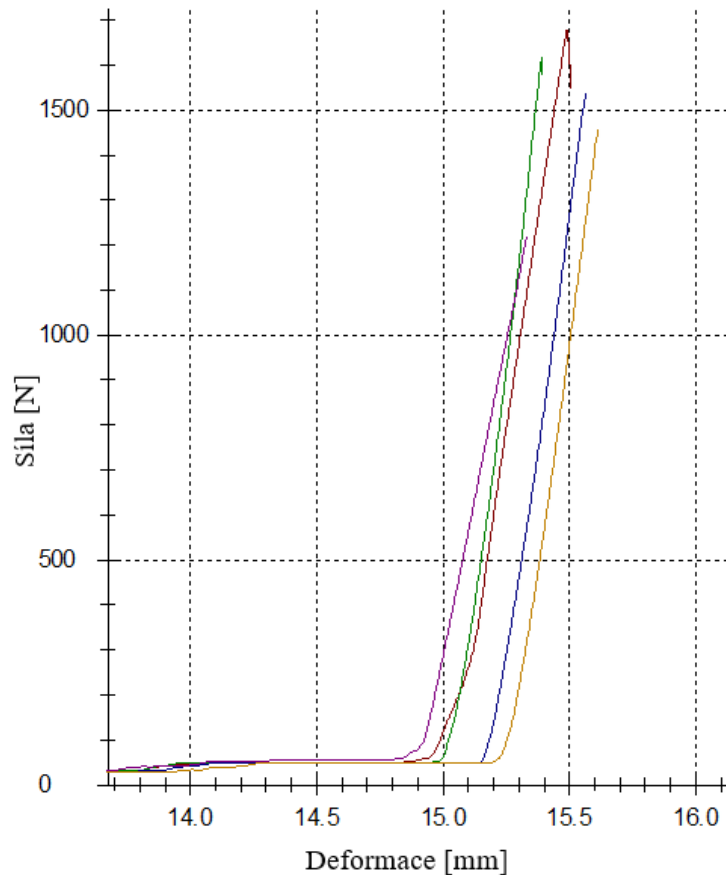
Obrázek 86 Diagram tahové zkoušky pro tělíska s balsou + ER 68

Na Obrázku 86 a v Tabulce 27 je vidět průběh měření tělísek se sendvičovou strukturou z uhlíkového prepregu ER 68 s jádrem z balsy III. Aritmetický průměr se směrodatnou odchylkou z pěti měření je pro maximální sílu $F_{\max} = 1628,84 \pm 1119$ N a pro pevnost v tahu $\sigma_z = 0,65 \pm 0,45$ MPa.

Tabulka 27 Maximální hodnoty síly a napětí u tělísek s balsovým jádrem + ER 68

n	F_{\max} [N]	σ_z [MPa]
1	705,9	0,28
2	1388,7	0,56
3	1546,4	0,62
4	964,6	0,39
5	3538,6	1,42
\bar{x}	1628,8	0,65
$s_{\bar{x}}$	1118,6	0,45
$v_{\bar{x}}$ [%]	68,7	68,67

b) Prepreg s pryskyřicí IMP 509



Obrázek 87 Diagram tahové zkoušky pro tělíska s balsou + IMP 509

Na Obrázku 87 a v Tabulce 28 je zobrazen průběh měření tělísek se sendvičovou strukturou z uhlíkového prepregu IMP 509 s jádrem z balsy I. Aritmetický průměr se směrodatnou odchylkou z pěti měření je pro maximální sílu $F_{\max} = 1502 \pm 179$ N a pro pevnost v tahu $\sigma_z = 0,60 \pm 0,07$ MPa.

Tabulka 28 Maximální hodnoty síly a napětí u tělísek s balsovým jádrem + IMP 509

n	F_{\max} [N]	σ_z [MPa]
1	1678,8	0,67
2	1617,3	0,65
3	1539,1	0,62
4	1457,8	0,58
5	1219,3	0,49
\bar{x}	1502,5	0,60
$s_{\bar{x}}$	178,7	0,07
$v_{\bar{x}}$ [%]	11,9	11,90

7.3.4.1 Poruchy sendvičů s balsovým jádrem

U sendvičových tělísek s jádrem z balsového dřeva docházelo k jednomu typu porušení k roztržení samotného balsového jádra, jak je zřejmé z Obrázku 87.



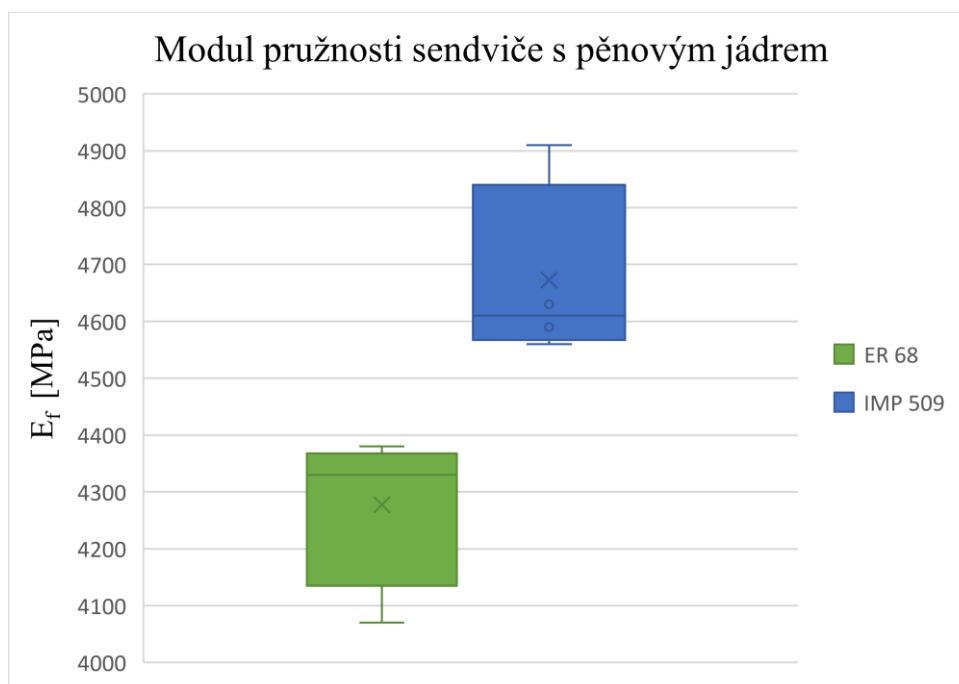
Obrázek 88 Poruchy sendvičů s balsovým jádrem

8 DISKUZE VÝSLEDKŮ

V této kapitole jsou porovnávány a vyhodnoceny naměřené hodnoty. Jsou vyobrazeny pomocí krabicových grafů, které rozdělují data do kvartilů a zvýrazňují medián a odlehlé hodnoty. „Krabice“ v grafu obsahuje 50 % hodnot z datového souboru. Minimální a maximální hodnota je zobrazena pomocí vodorovných čar na konci „vousů“ (svislých čar vycházejících z „krabice“). Medián je znázorněn vodorovnou čarou uvnitř „krabice“. Křížkem je označen aritmetický průměr.

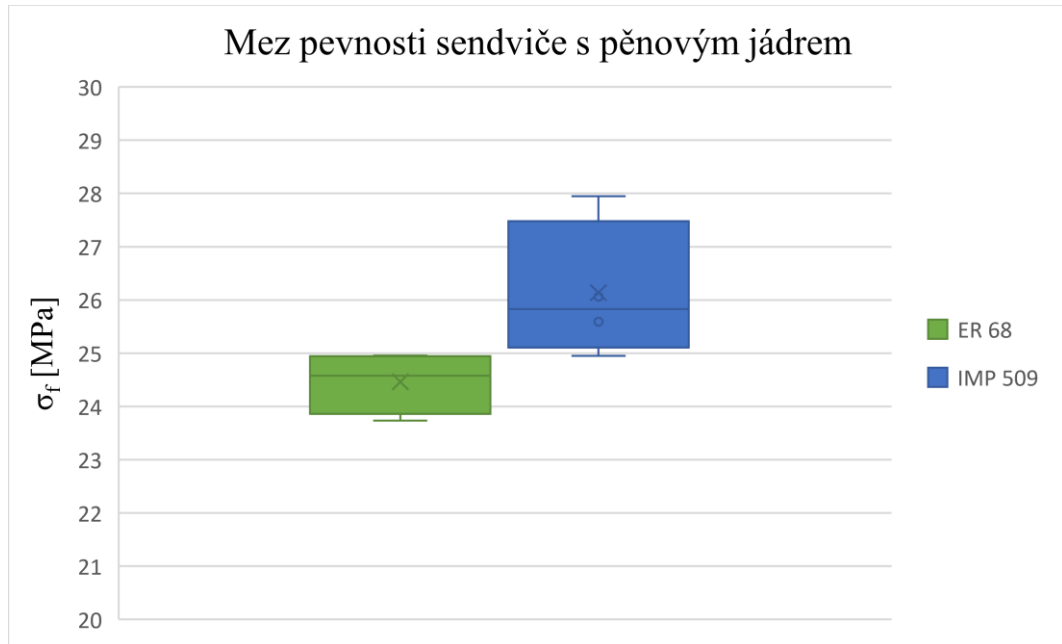
8.1 Ohybová zkouška

8.1.1 Vyhodnocení tělísek s pěnovým jádrem



Obrázek 89 Vyhodnocení modulu pružnosti sendviče s pěnovým jádrem

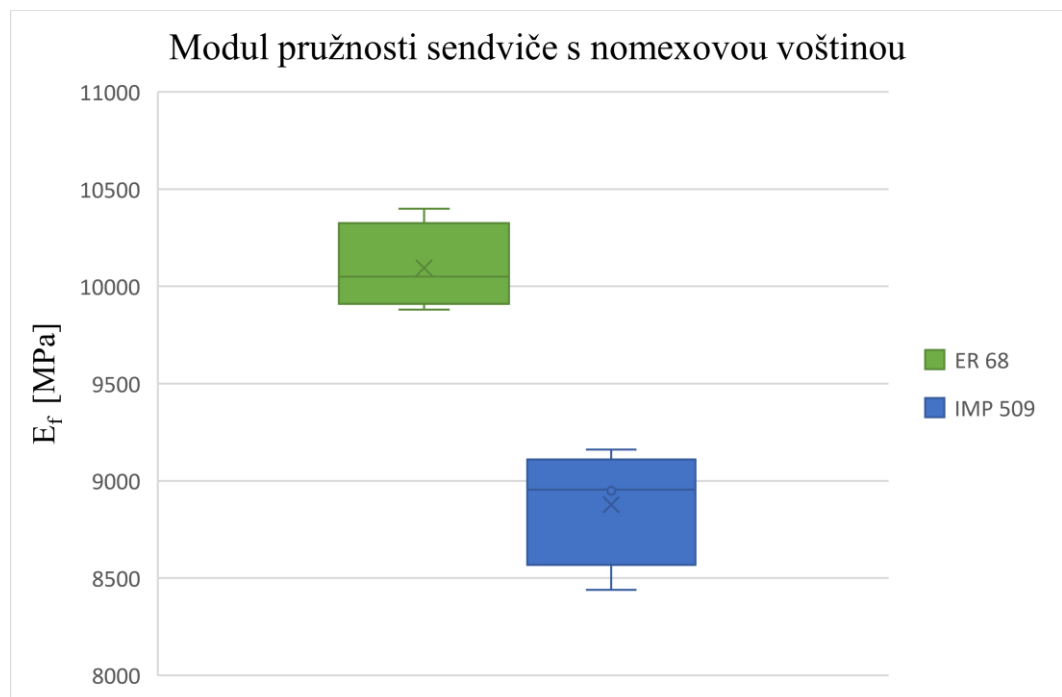
Na Obrázku 89 je porovnáván modul pružnosti u prepregů s odlišným prosycením pryskyřice pro pěnové jádro 50 RS. Nejvyšších hodnot modulu pružnosti dosahovala tělíska s prepregem IMP 509. Nejvyšší maximální naměřená hodnota modulu pružnosti byla pro tento prepreg 4910 MPa.



