

Vliv počtu vnějších vrstev na mechanické vlastnosti sendvičových kompozitních materiálů

Bc. David Ondrušek

Diplomová práce
2018



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická
Ústav výrobního inženýrství
akademický rok: 2017/2018

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. David Ondrušek**
Osobní číslo: **T16268**
Studijní program: **N3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Výrobní inženýrství**
Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Vliv počtu vnějších vrstev na mechanické vlastnosti sendvičových kompozitních materiálů**

Zásady pro vypracování:

1. Literární rešerše v oblasti sendvičových kompozitních materiálů.
2. Výroba a popis způsobu výroby polymerních a 3D jader (voštin).
3. Popis zpracovatelských technologií vhodných pro výrobu sendvičových materiálů.
4. Testování sendvičových kompozitních materiálů (statické a dynamické).
5. Návrh materiálového složení sendvičových kompozitních materiálů.
6. Experimentální výroba sendvičových kompozitních materiálů dle zvolené technologie.
7. Testování mechanických vlastností dle zvolených.
8. Vyhodnocení experimentálních výsledků s ohledem na počet nosných vrstev sendvičové konstrukce.

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

Dle doporučení vedoucího práce.

Vedoucí diplomové práce:

doc. Ing. Soňa Rusnáková, Ph.D.

Ústav výrobního inženýrství

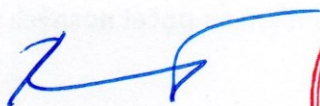
Datum zadání diplomové práce:

2. ledna 2018

Termín odevzdání diplomové práce:

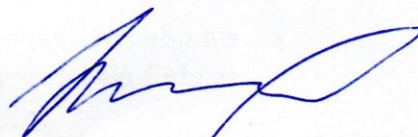
18. května 2018

Ve Zlíně dne 28. února 2018



doc. Ing. František Buňka, Ph.D.

děkan



prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D.

ředitel ústavu

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby ¹⁾;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3 ²⁾;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně 17.5.2018

.....


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

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

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

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

²⁾ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 35 odst. 3:

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

³⁾ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 60 Školní dílo:

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

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

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

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá vlivem počtu vnějších vrstev na mechanické vlastnosti sendvičových prvků. Diplomová práce je rozdělena na část teoretickou a část praktickou. Teoretická část popisuje kompozitní sendvičové systémy, včetně jejich výroby a možnosti testování mechanických vlastností. V praktické části je popsáno provedení experimentu, jehož cílem bylo získání informací o vlivu počtu vnějších vrstev na vybrané mechanické vlastnosti. Výstupem práce je zhodnocení získaných výsledků po provedení mechanických zkoušek.

Klíčová slova:

kompozitní sendvičové systémy, mechanické zkoušení sendvičových konstrukcí, vliv počtu vnějších vrstev

ABSTRACT

The thesis deals with the influence of the number of outer layers on the mechanical properties of sandwich elements. The thesis is divided into theoretical part and practical part. The theoretical part describes composite sandwich systems, including their production and the ability to test their mechanical properties. The practical part describes the conduction of an experiment, the aim of which was to obtain information about the influence of the number of outer layers on selected mechanical properties. The output of the thesis is the evaluation of the results obtained after conducting the mechanical tests.

Keywords:

composite sandwich systems, mechanical testing of sandwich structures, influence of the number of outer layers

Touto cestou bych rád poděkoval vedoucí mé práce paní doc. Ing. Soně Rusnákové, Ph.D. za ochotu, odborné vedení a cenné rady během zpracování jak teoretické, tak praktické části diplomové práce.

Dále patří poděkování panu Ing. Jiřímu Šálkovi za pomoc během řezání zkušebních vzorků a v neposlední řadě panu Ing. Milanu Žaludkovi, Ph.D. za pomoc při testování mechanických vlastností zkušebních vzorků.

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

OBSAH

ÚVOD	10
I TEORETICKÁ ČÁST	11
1 KOMPOZITNÍ SENDVIČOVÉ SYSTÉMY	12
1.1 JÁDRA SENDVIČOVÝCH STRUKTUR	13
1.1.1 Polymerní pěnové materiály.....	13
1.1.2 Kovové pěny.....	15
1.1.3 Voštiny	16
1.1.4 Balsa	17
1.1.5 Anorganické materiály	18
1.2 VNĚJŠÍ VRSTVY SENDVIČOVÝCH STRUKTUR	18
1.2.1 Kompozitní systém matrice + vyztužující materiál	19
1.2.1.1 Výztužný systém	19
1.2.1.2 Matrice	22
1.2.2 Prepregy.....	24
2 VÝROBA SENDVIČOVÝCH KONSTRUKCÍ	25
2.1 VÝROBA SENDVIČŮ LEPENÍM A ZPĚŇOVÁNÍM	25
2.2 VÝROBNÍ TECHNOLOGIE SENDVIČŮ S KOMPOZITNÍ KRYCÍ VRSTVOU	26
2.2.1 Ruční kladení	27
2.2.2 Lisování prepregů.....	27
2.2.3 RTM.....	28
2.2.4 Vakuová infuze	29
3 TESTOVÁNÍ SENDVIČOVÝCH KONSTRUKCÍ	31
3.1 TLAKOVÁ ZKOUŠKA.....	31
3.2 ZKOUŠKA OHYBEM	32
3.2.1 Tříbodový ohyb	33
3.2.2 Čtyřbodový ohyb	34
3.3 ZKOUŠKA ODLUPOVÁNÍ	35
3.3.1 Odlup pomocí navíjecího bubnu	35
3.3.2 Odlup za pomoci tahu	36
3.3.3 Odlup za pomoci tlaku vzduchu.....	37
II PRAKTICKÁ ČÁST	38
4 CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE	39
5 VLIV POČTU VNĚJŠÍCH VRSTEV NA VLASTNOSTI SENDVIČOVÝCH MATERIÁLŮ	40
6 VÝROBA ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ	42
6.1 URČENÍ ROZMĚRŮ ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ.....	42
6.2 POPIS POUŽITÝCH MATERIÁLŮ PRO VÝROBU	43
6.2.1 Krycí vrstvy z prepregu	43
6.2.2 Voštinové jádro	44

6.2.3	Pěnové jádro.....	44
6.3	LISOVÁNÍ SENDVIČOVÝCH PRVKŮ.....	45
6.4	ŘEZÁNÍ ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ	46
7	ZKOUŠKA TŘÍBODOVÝM OHYBEM.....	48
7.1	NAMĚŘENÁ DATA.....	49
7.2	VYHODNOCENÍ ZKOUŠKY TŘÍBODOVÝM OHYBEM	55
8	ZKOUŠKA TLAKEM	60
8.1	NAMĚŘENÁ DATA.....	60
8.2	VYHODNOCENÍ ZKOUŠKY TLAKEM	67
	ZÁVĚR.....	72
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	74
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	78
	SEZNAM OBRÁZKŮ	80
	SEZNAM TABULEK.....	82
	SEZNAM PŘÍLOH.....	83

ÚVOD

Aplikace sendvičových prvků stále narůstá díky jejich vlastnostem, především se vyznačují vysokou pevností při zachování nízké hmotnosti materiálu. Pro konkrétní aplikace je důležitá volba použitých materiálů a také jejich rozměrové parametry. Tato práce se zabývá vlivem počtu krycích vrstev sendvičových prvků z prepregu složeného ze skelné tkaniny a epoxidové pryskyřice. Jako jádro sendvičového prvku byly zvoleny dvě nejvíce používané varianty, a to voština a jádro pěnové.

Diplomová práce je rozdělena do dvou částí, na teoretickou a praktickou část. Jednotlivé kapitoly teoretické části popisují sendvičové konstrukce, jejich složení a druhy nejběžněji používaných jádrových materiálů a materiálů krycích vrstev. Další kapitola se zabývá metodami a technologiemi způsobu výroby sendvičových prvků. V poslední části jsou zmíněny možnosti testování mechanických vlastností a vznik porušení při určitém způsobu zatěžování.

Na základě poznatků z teoretické části bylo možné přistoupit k části praktické, jejímž cílem bylo provedení experimentu. Před samotným měřením byla nutná výroba sendvičových prvků a následné řezání na požadované rozměry zkušebních vzorků pro jednotlivé mechanické zkoušky. Pro posouzení výsledků byla zvolena zkouška tříbodovým ohybem a zkouška tlakem. Po provedení mechanických zkoušek bylo možné ze zaznamenaných dat vyhodnotit vliv počtu vnějších vrstev sendvičových konstrukcí. Veškerá výroba i testování zkušebních vzorků byla provedena v laboratořích fakulty.