Obrázek 90 Vyhodnocení meze pevnosti sendviče s pěnovým jádrem

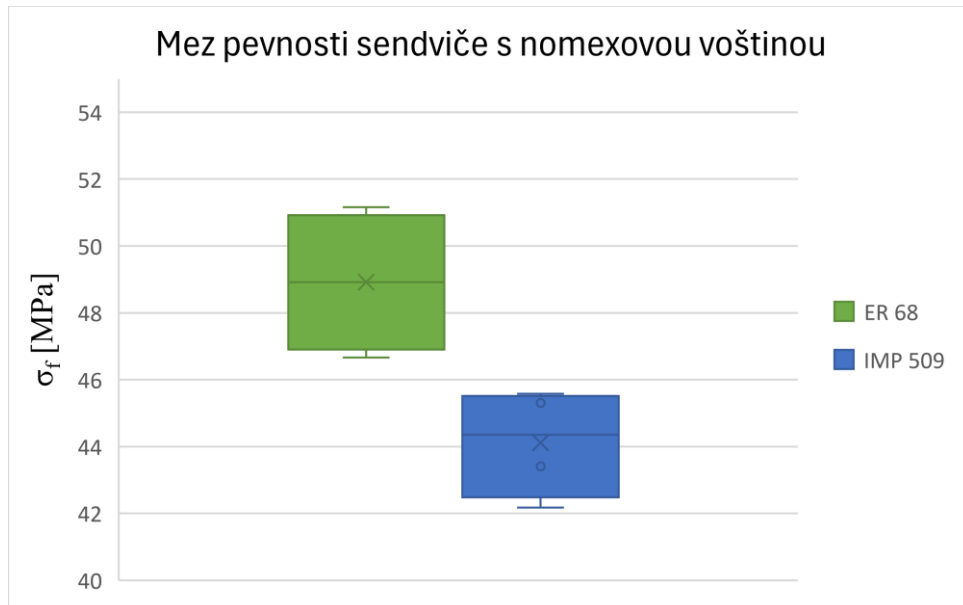
Na Obrázku 90 jsou znázorněny naměřené hodnoty mezí pevnosti u prepregů s odlišným prosycením pryskyřice s pěnovým jádrem. Vyšší mez pevnost vykazovala pěna s pryskyřicí IMP 509, nejvyšší naměřená hodnota byla 27,9 MPa.

8.1.2 Vyhodnocení tělísek s jádrem z nomexové voštiny



Obrázek 91 Vyhodnocení modulu pružnosti sendviče s voštinovým jádrem

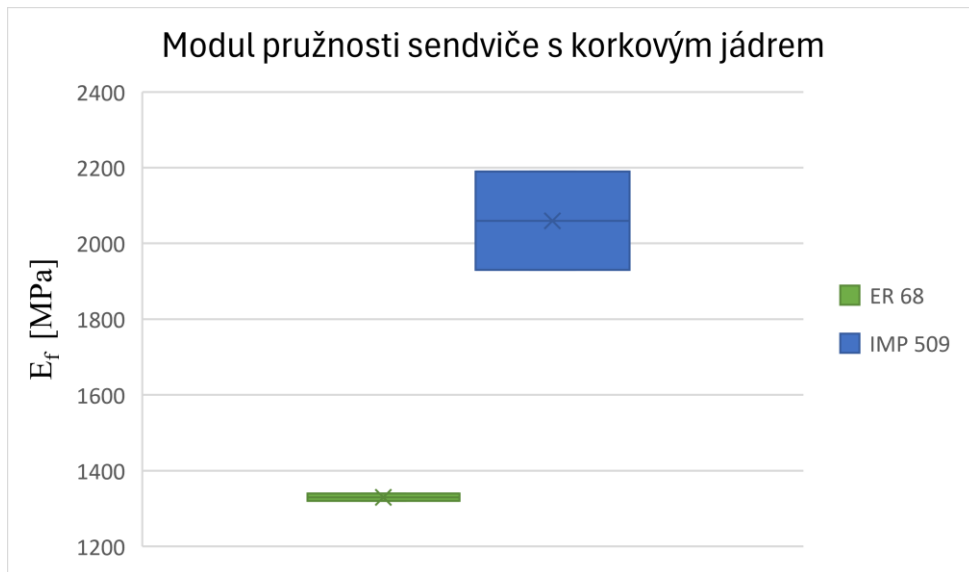
Na Obrázku 91 je porovnáván modul pružnosti u prepregů s odlišným prosycením pryskyřice pro nomexovou voštinu se šestihrannou buňkou. Nejvyšších hodnot modulu pružnosti dosahovala tělíska s prepregem ER 68. Nejvyšší maximální naměřená hodnota modulu pružnosti byla pro tento prepreg 10400 MPa.



Obrázek 92 Vyhodnocení meze pevnosti sendviče s voštinovým jádrem

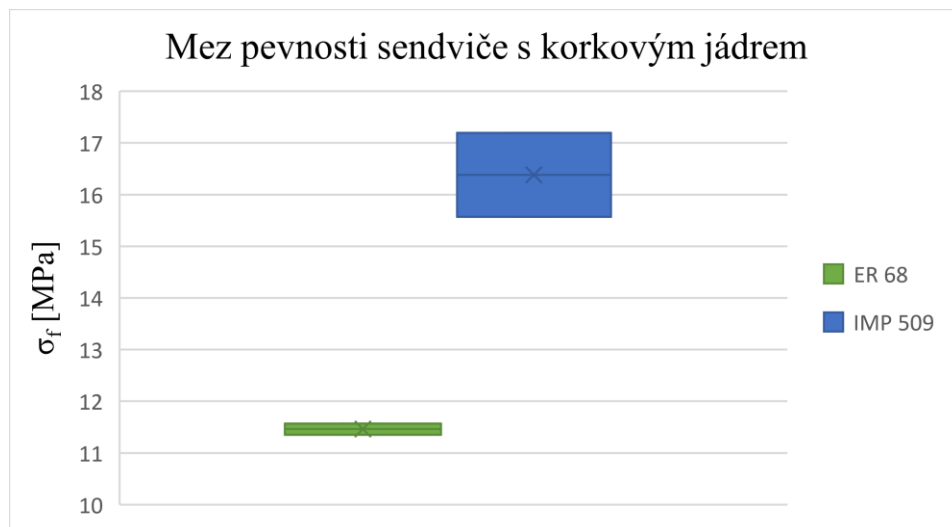
Na Obrázku 92 jsou znázorněny naměřené hodnoty mezí pevnosti pro prepregy s dvěma typy prosycení pryskyřice. Vyšší mez pevnost vykazovala pěna s pryskyřicí ER 68, nejvyšší naměřená hodnota byla 51,2 MPa.

8.1.3 Vyhodnocení tělísek s jádrem z korku



Obrázek 93 Vyhodnocení modulu pružnosti sendviče s korkovým jádrem

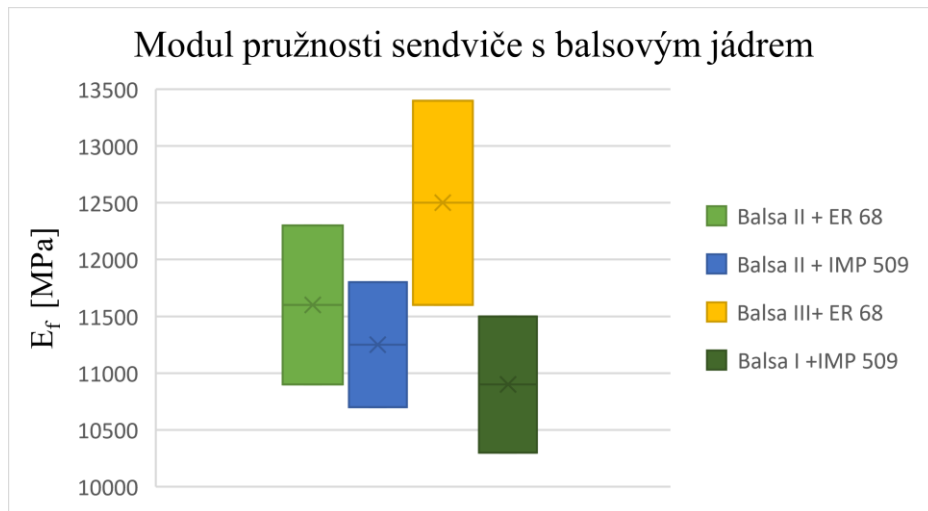
Na Obrázku 93 je porovnáván modul pružnosti u prepregů s odlišným prosycením pryskyřice, ale zároveň pro odlišný typ korku NL 10 a NL 20. Nejvyšších hodnot modulu pružnosti dosahovala tělíska s prepregem IMP 509 a korkem NL 10. Nejvyšší maximální naměřená hodnota modulu pružnosti byla pro tento prepreg 2190 MPa.



Obrázek 94 Vyhodnocení meze pevnosti sendviče s korkovým jádrem

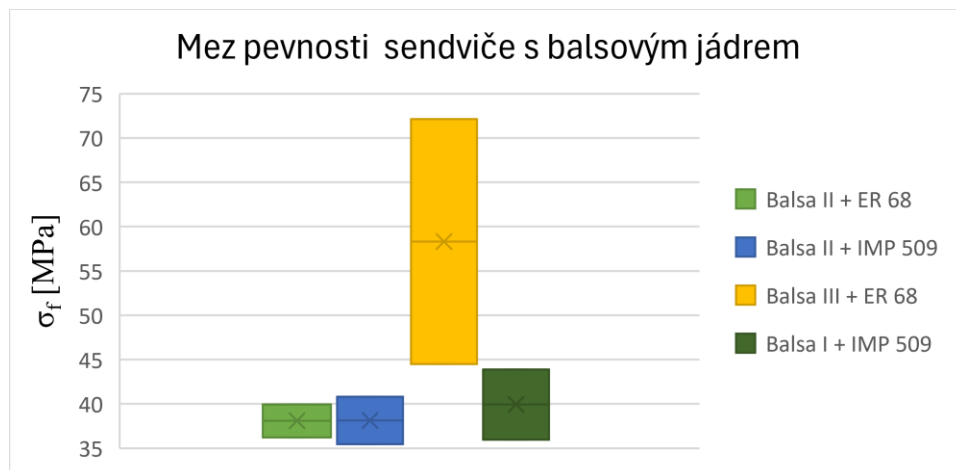
Na Obrázku 94 jsou znázorněny naměřené hodnoty mezí pevnosti u prepregů s odlišným prosycením pryskyřice a dvěma typy korku NL 10 A NL 20. Vyšší mez pevnost vykazoval korek (NL 10) s pryskyřicí IMP 509, nejvyšší hodnoty zatížení vydržely 17,19 MPa.

8.1.4 Vyhodnocení tělísek s jádrem z balsového dřeva



Obrázek 95 Vyhodnocení modulu pružnosti sendviče s balsovým jádrem

Na Obrázku 95 je porovnáván modul pružnosti u prepregů s odlišným prosycením pryskyřice pro jednotlivé typy balsy s odlišnou hmotností viz. Tabulka 6. Nejvyšších hodnot modulu pružnosti dosahovala tělíska s prepregem ER 68 a balsy III. Nejvyšší maximální naměřená hodnota modulu pružnosti byla pro tento prepreg 13400 MPa.



Obrázek 96 Vyhodnocení meze pevnosti sendviče s korkovým jádrem

Na Obrázku 96 je porovnáván mez pevnosti mezi odlišnými typy prepregů pro jednotlivé balsy s odlišnou hmotností. Nejvyšších hodnot modulu pevnosti dosahovala tělíska s prepregem ER 68 a balsy III. Nejvyšší maximální naměřená hodnota modulu pevnost byla pro tento prepreg 72,1 MPa.

8.2 Zkouška cyklickým ohybem

V Tabulce 29 lze pozorovat počty cyklů se zatěžující silou, které vydržela sendvičová tělíska s pěnovým a voštinovým jádrem. Při porovnání tělísek s pěnovým jádrem, lze dojít k závěru, že tato tělíska dosahovala u obou prepregů podobných hodnot. Z toho tedy vychází, že vliv prepregu na tuto zkoušku pravděpodobně neměl velký vliv. Avšak pěna s prepregem ER 68 vykazovala o něco větší počet cyklů než pěna s prepregem IMP 509. Tělíska u prepregu ER 68 dosáhla nejvýše 34892 cyklů při zatížení 70 % z F_{max} .

Sendvičové struktury s voštinovým jádrem dosahovaly znatelně vyšší počet cyklů než pěnové. Taktéž dosáhla tato tělíska nejvyšší počet cyklů při zatížení 70 % z F_{max} , konkrétně se jednalo o tělíska s prepregem ER 68 a to až 355676 cyklů, avšak jsou zde veliké odchylky počtů cyklů. Mohlo to být způsobeno více okolnostmi např. použitou technologií při výrobě během pokládání prepregů, rovinností formy, nestejným tlakem na formu, ale také mikrotrhlinami v jádru. Je možné, že při použití jiné metody by počet cyklů byl více stejnorodý. Nutno zmínit, že pro větší přesnost by bylo potřeba otestovat větší počet tělísek u ohybové zkoušky, ze které byl následně vypočítán aritmetický průměr zatížení F_{max} pro toto měření. Další možností je také zvýšit počet tělísek pro jednotlivá procenta zatížení.

Tabulka 29 Počet cyklů zkušebních tělísek s pěnovým a voštinovým jádrem

Sendvičová struktura		Počet cyklů [-]					
		70 %		75 %		80 %	
Jádru	Prepreg	n ₁	n ₂	n ₁	n ₂	n ₁	n ₂
Pěna 50 RS	ER 68	13485	34892	19428	15622	4653	590
	IMP 509	12336	14460	10582	3640	8266	414
Nomexovou voština	ER 68	48080	355676	32615	173362	4748	31344
	IMP 509	25384	59824	8858	23382	6580	3733

Všechna tělíska s korkovým jádrem a prepregem s odlišným prosycením pryskyřice dosáhla milionu cyklů při zatížení 70 % z F_{max} po kterých byla zkouška zastavena. Z důvodu energetické a časové náročnosti tohoto měření bylo milion cyklů určeno jako mimořádná únavová životnost a nebylo potřeba dále toto tělíska zatěžovat. Při zatěžující síle 90 % z F_{max} začalo u tělísek docházet k porušení. Při porovnání prepregů je zde vidět velký rozdíl v dosažených počtech cyklů jak lze vidět v Tabulce 30. Nejvyšších hodnot dosahovala tělíska s prepregem ER 68 vydržela 315481 cyklů.

Tělíska s balsovým jádrem II taktéž jako korek při zatížení 70 % dosahovalo milion cyklů bez porušení. Kvůli časové a energetické náročnosti zkoušky je v Tabulce 30 modře

zaznačen předpokládaný počet cyklů, který tělíska vydrží. Díky tomu mohla být tělíska zatěžována vyšší silou, při kterém docházelo k mezi únavy. Při 90 % z F_{max} jsou odchylky měření vyšší, to může být taktéž způsobeno stejnými okolnostmi, které byly zmíněny u voštiny. Z tohoto měření nejlépe vycházel prepreg IMP 509 s 403004 cyklů, při kterých nebylo tělíska nijak viditelně poškozeno. Z grafu prohnutí se dalo předpokládat, že by tělíska vydrželo až milion cyklů.

Tabulka 30 Počet cyklů zkušebních tělísek s korkovým a balsovým jádrem II

Sendvičová struktura		Počet cyklů [-]			
		70 %		90 %	
Jádro	Prepreg	n ₁	n ₂	n ₁	n ₂
Korek	ER 68	1000000 (neporušeno)	1000000 (neporušeno)	243418	315481
	IMP 509	1000000 (neporušeno)	1000000 (neporušeno)	261	892
Balsa II	ER 68	1000000 (neporušeno)	1000000 (neporušeno)	54165	-
	IMP 509	1000000 (neporušeno)	1000000 (neporušeno)	72	403004 (neporušeno)

V Tabulce 31 je zaznamenán počet cyklů u jádra z balsy I a III. Kvůli velkým odchylkám při testování ohybových zkoušek byl aritmetický průměr nepřesný a docházelo by ihned k porušení a proto byly zvoleno maximální zatížení z menší síly u ohybové zkoušky. Kvůli vysoké mezi únavy byly taktéž u této balsy navržené předpokládané hodnoty. Balsa III s prepregem ER 68 při síle 448 N dosahovala 4200000 při které rovněž nedošlo k porušení, avšak současně u těchto tělísek došlo k porušení po 117 a 354 cyklech. U balsy I s prepregem nedošlo ve dvou případech k porušení u 400000 a 500000 cyklů.

Tabulka 31 Počet cyklů zkušebních tělísek s balsovým jádrem I a III

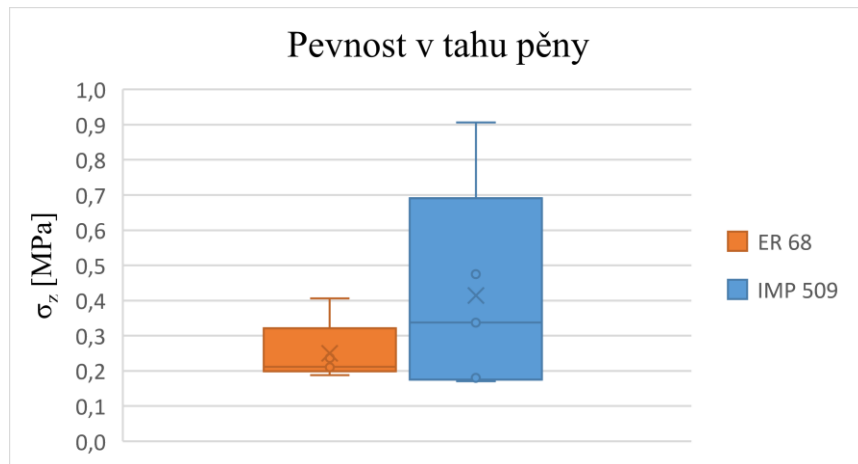
Sendvičová struktura		Počet cyklů [-]							
		320 N		342 N			448 N		
Jádro	Prepreg	n ₁	n ₂	n ₁	n ₂	n ₃	n ₁	n ₂	n ₃
Balsa III	ER 68	1000000 (neporušeno)	1000000 (neporušeno)	1000000 (neporušeno)	1000000 (neporušeno)	1000000 (neporušeno)	420000 (neporušeno)	117	354
Balsa I	IMP 509	1000000 (neporušeno)	1000000 (neporušeno)	400000 (neporušeno)	9333	500000 (neporušeno)	-		

Výsledky experimentů s tělísky obsahujícími prepreg ER 68 prokázaly vyšší odolnost vůči cyklickému namáhání, ale zároveň vykazovaly značný rozptyl naměřených hodnot životnosti. Pro získání přesnějších dat by bylo vhodné provést dodatečné testy na větším počtu vzorků pro každou úroveň cyklického zatížení. Rozsáhlejší měření by pomohlo eliminovat vliv náhodných odchylek a případných vad materiálu, které se mohou projevit

při omezeném počtu vzorků. Díky tomu by bylo možné lépe vyhodnotit skutečnou únavovou životnost prepregů ER 68.

8.3 Zkouška tahem na plocho

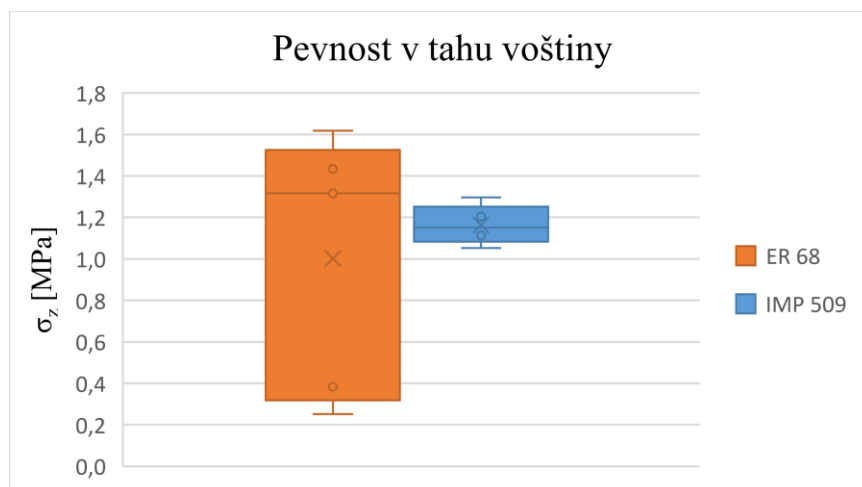
8.3.1 Vyhodnocení tělísek s pěnovým jádrem



Obrázek 97 Vyhodnocení pevnosti v tahu sendviče s pěnovým jádrem

Na Obrázku 97 je porovnávána pevnost v tahu u prepregů s odlišným prosycením pryskyřice pro pěnové jádro 50 RS. Vyšší pevnost vykazovala tělíska s prepregem IMP 509 avšak tělíska s prepregem ER 68 vykazovala ustálenější hodnoty. Nejvyšší maximální naměřená hodnota pevnosti v tahu pro prepreg IMP 590 byla 0,91 MPa.

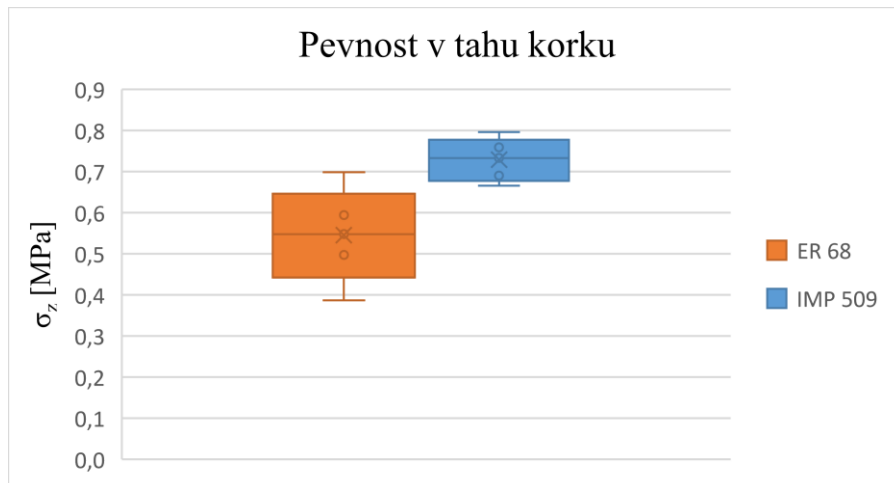
8.3.2 Vyhodnocení tělísek s voštinovým jádrem



Obrázek 98 Vyhodnocení pevnosti v tahu sendviče s voštinovým jádrem

Na Obrázku 98 je porovnávána pevnost v tahu u prepregů s odlišným prosycením pryskyřice pro jádro z nomexové voštiny. Vyšší pevnost vykazovala tělíska s prepregem ER 68 avšak tělíska s prepregem IMP 509 měla ustálenější hodnoty. Nejvyšší maximální naměřená hodnota pevnosti v tahu pro prepreg ER 68 byla 1,62 MPa.