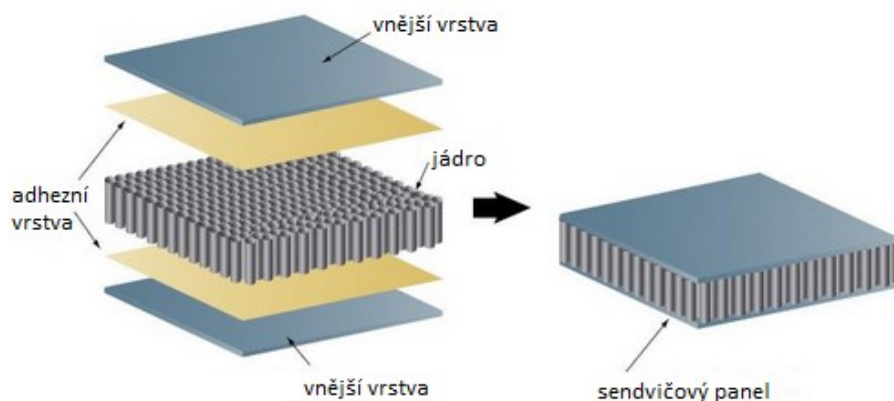
I. TEORETICKÁ ČÁST

1 KOMPOZITNÍ SENDVIČOVÉ SYSTÉMY

Kompozitní materiál neboli kompozit vyjadřuje složeninu dvou a více fází, které mají odlišné fyzikální vlastnosti. Jejich spojením vznikne materiál se zcela odlišnými vlastnostmi, než mají jednotlivé přítomné fáze. Každá z těchto fází plní svou funkci. Krycí vrstva je nosnou částí kompozitního materiálu a za použití vrstvy pojiva tvoří s jádrem celek nazývaný jako sendvičový kompozitní systém. [1]

Takové materiály využívá lidstvo již po staletí. První zmínkou o kombinování různých vlastností materiálů pochází již z dob, kdy si lidstvo stavilo svá první obydlí, kdy pro výrobu cihel kombinovali hlínu a slámu. Později se jednotlivé kompozitní systémy zdokonalovaly a jejich uplatnění se čím dál více rozšiřovalo. Největší rozvoj byl v období druhé světové války, kdy byly kompozitní materiály využívány pro vojenská použití. Následně se stal průmyslovým materiálem především pro letecké, automobilové a elektronické odvětví až do dnešní podoby, kdy jsou tyto materiály součástí každodenního života. [2][3]

Sendvičové konstrukce jsou vytvářeny vrstvením odlišných materiálů, které se vyznačují vysokou pevností v ohybu při zachování nízké hmotnosti materiálu. Správnou funkci sendvičové konstrukce zajišťuje tuhá povrchová vrstva přenášející tahové a tlakové namáhání a jádro o relativně nízké hmotnosti, které přenáší smykové síly mezi povrchovými vrstvami. Mezi hlavní výhody těchto konstrukcí patří především ohybová tuhost a pevnost. Díky těmto vlastnostem dosahuje širokého uplatnění v mnoha odvětvích, kde je vysoká pevnost materiálu zároveň podmíněna nízkou hmotností. Příkladem využití sendvičového systému jsou především letadla, podlahy v dopravních prostředcích (tramvaje) a v neposlední řadě lékařský průmysl. [4]



Obr. 1 Sendvičový systém. [23]

1.1 Jádra sendvičových struktur

Jádro sendvičové konstrukce kompozitního systému mohou tvořit různé materiály v různých podobách. Při samostatném použití je výhodou pouze jejich nízká hmotnost, ale pokud jsou součástí sendvičového systému, vytvářejí strukturu, která se mimo nízkou hmotnost vyznačuje lepší odolností vůči mechanickému namáhání. [5][6]

S jejich použitím se začalo ve 40. letech pro konstrukci letadel, aby byla snížena hmotnost a tím zvýšeno užitečné zatížení, či doletová vzdálenost. [5][6]

Při výběru jádra je nutné zohlednit mnoho faktorů, které ovlivní celkovou funkci a životnost systému. Proto se před aplikací prověřují mechanické vlastnosti pro krátkodobé i dlouhodobé zatížení a také chování při různých teplotách. [5][6]

Materiály využívané k přípravě jader sendvičových systémů můžeme rozdělit do několika skupin:

- pěnové materiály,
- voštiny,
- balsa,
- anorganické materiály. [5][6]

Jednotlivé materiály jsou podrobněji popsány v následujících podkapitolách.

1.1.1 Polymerní pěnové materiály

Používání polymerních pěnových jader stále vzrůstá. Důvodem jsou především vlastnosti jako dobrá tepelná i zvuková izolace a možnost měnit strukturu jádra určitou změnou při výrobním procesu. Lze tak vyrobit z jednoho druhu materiálu tuhé, nebo houževnaté jádro. [5][7][8]

Existuje řada metod k zpracování polymerů za účelem získání lehčené formy, jejichž výsledné vlastnosti jsou často již dány typem výrobního stroje. Samotný způsob výroby obecně spočívá na principu přimíchání nadouvadla do taveniny polymeru, kde tato složka způsobí expanzi a vytvoří tak lehčenou strukturu použitého polymeru. Konečná struktura polymerní pěny je zafixována po ochlazení na pokojovou teplotu, nebo chemickou reakcí (zesíťováním). Nejběžnější tloušťka pěnového jádra kompozitního materiálu bývá v rozmezí od 5 mm do 50 mm. [5][7][8][12]

Mezi využívané materiály pro výrobu polymerních pěnových jader patří:

- polyuretan (PUR),
- expandovaný nebo extrudovaný polystyren (EPS a XPS),
- polyetylentereftalát (PET),
- polyvinylchlorid (PVC),
- styren akrylonitril (SAN). [5] [7] [8] [12]



Obr. 2 Pěnové jádrové materiály. [10]

Polyuretan (PUR)

Polyuretanové (PUR) pěny mají velmi dobré tepelně izolační vlastnosti, oproti tomu jsou mechanické vlastnosti nejhorší v porovnání s ostatními pěnovými materiály. V oblasti mezi pojivem a vrchní vrstvou sendvičového systému, měl jeho povrch časem tendenci degradovat, což způsobovalo delaminaci a tím pádem poškození celé konstrukce. [5][7][12]

Polystyren (EPS a XPS)

Další pěnový materiál používaný pro sendvičové konstrukce je polystyren (PS), mezi jehož vlastnosti patří především dobré tepelně izolační vlastnosti a nízká cena. Pro tyto účely se využívá ve dvou modifikacích, expandovaný polystyren (EPS) a extrudovaný po-

lystyren (XPS). Pro spojení s vnější vrstvou by se nemělo používat lepidlo s rozpouštědly kvůli nízké odolnosti polystyrenu vůči nim. [5][7]

Polyetylentereftalát (PET)

Tento druh pěny se vyznačuje výbornou tepelnou stabilitou, ale mechanické vlastnosti v porovnání s pěny z PVC jsou horší. K získání srovnatelných mechanických vlastností s PVC musí mít polyetylentereftalátová pěna vyšší hustotu. [10]

Polyvinylchlorid (PVC)

PVC pěny mají dobré mechanické vlastnosti a dobře odpuzují vodu. Polyvinylchloridová pěna se pro sendvičové konstrukce využívá ve dvou modifikacích, a to termoplastická nebo zesíťovaná PVC pěna. Lineární pěny jsou tuhé, ale za zvýšené teploty měknou. Pěny ze zesíťovaného PVC mají nízkou hmotnost a zároveň dobré mechanické vlastnosti. Další jejich předností je tepelně a zvukově izolační vlastnost. Taková jádra se využívají pro sendvičové konstrukce v dopravních prostředcích (autobusy, vlaky) jako různé kryty. [12]

Styren akrylonitril SAN

Pěnové jádra z materiálu SAN mají podobné mechanické vlastnosti jako pěny z PVC, navíc jsou houževnatější a dosahují většího prodloužení. Proto jsou schopnější lépe absorbovat nárazy, které jinak mohou poškodit běžné PVC pěny. Proto SAN jádra díky jejich vlastnostem nahrazují v mnoha aplikacích PVC pěny. [12]

1.1.2 Kovové pěny

Dalším typem materiálu, který lze zařadit mezi pěnové materiály, je pěna z kovu. Nejběžněji se využívá hliník a jeho slitiny, kvůli poměrně vysoké tuhosti, houževnatosti a vysoké teplotě tání, která je 660°C. Dobře tlumí rázy a výhodou je i nehořlavost a korozní odolnost. Tato pěna se vyrábí v uzavřených formách, kde jsou určitou metodou vytvářeny póry v tavenině hliníku, či jeho slitině. Tyto póry vznikají důsledkem rozkladu zpěňovačů, či přiváděním plynu do taveniny z externího zdroje. Využití kovové pěny jako jádra pro sendvičový systém je především pro prostředí s vysokou vlhkostí, teplotou, prašností, proudících plynů, vibracemi a hlukem. [13]