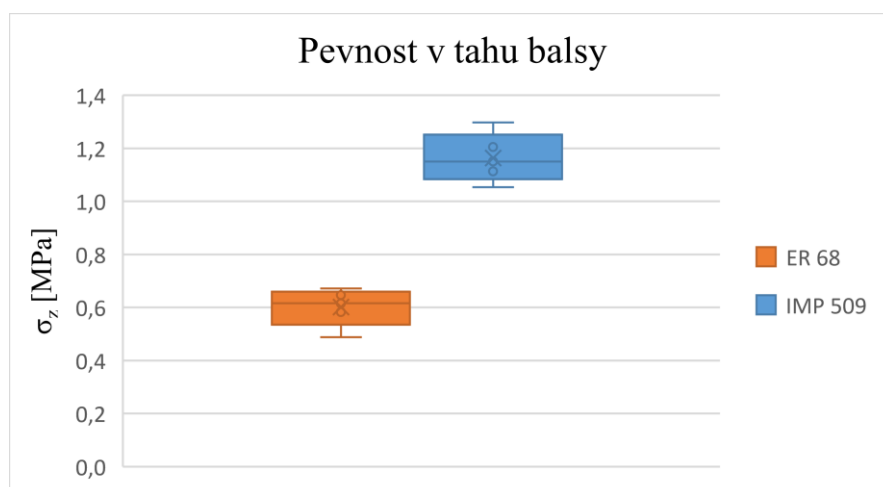
8.3.3 Vyhodnocení tělísek s korkovým jádrem



Obrázek 99 Vyhodnocení pevnosti v tahu sendviče s jádrem z korku

Na Obrázku 99 je porovnávána pevnost v tahu u prepregů s odlišným prosycením pryskyřice pro jádro z korku. Vyšší pevnost vykazovala tělíska s prepregem IMP 509 s korkem NL 10. Nejvyšší maximální naměřená hodnota pevnosti v tahu byla pro tento prepreg 0,8 MPa.

8.3.4 Vyhodnocení tělísek s balsovým jádrem I a III



Obrázek 100 Vyhodnocení pevnosti v tahu sendviče s jádrem z korku

Na Obrázku 100 je porovnávána pevnost v tahu u prepregů s odlišným prosycením pryskyřice a jádrem z balsového dřeva I s prepregem IMP 509 a balsovým dřevem III s prepregem ER 68. Vyšší pevnost vykazovala tělíska z balsy I s prepregem IMP 509. Nejvyšší maximální naměřená hodnota pevnosti v tahu byla pro tento prepreg 0,67 MPa.

8.4 Porovnání zkušebních tělísek

Pro vyhodnocení sendvičových tělísek se 4 typy jader a 2 typy prepregů čelních desek, byly použity tyto zkoušky: cyklická zkouška ohybem, zkouška tahem na plocho. Z vyhodnocených hodnot vyplývá, že ani jeden typ prepregu nevykazoval ideální vlastnosti. Prepreg GG 90 P s pryskyřicí IMP 509 vykazoval lepší hodnoty u všech typů jader při zkoušce tahu na plocho, i když u voštiny dosahovaly výsledky prepregu ER 68 vyšších hodnot, avšak hodnoty s vyšším rozptylem. Z výsledků zkoušky cyklickým ohybem vyplývá, že u všech typů jader dosahoval vyšších hodnot prepreg CC 95 P s pryskyřicí ER 68. V jednom případě u balsy II lepších výsledků dosáhnul prepreg GG 90 P s pryskyřicí IMP 509, avšak tyto hodnoty měly velký rozptyl.

Po shrnutí těchto výsledků lze konstatovat, že tělíska s prepregem CC 95 P s pryskyřicí ER 68 jsou z hlediska mechanických vlastností odolnější, i když nevykazovaly u všech zkoušek nejvyšších hodnot.

9 NÁVRH VÝROBY SENDVIČOVÉ KONSTRUKCE

Po prozkoumání a vyhodnocení výsledků z ohybové zkoušky, cyklické zkoušky ohybem a zkoušením tahu na plocho, byl navržen prototyp pro letecké účely, konkrétně se jedná o sklopný stůl. Skladba a orientace byla navržena stejná jako pro zkušební tělíska (0° - 45° - 0° - 45° -jádro- 0° - 45° - 0° - 45°).

Dle výsledků uvedených výše bylo vybráno balsové jádro jako nejvhodnější materiál jádra. Její hlavní výhodou je, že se jedná o přírodní materiál a zároveň také vykazovala velkou odolnost při cyklickému ohybu, ale také uspokojivé výsledky u tahu na plocho. Z dosažených výsledků byl vybrán prepreg CC 95 P s pryskyřicí ER 68.

9.1 Model sklápěcího stolu

Na Obrázku 101 je znázorněn model sklápěcího stolku, který byl vytvořen v programu Autodesk Inventor Professional 2024. Výkresová dokumentace tohoto dílu je přiložena v diplomové práci Příloha IV.



Obrázek 101 Model sklápěcího stolku

9.2 Technologický postup

V Tabulce 32 lze vidět technologický postup, který představuje posloupnost úkonů potřebných ke zhotovení výrobku. Pro každý krok jsou uvedeny úkony a k nim nezbytné pomůcky a měřidla.

Tabulka 32 Rámcový technologický postup

Číslo	Popis práce	Pomůcky, měřidla
1	Příprava prepregu (Vyjmutí prepregu z mrazáku den předem)	-
2	Čištění formy	škrabka, papírový ubrousek, líh
3	Plnič pórů + separace	papírový ubrousek, separátor, plnič pórů
4	Kontrola separátoru	lepící páska
5	Řezání prepregu a jádra	CNC plotter
6	Příprava pracovního prostředí	papírový ubrousek, technický benzín
7	Očištění jádra	papírový ubrousek, líh
8	Pokládání 1. vrstvy prepregu na formu	váleček
9	Debulking (aplikace vakua)	separační fólie, odsávací rohož, vakuovací fólie, těsnění
10	Pokládání 2.- 4 vrstvy prepregu	váleček
11	Pokládání jádra	-
12	Pokládání prepregů (na 2. straně)	váleček
13	Lisování	-
14	Odformování	stlačený vzduch, speciální přípravky
15	Ořezání výrobku	diamantový kotouč, bruska
16	Leštění dílu	leštící pasta, textilie
17	Lakování dílu	lakovací pistol

ZÁVĚR

Diplomová práce se zabývala návrhem sendvičové struktury, volbou materiálů jader a prepregů vhodných k lisování a testování mechanických vlastností. Po vyhodnocení všech mechanických zkoušek byl navržen prototyp sklápěcího stolu pro použití v letadle a dále byl také sestaven technologický postup popisující jednotlivé kroky výrobního procesu.

V teoretické části diplomové práce byly popsány sendvičové konstrukce, materiály krycích desek, typy jader, dále byly podrobněji rozepsána voštinová jádra a jejich výroba. Pozornost byla také věnována aplikacím sendvičových strukturách v leteckém průmyslu a železniční dopravě. Nedílnou součástí práce je také proces výroby sendvičových konstrukcí.

Praktická část zahrnuje více částí. V první z nich byl zvolen prepreg s jádrem, který byl vhodný pro zpracování v lisu. Poté došlo ke stanovení typu skladby sendvičové struktury. Byla zvolena skladba ve formě (0°- 45°- 0°- 45°- jádro - 45°- 0°- 45°- 0°). Po tomto návrhu byla popsána výroba zkušebních desek, ze kterých byly později nařezána zkušební tělíška dle technických norem. Dalším krokem byla příprava formy, aby mohlo dojít k samotnému kladení prepregů, po debulkingu byly desky vytvrzovány v lisu.

Po vytvrzení v lisu a nařezání zkušebních tělíšek na normalizované rozměry byly provedeny samotné zkoušky mechanických vlastností. Pro testování těchto tělíšek byla provedena zkouška ohybem ze kterého byla zjištěna F_{max} , která byla dále použita pro zatížení v cyklickém ohybu. Z výsledků zkoušky cyklickým ohybem vyplývá, že u všech typů jader dosahoval vyšších hodnot prepreg CC 95 P s pryskyřicí ER 68. U zkoušky tahu na plocho působil prepreg IMP 509 jako vhodnější, i když u voštiny dosahovaly výsledky prepregu ER 68 vyšších hodnot, tak byly zase více rozptýleny.

V poslední části diplomové práce byl vytvořen návrh prototypu sklápěcího stolu pro použití v letadle. Ze získaných výsledků mechanických zkoušek byla navržena stejná skladba prepregů jako u zkušebních tělíšek. Jádro bylo navrženo z balsového dřeva z důvodu velké odolnosti při cyklickém ohybu, ale také vykazovalo uspokojivé výsledky u tahu na plocho. Prepreg byl vybrán CC 95 P s pryskyřicí ER 68 a následně byl navržen technologický postup prototypu.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] KRISHNASAMY, Senthilkumar et al., 2022. Sandwich Composites [online]. Boca Raton [cit. 2024-01-31]. ISBN 978-1-003-14303-1. Dostupné z: doi:10.1201/9781003143031
- [2] PATEKAR, Vivek a Kishor KALE, 2022. State of the art review on mechanical properties of sandwich composite structures. Polymer Composites [online]. 43(9), 5820-5830 [cit. 2024-01-31]. ISSN 0272-8397. Dostupné z: doi:10.1002/pc.26989
- [3] MA, Quanjin et al., 2021. A review of the recent trends on core structures and impact response of sandwich panels. Journal of Composite Materials [online]. 55(18), 2513-2555 [cit. 2024-02-05]. ISSN 0021-9983. Dostupné z: doi:10.1177/0021998321990734
- [4] CABPMELL, F.C., 2010. Structural composite materials [online]. USA: ASM International [cit. 2024-02-07]. ISBN 978-1-61503-037-8.
- [5] STAAB, George H., 2015. Laminar Composites [online]. 2nd ed. USA: Elsevier [cit. 2024-02-13]. ISBN 978-0-12-802400-3.
- [6] STOKES, Vijay K., 2020. Introduction to Plastics Engineering [online]. Wiley-ASME Press Series [cit. 2024-02-14]. ISBN 978-1-5231-3304-8.
- [7] MALLICK, P. K., 2018. Processing of polymer matrix composites [online]. Boca Raton [cit. 2024-02-07]. ISBN 978-146-6578-227.
- [8] BARBERO, Ever J., 2018. Introduction to composite materials design [online]. 3rd. CRC Press [cit. 2024-02-22]. ISBN 9781315296494. Dostupné z: doi:10.1201/9781315296494
- [9] BUNSELL, Anthony R., Sébastien JOANNÈS a Alain THIONNET, 2021. Fundamentals of Fibre Reinforced Composite Materials [online]. 2. Boca Raton: CRC Press [cit. 2024-02-07]. ISBN 9780429399909. Dostupné z: doi:10.1201/9780429399909
- [10] ODESANYA, Kazeem Olabisi et al., 2021. Natural Fibre-Reinforced Composite for Ballistic Applications: A Review. Journal of Polymers and the Environment [online]. 29(12), 3795-3812 [cit. 2024-02-07]. ISSN 1566-2543. Dostupné z: doi:10.1007/s10924-021-02169-4

- [11] LENGSELD, Hauke et al., 2016. Composite Technology: Prepregs and Monolithic Part Fabrication Technologies [online]. Hanser Publications [cit. 2024-02-10]. ISBN 978-1-5231-0441-3.
- [12] VAIDYA, Uday, 2011. Composites for Automotive, Truck and Mass Transit - Materials, Design, Manufacturing [online]. DEStech Publications [cit. 2024-02-10]. ISBN 978-1-5231-0107-8.
- [13] Composite Materials Handbook, Structural Sandwich Composites [online], 2013. 6. SAE International on behalf of CMH-17, a division of Wichita State University [cit. 2024-01-30]. ISBN 978-0-7680-8062-9.
- [14] JANI, Shivang, Ghanshyam ACHARYA a Shubham RUPANI, 2017. Design, Modelling and Manufacturing aspects of Honeycomb Sandwich Structures: A Review [online]. [cit. 2024-01-29]. Dostupné z: doi:10.1712/ijdsr.17013
- [15] RANA, Sohail a Raul FANGUEIRO, 2016. Advanced Composite Materials for Aerospace Engineering [online]. Elsevier [cit. 2024-02-20]. ISBN 978-0-08-100054-0.
- [16] KHAN, Tayyab et al., 2020. A review on recent advances in sandwich structures based on polyurethane foam cores. Polymer Composites [online]. 41(6), 2355-2400 [cit. 2024-02-13]. ISSN 0272-8397. Dostupné z: doi:10.1002/pc.25543
- [17] Core materials: The basics [online], 2020. [cit. 2024-02-19]. Dostupné z: <https://www.compositesworld.com/articles/honeycomb-cores-the-basics>
- [18] FENG, Yixiong et al., 2020. Creative design for sandwich structures: A review. International Journal of Advanced Robotic Systems [online]. 17(3) [cit. 2024-02-15]. ISSN 1729-8814. Dostupné z: doi:10.1177/1729881420921327
- [19] HEXCEL, 2016. HexWeb® Honeycomb Attributes and Properties [online]. [cit. 2024-02-27]. Dostupné z: https://www.hexcel.com/user_area/content_media/raw/HexWebHoneycombAttributesandProperties.pdf
- [20] LI, Kun et al., 2022. Mechanical properties and energy absorption capability of a new multi-cell lattice honeycomb paperboard under out-plane compression: Experimental and theoretical studies. Packaging Technology and Science [online]. 35(3), 273-290 [cit. 2024-01-29]. ISSN 0894-3214. Dostupné z: doi:10.1002/pts.2625

- [21] ARMSTRONG, Keith B., L. Graham BEVAN a William F. COLE, 2020. Care and repair of advanced composites [online]. 3rd ed. Warrendale: SAE International [cit. 2024-02-15]. ISBN 978-1-5231-4042-8.
- [22] THOMSEN, O. T., E. BOZHEVOLNAYA a A. LYCKEGAARD, 2005. Sandwich structures 7: advancing with sandwich structures and materials: proceedings of the 7th International Conference on Sandwich Structures, Aalborg University, Aalborg, Denmark, 29-31 August 2005 [online]. Dordrecht: Springer [cit. 2024-02-17]. ISBN 14-020-3444-X.
- [23] CASTANIE, Bruno, Christophe BOUVET a Malo GINOT, 2020. Review of composite sandwich structure in aeronautic applications. Composites Part C: Open Access [online]. 1 [cit. 2024-02-06]. ISSN 26666820. Dostupné z: doi:10.1016/j.jcomc.2020.100004
- [24] "Mosquitoes" of the Royal Air Force [online]. [cit. 2024-02-17]. Dostupné z: <https://en.topwar.ru/92991-moskity-korolevskih-vvs.html> (Obrázek 18)
- [25] Last Flight of the Valkyrie: A Closer Look at the Forgotten Mach 3 XB-70 Superbomber [online], 2022. [cit. 2024-02-18]. Dostupné z: <https://www.cnet.com/culture/last-flight-of-the-valkyrie-a-closer-look-at-the-forgotten-mach-3-xb-70-superbomber/> (Obrázek 19)
- [26] History Takes Flight [online]. [cit. 2024-02-25]. Dostupné z: <https://www.eaa.org/eea-museum/museum-collection/aircraft-collection-folder/scaled-composites-rutan-voyager-partial-replica>
- [27] VOYAGER'S NONSTOP AROUND-THE-WORLD ADVENTURE [online], 2019. [cit. 2024-02-25]. Dostupné z: <https://www.historynet.com/nonstop-voyage-around-the-world/>
- [28] Beechcraft Starship: The Flying Fish [online], 2023. [cit. 2024-02-17]. Dostupné z: <https://www.jetsprops.com/transport/beechcraft-starship-the-flying-fish.html> (Obrázek 21)
- [29] FedEx Express Further Modernises Fleet With Delivery of First Purpose-Built Regional ATR Freighter [online], 2020. [cit. 2024-02-06]. Dostupné z: <https://www.atr-aircraft.com/presspost/fedex-express-further-modernises-fleet-with-delivery-of-first-purpose-built-regional-atr-freighter/>
- [30] Elixir receives EASA CS-23 type certification [online], 2020. [cit. 2024-02-17]. Dostupné z: <https://flyer.co.uk/elixir-receives-easa-cs-23-type-certification/> (Obrázek 23)

- [31] COBRA International to Showcase 5.5m Swiftlet UAV Developed for the Royal Thai Air Force at AUVSI XPONENTIAL 2022 [online], 2020. [cit. 2024-02-19]. Dostupné z: <https://www.cobrainter.com/news/news-press-release/cobra-international-to-showcase-5-5m-swiftlet-uav-developed-for-the-royal-thai-air-force-at-auvsi-xponential-2022>
- [32] AIR TAXIS MERGE INTO THE FAST LANE WITH OUR URBAN AIR MOBILITY FOAM [online]. [cit. 2024-02-18]. Dostupné z: <https://performance-foams.evonik.com/en/markets/aerospace-and-aviation/urban-air-mobility>
- [33] 5M. ŽELEZNIČNÍ VOZIDLA [online]. [cit. 2024-02-26]. Dostupné z: <https://www.5m.cz/en>
- [34] IHME, Joachim, 2022. Rail Vehicle Technology [online]. Springer [cit. 2024-02-27]. ISBN 978-3-658-36969-9. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-658-36969-9
- [35] Handbook of research on manufacturing process modeling and optimization strategies [online], 2017. IGI Global [cit. 2024-02-20]. ISBN 9781522524410. Dostupné z: doi:10.4018/978-1-5225-2440-3
- [36] ADVANI, Suresh G. a Kuang-Ting HSIAO, 2012. Manufacturing Techniques for Polymer Matrix Composite (PMCs) [online]. Woodhead Publishing [cit. 2024-03-01]. ISBN 978-0-85709-625-8.
- [37] ASC. ASC Process Systems [online]. [cit. 2024-03-01]. Dostupné z: <https://www.aschome.com/index.php/en/>
- [38] WEITZENBÖCK, Jan R., 2012. Adhesives in marine engineering [online]. Woodhead Publishing Limited [cit. 2024-03-25]. ISBN 978-0-85709-615-9.
- [39] EHRENSTEIN, Gottfried W., 2009. Polymerní kompozitní materiály [online]. Praha: Scientia [cit. 2024-03-04]. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [40] ZWICK ROELL, 2021. Standard Test Methods for Sandwich Composites [online]. [cit. 2024-03-04]. Dostupné z: https://www.zwickroell.com/fileadmin/content/Files/PDF/testXpo/2021/Lecture/Hannes_Koerberer_Sandwich_Composites_EN.pdf
- [41] SEEMANN, Ralf, 2019. A Virtual Testing Approach for Honeycomb Sandwich Panel Joints in Aircraft Interior [online]. Springer Vieweg [cit. 2024-03-04]. ISBN 978-3-662-60275-1.

- [42] CARLSSON, Leif A. a George A. KARDOMATEAS, 2011. Structural and failure mechanics of sandwich composites [online]. New York: Springer [cit. 2024-03-23]. ISBN 978-1-4020-3225-7.
- [43] SAUSE, Markus G.R. a Elena JASIŪNIENĚ, 2021. Structural Health Monitoring Damage Detection Systems for Aerospace [online]. Springer [cit. 2024-03-23]. ISBN 978-3030721916.
- [44] CASHEM. Materiálový list pěny Cascell 50 RS [online]. [cit. 2024-04-25]. Dostupné z: <https://www.pmifoam.com/product/rs-data-sheet/cascell-rs.html>
- [45] EASYCOMPOSITES. Materiálový list nomexové voštiny [online]. [cit. 2024-04-25]. Dostupné z: <https://media.easycomposites.eu/datasheets/EC-SDS-Nomex.pdf>
- [46] AMORIM CORK COMPOSITES. Materiálový list korku NL 10 [online]. [cit. 2024-04-25]. Dostupné z: <https://www.ecfibreglasssupplies.co.uk/user/TechnicalDataSheet/5817.pdf>
- [47] AMORIM CORK COMPOSITES. Materiálový list korku NL 20 [online]. [cit. 2024-04-25]. Dostupné z: <https://amorimcorkcomposites.com/media/4203/mds-nl20-en.pdf>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

BMI	High performance polyimide	
PP	Polypropylen	
PA	Polyamid	
PC	Polykarbonát	
PU	Polyuretan	
PEI	Polyetherimide	
PVC	Polyvinylchlorid	
ABS	Akrylonitril butadien styren	
FRP	Fiberglass foam cores	
FAA	Federal Aviation Administration	
E_f	Modul pružnosti v ohybu	[MPa]
F	Síla	[N]
σ_f	Napětí v ohybu	[MPa]
W_f	Vykonaná práce	[Nmm]
ε_f	Deformace v ohybu	[%]
s	Prohnutí	[mm]
\bar{x}	Aritmetický průměr	
$S_{\bar{x}}$	Směrodatná odchylka	
$v_{\bar{x}}$	Variační koeficient	[%]
F_{max}	Maximální síla	[N]
σ_z	Pevnost v tahu	[MPa]
S	Obsah tělíska	[mm ²]
a	Šířka tělíska	[mm]
b	Délka tělíska	[mm]