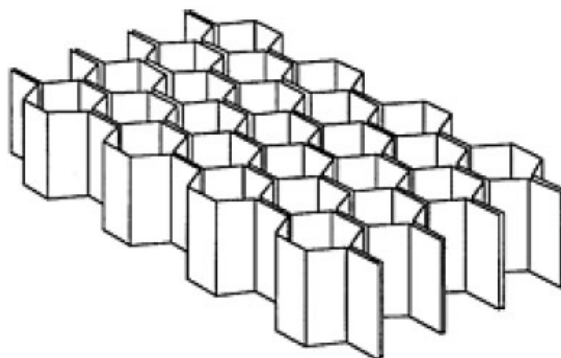
1.1.3 Voštiny

Voština (v anglickém jazyce jako Honeycomb) je druh jádrové struktury, který je vytvořen tvarováním tenké vrstvy určitého materiálu, jako jsou polymery, kovy, keramika nebo lepenka. Ve většině případů má výsledná buňka tvar šestiúhelníku, protože se jedná o jednu z nejlepších forem poskytnutí strukturální podpory. Dle požadavků různých konstrukcí může být navržen ale i jiný tvar průřezu jádra jako je čtverec, kruh a jiné tvary (viz následující obr.). Rozměry jednotlivých buněk dosahují rozměrů od 1,6 do 35 mm, nejběžnější pak jsou voštiny s velikostí buňky 3, 5, 6, 9, 13 a 25 mm. [5][6]

Voštiny se vyrábí různými technologiemi, z nichž nejběžnější jsou následující čtyři:

- lepení vrstev polotovarů a získání struktury roztažením buněk,
- vlnění polotovarů a lepení,
- svařování polotovarů,
- vytlačování voštin. [6]

Z těchto metod je nejběžnější proces lepení vrstev a následné roztažení buněk voštinové struktury. Další metoda výroby je obdobná, ale polotovar se nejprve tvaruje na požadovaný rozměr buněk a až poté se lepí jednotlivé vrstvy k sobě. Tvarování před lepením prodlužuje výrobní proces, ale umožňuje výrobu menších buněk struktury voštin. Lepení jednotlivých vrstev je prováděno za pomoci epoxidových lepidel, které jsou tepelně vytvrzované. Svařování polotovarů je nákladnější metoda výroby a využívá se především u ocelových voštin s požadavkem na odolnost vůči vysokým teplotám. Čtvrtou nejběžnější technologií pro výrobu voštin je vytlačování. Využívá se pro vytlačování voštinové struktury z keramických nebo polymerních materiálů. [6]



Obr. 3 Voština. [6]

Při výrobě voštin se používají různé materiály, které jsou voleny dle požadavků na výsledný materiál. Řadí se mezi ně především nároky na pevnost, tepelná a elektrická vodivost a v neposlední řadě cena.

Hliník – vyznačuje se dobrým poměrem hmotnosti ku pevnosti. Tloušťka stěn jednotlivých buněk dosahuje 0.002 až 0.15 mm.

Aramidová vlákna – jsou dobře tvarovatelná a mají dobré tepelně izolační vlastnosti. Jednou z hlavních výhod je nehořlavost.

Uhlíková vlákna – jejich použití je pouze pro speciální aplikace díky jeho vysoké ceně. Je to dáno jeho výbornými vlastnostmi, jako je dobrá rozměrová a teplotní stabilita, tuhost a také velmi nízký koeficient tepelné roztažnosti.

Keramika – obdobně jako uhlíková vlákna má keramika vynikající vlastnosti jako je odolnost vůči vysokým teplotám a dobré izolační vlastnosti. Metoda výroby společně s vlastnostmi materiálu umožňují výrobu velmi malých velikostí buněk voštin.