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obrázek 1 Konstrukce sendvičové struktury [2]</i>	11
<i>Obrázek 2 Konstrukce I-nosníku [1]</i>	11
<i>Obrázek 3 Historický vývoj sendvičové struktury [3]</i>	12
<i>Obrázek 4 Typy vláknových kompozitů [5]</i>	13
<i>Obrázek 5 Typy částicových kompozitů [5]</i>	14
<i>Obrázek 6 Typy vazeb tkanin [7]</i>	14
<i>Obrázek 7 Porovnání termosetových a termoplastických polymerních struktur [4]</i>	16
<i>Obrázek 8 Schéma výroby prepregu pomocí metody tavení za tepla [11]</i>	19
<i>Obrázek 9 Schéma výroby prepregu pomocí metody rozpouštědlového máčení [11]</i>	20
<i>Obrázek 10 Voština a její struktura v sendviči [16]</i>	21
<i>Obrázek 11 Popis voštinového jádra [4]</i>	22
<i>Obrázek 12 Křivka závislosti nákladů na zpracování a vlastností voštinových materiálů [18]</i>	23
<i>Obrázek 13 Typy buněk voštiny [19]</i>	25
<i>Obrázek 14 Expanzní proces výroby voštin [20]</i>	26
<i>Obrázek 15 Proces výroby voštin tvarováním [20]</i>	26
<i>Obrázek 16 Pěna a její struktura v sendviči [16]</i>	27
<i>Obrázek 17 Korek a jeho struktura v sendviči [16]</i>	28
<i>Obrázek 18 Mosquito DH 98 [24]</i>	30
<i>Obrázek 19 Superbomber XB-70 „Valkyrie“ [25]</i>	30
<i>Obrázek 20 Rutan Voyager [27]</i>	31
<i>Obrázek 21 letadlo Beechcraft Starship [28]</i>	31
<i>Obrázek 22 Použité materiály v letadle ATR 72 [23,29]</i>	32
<i>Obrázek 23 Letadlo Elixir [30]</i>	32
<i>Obrázek 24 Bezpilotní letoun Swiftlet [31]</i>	33
<i>Obrázek 25 Vrtulník eVTOLy [32]</i>	33
<i>Obrázek 26 Použití materiálů v železniční dopravě [33]</i>	34
<i>Obrázek 27 Vlak společnosti Vogtlandbahn [34]</i>	34
<i>Obrázek 28 Lisování sendvičové konstrukce [35]</i>	35
<i>Obrázek 29 Pec od firmy ASC [37]</i>	36
<i>Obrázek 30 Vytvrzování v autoklávu [15,37]</i>	37
<i>Obrázek 31 Průběh tříbodového a čtyřbodového ohybu [39]</i>	38
<i>Obrázek 32 Zkouška čtyřbodovým ohybem [40]</i>	39
<i>Obrázek 33 Zkouška příčným smykem [40]</i>	39

<i>Obrázek 34</i> Jádru při smykovém napětí τ_{xz} a τ_{yz} [42]	40
<i>Obrázek 35</i> Zkouška tahem na plocho [40]	40
<i>Obrázek 36</i> Vady voštin [43]	41
<i>Obrázek 37</i> Použitá jádra a) korek b) pěna c) nomexová voština d) balsa.....	44
<i>Obrázek 38</i> Řezání prepregů na CNC plotteru.....	45
<i>Obrázek 39</i> Balsa a korek v sušárně.....	46
<i>Obrázek 40</i> Schéma vrstvení sendvičové konstrukce	47
<i>Obrázek 41</i> Položení 1. vrstvy na jádro a odstraňování bublin pomocí válečku	47
<i>Obrázek 42</i> Postup výroby sendvičové konstrukce s voštinovým jádrem	48
<i>Obrázek 43</i> Debulking	48
<i>Obrázek 44</i> Lis	49
<i>Obrázek 45</i> Zkouška ohybem	50
<i>Obrázek 46</i> Závislost ohybového napětí na deformaci pro tělíska s pěnou + ER 68	51
<i>Obrázek 47</i> Závislost ohybového napětí na deformaci pro tělíska s pěnou + IMP 509.....	52
<i>Obrázek 48</i> Poruchy sendvičů s pěnovým jádrem	53
<i>Obrázek 49</i> Závislost ohybového napětí na deformaci pro tělíska s voštinou + ER 68	53
<i>Obrázek 50</i> Závislost ohybového napětí na deformaci pro tělíska s voštinou + IMP 509 ..	54
<i>Obrázek 51</i> Poruchy sendvičů s voštinovým jádrem	55
<i>Obrázek 52</i> Závislost ohybového napětí na deformaci pro tělíska s korkem + ER 68	56
<i>Obrázek 53</i> Závislost ohybového napětí na deformaci pro tělíska s korkem + IMP 509....	57
<i>Obrázek 54</i> Poruchy sendvičů s korkovým jádrem	58
<i>Obrázek 55</i> Závislost ohybového napětí na deformaci pro tělíska s balsou II + ER 68	58
<i>Obrázek 56</i> Závislost ohybového napětí na deformaci pro tělíska s balsou II + IMP 509 ..	59
<i>Obrázek 57</i> Závislost ohybového napětí na deformaci pro tělíska s balsou III + ER 68	60
<i>Obrázek 58</i> Závislost ohybového napětí na deformaci pro tělíska s balsou I + IMP 509...61	61
<i>Obrázek 59</i> Poruchy sendvičů s jádrem z balsy	62
<i>Obrázek 60</i> Zkouška cyklickým ohybem	63
<i>Obrázek 61</i> Velikost zatěžujících sil pro tělíska z pěny během zkoušky cyklickým ohybem	64
<i>Obrázek 62</i> Velikost prohnutí pro tělíska z pěny během zkoušky cyklickým ohybem	64
<i>Obrázek 63</i> Závěrečné cykly před selháním zkušebního tělíska z pěny	65
<i>Obrázek 64</i> Poruchy sendvičové struktury s pěnovým jádrem u zkoušky cyklickým ohybem	65
<i>Obrázek 65</i> Velikost zatěžujících sil pro tělíska z voštiny během zkoušky cyklickým ohybem	66
<i>Obrázek 66</i> Velikost prohnutí pro tělíska z voštiny během zkoušky cyklickým ohybem	66
<i>Obrázek 67</i> Závěrečné cykly před selháním zkušebního tělíska z voštiny	66

<i>Obrázek 68 Poruchy sendvičové struktury s voštinovým jádrem u zkoušky cyklickým ohybem</i>	<i>67</i>
<i>Obrázek 69 Velikost zatěžujících sil pro tělíska z korku během zkoušky cyklickým ohybem</i>	<i>67</i>
<i>Obrázek 70 Velikost prohnutí pro tělíska z voštiny během zkoušky cyklickým ohybem</i>	<i>68</i>
<i>Obrázek 71 Závěrečné cykly před selháním zkušebního tělíska z korku</i>	<i>68</i>
<i>Obrázek 72 Poruchy sendvičové struktury s korkovým jádrem u zkoušky cyklickým ohybem</i>	<i>68</i>
<i>Obrázek 73 Velikost zatěžujících sil pro tělíska z balsy během zkoušky cyklickým ohybem</i>	<i>69</i>
<i>Obrázek 74 Velikost prohnutí pro tělíska z voštiny během zkoušky cyklickým ohybem</i>	<i>69</i>
<i>Obrázek 75 Závěrečné cykly před selháním zkušebního tělíska z balsy</i>	<i>69</i>
<i>Obrázek 76 Zkouška tahem na plocho</i>	<i>70</i>
<i>Obrázek 77 Diagram tahové zkoušky pro tělíska s pěnou + ER 68</i>	<i>71</i>
<i>Obrázek 78 Diagram tahové zkoušky pro tělíska s pěnou + IMP 509</i>	<i>72</i>
<i>Obrázek 79 Poruchy sendvičů s pěnovým jádrem</i>	<i>73</i>
<i>Obrázek 80 Diagram tahové zkoušky pro tělíska s voštinou + ER 68.....</i>	<i>74</i>
<i>Obrázek 81 Diagram tahové zkoušky pro tělíska s voštinou + IMP 509</i>	<i>75</i>
<i>Obrázek 82 Poruchy sendvičů s voštinovým jádrem</i>	<i>76</i>
<i>Obrázek 83 Diagram tahové zkoušky pro tělíska s korkem + ER 68</i>	<i>76</i>
<i>Obrázek 84 Diagram tahové zkoušky pro tělíska s korkem + IMP 509</i>	<i>77</i>
<i>Obrázek 85 Poruchy sendvičů s pěnovým jádrem</i>	<i>78</i>
<i>Obrázek 86 Diagram tahové zkoušky pro tělíska s balsou + ER 68.....</i>	<i>79</i>
<i>Obrázek 87 Diagram tahové zkoušky pro tělíska s balsou + IMP 509</i>	<i>80</i>
<i>Obrázek 88 Poruchy sendvičů s balsovým jádrem</i>	<i>81</i>
<i>Obrázek 89 Vyhodnocení modulu pružnosti sendviče s pěnovým jádrem</i>	<i>82</i>
<i>Obrázek 90 Vyhodnocení meze pevnosti sendviče s pěnovým jádrem</i>	<i>83</i>
<i>Obrázek 91 Vyhodnocení modulu pružnosti sendviče s voštinovým jádrem</i>	<i>83</i>
<i>Obrázek 92 Vyhodnocení meze pevnosti sendviče s voštinovým jádrem</i>	<i>84</i>
<i>Obrázek 93 Vyhodnocení modulu pružnosti sendviče s korkovým jádrem</i>	<i>85</i>
<i>Obrázek 94 Vyhodnocení meze pevnosti sendviče s korkovým jádrem</i>	<i>85</i>
<i>Obrázek 95 Vyhodnocení modulu pružnosti sendviče s balsovým jádrem</i>	<i>86</i>
<i>Obrázek 96 Vyhodnocení meze pevnosti sendviče s korkovým jádrem</i>	<i>86</i>
<i>Obrázek 97 Vyhodnocení pevnosti v tahu sendviče s pěnovým jádrem</i>	<i>89</i>
<i>Obrázek 98 Vyhodnocení pevnosti v tahu sendviče s voštinovým jádrem</i>	<i>89</i>
<i>Obrázek 99 Vyhodnocení pevnosti v tahu sendviče s jádrem z korku</i>	<i>90</i>
<i>Obrázek 100 Vyhodnocení pevnosti v tahu sendviče s jádrem z korku</i>	<i>90</i>

Obrázek 101 Model sklápěcího stolku92

SEZNAM TABULEK

<i>Tabulka 1 Mechanické vlastnosti vybraných vláken [9,10]</i>	16
<i>Tabulka 2 Porovnání vlastností voštinových materiálů [13]</i>	23
<i>Tabulka 3 Vlastnosti matric pro zvolené prepregy</i>	44
<i>Tabulka 4 Tloušťka jednotlivých jader</i>	44
<i>Tabulka 5 Nastavené hodnoty sušárny</i>	46
<i>Tabulka 6 Hmotnosti jader před a po vysušení</i>	47
<i>Tabulka 7 Nastavení lisu</i>	49
<i>Tabulka 8 Naměřené hodnoty z ohybové zkoušky pro tělíska s pěnou + ER 68</i>	51
<i>Tabulka 9 Naměřené hodnoty z ohybové zkoušky pro tělíska s pěnou + IMP 509</i>	52
<i>Tabulka 10 Naměřené hodnoty z ohybové zkoušky pro tělíska s voštinou + ER 68</i>	54
<i>Tabulka 11 Naměřené hodnoty z ohybové zkoušky pro tělíska s voštinou + IMP 509</i>	55
<i>Tabulka 12 Naměřené hodnoty z ohybové zkoušky pro tělíska s korkem + ER 68</i>	56
<i>Tabulka 13 Naměřené hodnoty z ohybové zkoušky pro tělíska s korkem + IMP 509</i>	57
<i>Tabulka 14 Naměřené hodnoty z ohybové zkoušky pro tělíska z balsy II + ER 68</i>	59
<i>Tabulka 15 Naměřené hodnoty z ohybové zkoušky pro tělíska z balsy II + IMP 509</i>	60
<i>Tabulka 16 Naměřené hodnoty z ohybové zkoušky pro tělíska z balsy III + ER 68</i>	61
<i>Tabulka 17 Naměřené hodnoty z ohybové zkoušky pro tělíska z balsy I + IMP 509</i>	62
<i>Tabulka 18 Síly použité pro tělíska pěny a voštiny</i>	63
<i>Tabulka 19 Síly použité pro tělíska korku a balsy II</i>	64
<i>Tabulka 20 Síly použité pro tělíska balsy I a III</i>	64
<i>Tabulka 21 Maximální hodnoty síly a napětí u tělísek s pěnovým jádrem + ER 68</i>	71
<i>Tabulka 22 Maximální hodnoty síly a napětí u tělísek s pěnovým jádrem + IMP 509</i>	72
<i>Tabulka 23 Maximální hodnoty síly a napětí u tělísek s voštinovým jádrem + ER 68</i>	74
<i>Tabulka 24 Maximální hodnoty síly a napětí u tělísek s voštinovým jádrem + IMP 509</i>	75
<i>Tabulka 25 Maximální hodnoty síly a napětí u tělísek s korkovým jádrem + ER 68</i>	77
<i>Tabulka 26 Maximální hodnoty síly a napětí u tělísek s korkovým jádrem + IMP 509</i>	78
<i>Tabulka 27 Maximální hodnoty síly a napětí u tělísek s balsovým jádrem + ER 68</i>	79
<i>Tabulka 28 Maximální hodnoty síly a napětí u tělísek s balsovým jádrem + IMP 509</i>	80
<i>Tabulka 29 Počet cyklů zkušebních tělísek s pěnovým a voštinovým jádrem</i>	87
<i>Tabulka 30 Počet cyklů zkušebních tělísek s korkovým a balsovým jádrem II</i>	88
<i>Tabulka 31 Počet cyklů zkušebních tělísek s balsovým jádrem I a III</i>	88
<i>Tabulka 32 Rámcový technologický postup</i>	93

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha P I: MATERIÁLOVÝ LIST MATRICE ER 68

Příloha P II: MATERIÁLOVÝ LIST MATRICE IMP 509

Příloha P III: MATERIÁLOVÝ LIST LEPIDLA IMPAS-01

Příloha P IV: VÝKRES SKLÁPĚCÍHO STOLU

PŘÍLOHA P I: MATERIÁLOVÝ LIST MATRICE ER 68

MEEM

ER 68

Description

Is formulated HOTMELT epoxy resin, specifically designed for compression molding structural and exterior parts with LONG SHELF LIFE, GOOD TACK, SHORT PRODUCTION CYCLE-TIME. It is a very versatile matrix which could be pre-impregnated into carbon, glass, aramid or basalt fibers and is allowing a range of processing temperatures.

Benefits

- Hot melt (Solvent free)
- Good chemical resistance
- Good mechanical performance
- High surface quality parts

SYSTEM CURING CONDITIONS

ER 68

Curing Temp.	Gel Time	Curing Time	Tg – DMA (2K/min.)
120 °C	3 min.	10 min.	140 °C
140 °C	1.5 min.	5 min.	140 °C

- COLOUR: transparent
- DENSITY: 1,2 g/cm³

STORAGE and HANDLING

- Shelf life¹: 6 months
- Out life²: 3 weeks

¹ Shelf Life: the maximum storage life for prepreg, upon receipt by the customer, when stored continuously, in a sealed moisture-proof packing, at -18°C/0°F.

² Out life: the maximum accumulated time allowed at room temperature (23°C) between removal from the freezer and cure.

Prepreg should be stored as received in a cool dry place or in a refrigerator. After removal from refrigerator storage, prepreg should be allowed to reach room temperature before unpack which preventing condensation. (A full reel in its packing can take up to 48 hours).

FLEXURAL TEST (5min at 140°C)

Flexural strength (ISO 14125)	1 610 MPa
Flexural modulus (ISO 14125)	108 GPa
Interlaminar shear test (ISO 14130)	91 MPa

HANDLING PRECAUTIONS

Safety precautions at workplace

Protective clothing	yes
Gloves	essential
Arm protectors	recommended when skin contact likely
Goggles/safety glasses	yes

SKIN PROTECTION

Before starting work
After washing

Apply barrier cream to exposed skin
Apply barrier or nourishing cream

Cleansing of contaminated skin

Dab off with absorbent paper, wash with warm water and alkali-free soap, then dry with disposable towels.
Do not use solvents.

Disposal of spillage

Soak up with sawdust or cotton waste and deposit in plastic-lined bin.

FIRST AID

Contamination of the eyes by resin, hardener or mix should be treated immediately by flushing with clean, running water for 10 to 15 minutes. A doctor should then be consulted.

Material smeared or splashed on the skin should be dabbed off, and the contaminated area then washed and treated with a cleansing cream (see above). A doctor should be consulted in the event of severe irritation or burns. Contaminated clothing should be changed immediately.

Anyone taken ill after inhaling vapors should be moved out of doors immediately.

In all cases of doubt call for medical assistance.

Any technical recommendations given by us whether orally or in writing are not binding on us, also with regard to any rights of third parties. Prospective users should conduct their own trials to determine whether our products are suitable for the intended purpose.

PŘÍLOHA P II: MATERIÁLOVÝ LIST MATRICE IMP 509



IMPREGNATEX
TECHNICAL DATASHEET
IMP509

Rev 1 - 01/03/2022

IMP509

DESCRIPTION

Modified epoxy matrix IMP509 can be processed by autoclave curing and snap-cure press moulding. Both metal and composite tooling can be used for processing IMP509 prepregs. It is a high Tg resin for aesthetic composite applications.

BENEFITS AND FEATURES

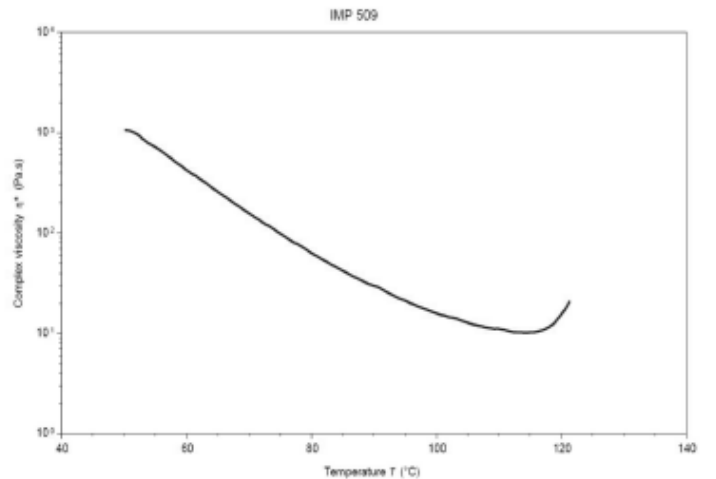
- IMP509 prepregs find uses in automotive, sports & leisure, marine and industrial applications.
- Good UV resistance and environmental stability for aesthetic cosmetic components.
- Maximum DMA Tg of 145°C (ASTM D7028) from autoclave curing.

IMP509 are available with woven carbon, glass and aramid fibre reinforcements.

RESIN PROPERTIES		
TYPE		TOUGHENED EPOXY
Cured resin's density	g/cm ³	1.19 to 1.22
Gel Time at 125 °C	min	2 to 3
TACK		MEDIUM
Out-life (23 °C)	weeks	4
Shelf Life (-18 °C)	months	12

VISCOSITY PROFILE

The chart beside shows the rheological behaviour of IMP509. Heating rate 2 °C/min



ANGELONI GROUP

Via Abbate Tommaso, 72/A - 30020 Quarto d'Altino (VE) Italy
T. +39 0422 780580 - F. +39 0422 782782
E. info@angelonigroup.com

angelonigroup.com



RECOMMENDED AUTOCLAVE CURE SCHEDULES

One of the following autoclave cure schedules should be selected:

- 1.5 Hours (90 minutes) @ 120 °C, 6 Bar pressure. Maximum DMA-Tg = 135 °C.
- 1.5 Hours (90 minutes) @ 135 °C, 6 Bar pressure. Maximum DMA-Tg = 140 °C.
- 2.0 Hours (120 minutes) @ 140 °C, 6 Bar pressure. Maximum DMA-Tg = 145 °C

PROCESSING GUIDELINES

140 °C Autoclave Cure Cycle Option:

- From the beginning of the cure cycle, apply maximum vacuum pressure to the bagged component(s).
- Apply an over pressure of 6.0±1.0 Bar from the beginning of the cure cycle.
- Use monitoring thermocouples applied to the surface of the component(s) to define the actual cure cycle. Select those areas with the highest thermal inertia and the slowest to heat up.
- Use a controlled heating rate of 1.0 to 2.0 °C/min from room temperature to 140 °C.
- The tolerance on the actual cure temperature on the component bag is 140 °C, +5 °C -0 °C.
- The cure cycle dwell duration starts once the slowest monitoring thermocouple reaches 140 °C.
- The tolerance on the 120 minutes cure time is +20 minutes, -0 minutes.
- Once cured, the cooling rate can be 2.0 to 3.0 °C/min back to room temperature or 30 °C, whichever is higher.

IMP509 is a reactive resin formulation which may undergo high exothermic heating during initial curing process if guidelines are not followed. Carefully setting recommended heating rate and dwell temperatures cure schedules is required. Exotherm risk increases with increasing laminate thickness.

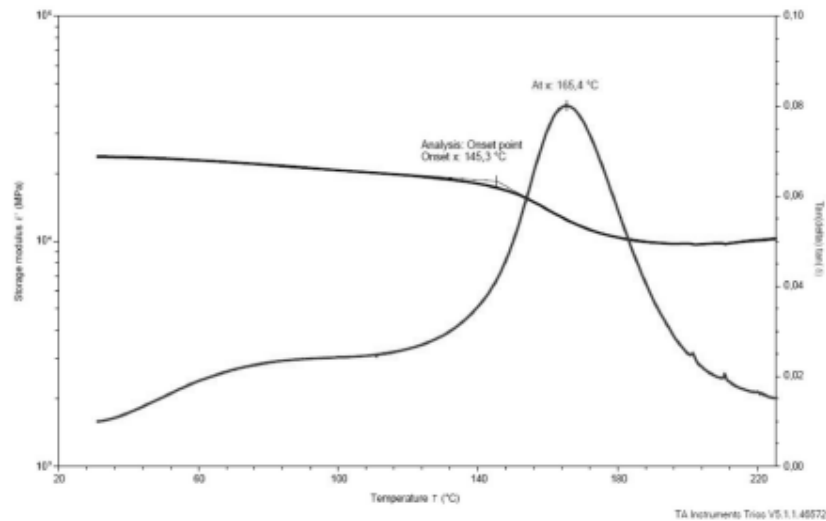
ANGELONI GROUP

Via Abbate Tommaso, 72/A - 30020 Quarto d'Altino (VE) Italy
T. +39 0422 780580 - F. +39 0422 782782
E. info@angelonigroup.com

angelonigroup.com

THERMAL PERFORMANCE

With a 140 °C autoclave cure schedule, the glass transition temperature (T_g) will reach a maximum of 145 °C (T_g Onset by ASTM D7028).



DMA trace: 8 Plies GG204P-IMP509-43, Autoclave cured 120 min @ 140 °C, 6 Bar.

RECOMMENDED PRESS MOULDING CURE SCHEDULES

One of the following press moulding schedules should be selected:

TEMPERATURE (°C)	TIME (minutes)
130	9
140	5
150	4
160	3

These cycles are appropriate for placing a prepreg preform into a pre-heated tool. These are the minimum cure times and it is advised to check whether the time is sufficient for all pressed parts. In particular for generating an adequate DMA-T_g.

ANGELONI GROUP

Via Abbate Tommaso, 72/A - 30020 Quarto d'Altino (VE) Italy
T. +39 0422 780580 - F. +39 0422 782782
E. info@angelonigroup.com

angelonigroup.com

LAMINATE MECHANICAL PROPERTIES

The table below shows typical average mechanical properties that can be achieved with cured IMP509 laminates. All values are normalised to target resin content and fibre volume fraction, except In-Plane Shear and ILSS. Autoclave cured 2 hours @ 140 °C.

Property	Units	GG204P 204 gsm Plain Weave 3k TR30S
Nominal Resin Content	(%)	43
Nominal Fibre Volume	(%)	4,73
Nominal Cured Ply Thickness	mm	0,241
Nominal laminate density	g/cm ³	1.48
Interlaminar Shear Strength (ILSS)	MPa	55,9
0° Warp Tensile Strength	MPa	618
0° Warp Tensile Modulus	GPa	55,1
0° Warp Tensile Poisson's Ratio		0.05
90° Weft Tensile Strength	MPa	608
90° Weft Tensile Modulus	GPa	52,4
0° Warp Compression Strength	MPa	444
0° Warp Compression Modulus	GPa	52,3
90° Weft Compression Strength	MPa	343
90° Weft Compression Modulus	GPa	48,7
0° Warp Flexural Strength	MPa	709
0° Warp Flexural Modulus	GPa	50,5
Ultimate In-Plane Shear Strength	MPa	102,9
IPSS @ 5% shear strain	MPa	4723
In-Plane Shear Modulus	GPa	3,25

Test Methods:

 ILSS: ASTM D2344
 Flexural: ASTM D790

 Tensile: ASTM D3039
 In-Plane Shear: ASTM D3518

Compression: ASTM D6641

STORAGE

Prepreg materials should be stored as received @ - 18 °C. Shelf-life @ -18 °C: 12 months Out-life @ 23 °C: 4 weeks
 Allow the material to fully thaw before removing it from its polyethylene packaging.

MATERIAL HANDLING - SAFETY

Operators should wear protective gloves to avoid direct contact with the skin and to prevent product contamination.
 Please consult MSDS.

NOTE

The technical specifications, data and measures provided are accurate to the best of Angeloni Group knowledge. Angeloni Group give no warranty, express or implied, as to the completeness, accuracy, reliability or fitness for any specific or particular use, field of use, application, performance, result or purpose. Above mentioned technical information are based on our actual knowhow and accurate, reproducible laboratories tests but due to the product complexity and its further processing, is not possible guarantee these.

ANGELONI GROUP

 Via Abbate Tommaso, 72/A - 30020 Quarto d'Altino (VE) Italy
 T. +39 0422 780580 - F. +39 0422 782782
 E. info@angelonigroup.com

angelonigroup.com

PŘÍLOHA P III: MATERIÁLOVÝ LIST LEPIDLA



IMPREGNATEX
TECHNICAL
DATASHEET IMP AS-01

Rev6 -14/11/2023

IMPAS-01

DESCRIPTION

IMP AS-01 is a low-density, one-component structural epoxy syntactic adhesive black paste developed for bonding honeycomb core material within sandwich panels.

IMP AS-01 is intended for use in application where the maximum working temperature does not exceed 90 °C. It can be used, however, at temperatures up to 120 °C if it is not required to sustain significant working loads.

BENEFITS AND FEATURES

- One-component expanding adhesive paste.
- Voids and edges filling.
- Excellent adhesion to honeycomb.
- 120 – 135 °C curing range.

RESIN PROPERTIES		
TYPE		TOUGHNENED
Uncured resin's density	g/cm ³	1.05 to 1.15
Nominal expansion @ 120 °C	%	40
Viscosity @ 50 °C	Pa.s	115 to 120
Shelf Life (-18 °C)	months	12

PROCESSING GUIDELINES

IMP AS-01 should be allowed to warm to room temperature after removing from sub-ambient storage room. Prior to applying IMP AS-01, surfaces to be bonded should be thoroughly cleaned and degreased and free from any loose material/dust.

IMP AS-01 may be applied by spreading the product with a spatula to one side of each joint only.

After applying the adhesive, the sandwich assembly should be completed as fast as possible.

RECOMMENDED CURE SCHEDULE

- 90 min @ 120 °C, pressure of 2 to 4 bar;
- Do not exceed 5 °C/min temperature ramp.

THERMAL STABILITY

Once fully cured, IMP AS-01 shows:

- a glass transition (tan δ , ASTM D7028) above 120 °C;
- a thermal degradation onset in inert atmosphere above 360 °C (ASTM E1131).

ANGELONI GROUP

Via Abbate Tommaso, 72/A - 30020 Quarto d'Altino (VE) Italy
T. +39 0422 780580 - F. +39 0422 782782
E. info@angelonigroup.com

angelonigroup.com



MECHANICAL PROPERTIES – DOUBLE LAP SHEAR TEST (ASTM D3528)

Test temperature (°C)	Double-lap Shear Strength (MPa)
25	11.7
80	7.9

The adhesion substrate for the test was aluminium (series 1050A), properly degreased, grinded and thoroughly cleaned before the adhesive application to promote an optimal joint.

MECHANICAL PROPERTIES – ADHESION BY CLIMBING DRUM PEEL TEST (ASTM D1781)

The Climbing Drum Peel test based on ASTM D1781 specimens have been used to assess the adhesive to honeycomb/core bonding performance:

Aluminium honeycomb cores:

- IMPAS-01 was applied to 1 mm cured composite (GG450T-IMP503Z-HT-40) laminate (skin).
- The core was carefully placed on the film adhesive surface.
- IMPAS-01 was applied to the core, and 1 mm cured composite (GG450T-IMP503Z-HT-40) laminate (skin) to complete the sandwich construction.
- The assembly was autoclave cured, 90 min @ 120 °C, pressure of 2 bar.
- 76 mm wide peel specimens were cut from the laminate assembly.
- A minimum of 6 specimens were tested to measure the adhesive peel resistance to each core material.

Substrate	Average Peel Torque (Nm/m)	Average Peel Load (N/76 mm)
Aluminium honeycomb	80.0	447.0

STORAGE

IMP AS-01 should be stored as received @ - 18 °C.

Shelf-life @ -18 °C: 12 months

Allow the material to fully thaw before opening the container.

MATERIAL HANDLING - SAFETY

Operators should wear protective gloves to avoid direct contact with the skin and to prevent product contamination. Please consult MSDS.

NOTE

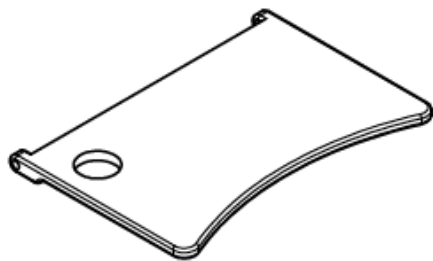
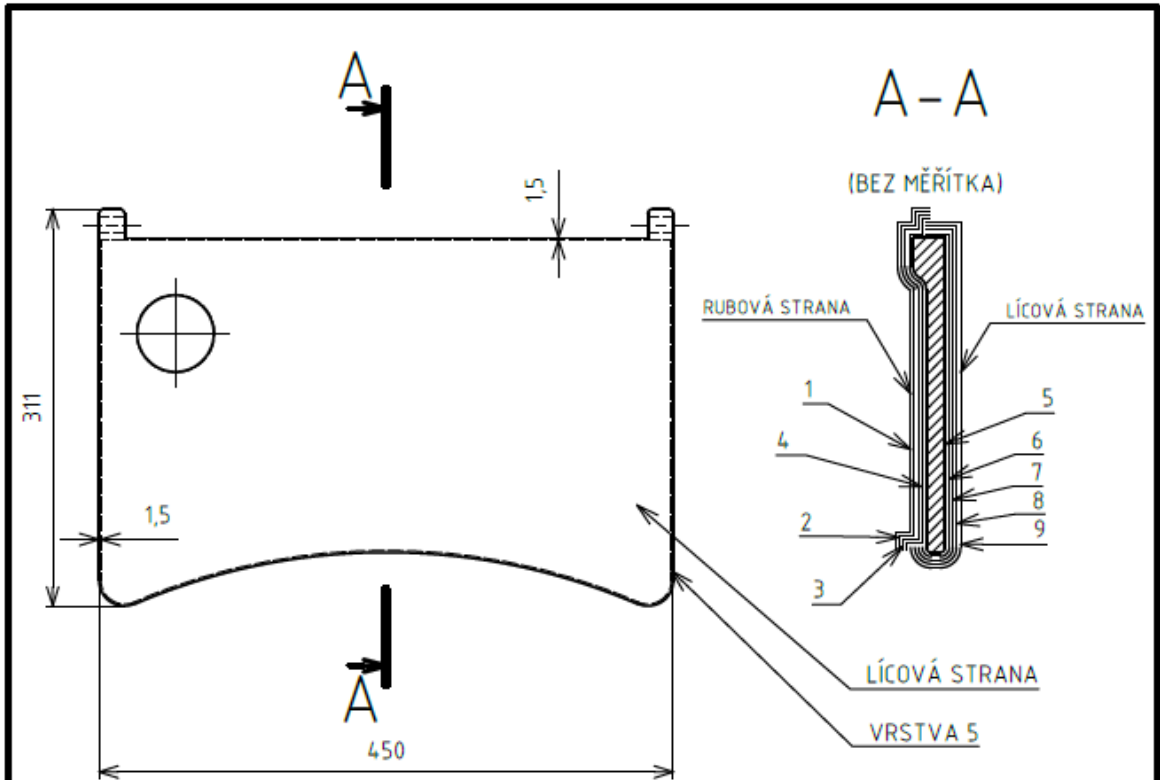
The technical specifications, data and measures provided are accurate to the best of Angeloni Group knowledge. Angeloni Group gives no warranty, express or implies, as to the completeness, accuracy, reliability or fitness for any specific or particular use, field of use, application, performance, result or purpose. The above mentioned technical information are based on our present know-how and accurate, reproducible laboratories tests but due to the product complexity and its further processing, is not possible guarantee these.

ANGELONI GROUP

Via Abbate Tommaso, 72/A - 30020 Quarto d'Altino (VE) Italy
T. +39 0422 780580 - F. +39 0422 782782
E. info@angelonigroup.com

angelonigroup.com

PŘÍLOHA P IV: VÝKRESOVÁ DOKUMENTACE



VZHLEDOVÝ DÍLEC

LAKOVÁNÍ DÍLCE

NEKÓTOVANÉ ROZMĚRY PODLE 3D MODELU

TABULKA SKLADBY
(ČÍSLOVANO OD LÍCOVÉ STRANY)

VRSTVA	MATERIÁL	ORIENTACE
1	PREPREG CC-95P ER 68	0/90°
2	PREPREG CC-95P ER 68	45°
3	PREPREG CC-95P ER 68	0/90°
4	PREPREG CC-95P ER 68	45°
5	BALSA, h=6mm	-
6	PREPREG CC-95P ER 68	45°
7	PREPREG CC-95P ER 68	0/90°
8	PREPREG CC-95P ER 68	45°
9	PREPREG CC-95P ER 68	0/90°

	Měřítko	Přesnost ISO 2768-mH
	1:5	Promítání
		Sestava
Materiál	Hmotnost	Chráněno podle ISO 16016
Polotovár	Název	SKLÁPĚCÍ STŮL
Skupina		
Kreslil	TOMEČEK MAREK	Číslo výkresu
Datum	17.4.2024	List 1/1