Lepenkové voštiny jsou využívány například jako výplň levných interiérových dveří v domácnostech. Jelikož voština z lepenky má špatné tepelné vlastnosti a nízkou odolnost vůči ohni, je v určité fázi výroby máčena nebo nastříkána roztokem křemičitanu sodného, který hořlavost potlačí. [5][6]

1.1.4 Balsa

Balsa je dřevina používaná v mnoha aplikacích. Pro jádrové struktury sendvičových konstrukcí je její předností zachování tvaru i při zvýšených teplotách, oproti polymerním pěním. [10][12]



Obr. 4 Balsový jádrový materiál. [10]

Jelikož se jedná o materiál s určitě orientovanou strukturou, je třeba tuto orientaci zohlednit i při aplikaci pro sendvičové struktury. Problém balsy, stejně jako všech dřevin, je možná absorpce vlhkosti, která by mohla vést ke vzniku hniloby jádra a tím i ke ztrátě funkčnosti sendvičového systému. [10][12]

1.1.5 Anorganické materiály

Jádro sendvičového systému též může tvořit určitá modifikace anorganického materiálu. Nejběžnější surovinou jsou horniny, sklo nebo struska (odpad z vysoké pece ocelářského průmyslu). Tyto materiály jsou přepracovávány do formy minerálních vln.

Vlákna jsou získávána z taveniny minerálu například pomocí odstředivé síly, kdy z rotující hřídele v tavenině odpadávají kapky taveniny, které po ochlazení mají tvar tenkého vlákna. Další technologie využívaná pro výrobu skelných vláken spočívá v protlačování taveniny vysokou rychlostí přes vytlačovací hlavu s mnoha otvory. Průměr vláken se nejčastěji pohybuje od 5 do 13 μm . [5][9]

Vlákna se poté lisují do desek požadovaných rozměrů za přidání pojiv, z nichž nejběžnější je fenolová pryskyřice. Obsah pojiva se mění dle požadovaných vlastností od 1 do 10 % hmotnosti vlny. [9]

1.2 Vnější vrstvy sendvičových struktur

Vnější vrstva sendvičové struktury je definována jako vrstva nosná a obecné požadavky jsou odolnost vůči poškození rázem, vysoká ohybová tuhost, velká pevnost v tahu (tlaku) a také má za úkol chránit celý sendvičový systém proti vnějším vlivům, kterým je při dané aplikaci vystaven. Jedná se především o ochranu před zvýšenými teplotami a korozi. Dle aplikace se volí vhodné povrchové materiály. Lze je rozdělit do dvou skupin na kovové a nekovové. [5]

Mezi kovové vnější vrstvy se řadí plechy z oceli, hliníku, mědi a slitin dalších kovů. Polotovar je nejčastěji ve formě tenkých plechů vyrobených válcováním. Mezi jejich přednosti patří vysoká tuhost a pevnost, odolnost proti nárazu a také možnost výběru ze široké škály materiálů. Naopak nevýhodou je poměrně vysoká hmotnost a spojení s jádrem sendvičového systému, kdy je možné použít pouze vybraná lepidla. [5][14]

Pro výrobu sendvičových systémů se jako krycí vrstvy hojně využívají nekovové materiály, které jsou ve většině případů tvořeny spojením dvou a více fází, tudíž jde o kompo-

zitiní krycí vrstvy. Oproti kovovým krycím vrstvám se u kompozitu často požaduje vyztužení v určitém směru (směru namáhání), takže lze tak vyrobit materiál s rozdílnými vlastnostmi v různých směrech. V takovém případě hovoříme o materiálu jako o anizotropním. [14]

1.2.1 Kompozitní systém matrice + vyztužující materiál

Při vytváření kompozitu z vyztužujícího systému a matrice se využívá široká škála druhů materiálů a také jejich různé podoby. Požadavkem je dosažení vysoké měrné pevnosti výztužného systému uloženého v přizpůsobivé matrici. K takovému spojení těchto dvou komponent dochází nejčastěji prosycováním výztužného systému, který je nejčastěji ve formě rohože či tkaniny, určitým druhem matrice. [14]

1.2.1.1 Výztužný systém

Výztužný systém rozdělujeme jednak podle materiálu, nebo podle orientace, či formy uspořádání jednotlivých vláken. V případě krycích vrstev sendvičového systému se výztuž využívá ve formě rohoží, které mají neuspořádanou strukturu vláken, ale především ve formě tkanin. Tkaniny vznikají splétáním pramenců dle určitých vzorů, a tak vznikají různé typy křížení, jinak nazývané jako vazby. Nejvýznamnější druhy vazeb jsou plátňová, keprová a atlasová. Plátňová vazba je základní uspořádání tkaniny s dobrou rozměrovou stálostí a malým otřepem při řezání. Keprová vazba dosahuje vyšší pevnost a tuhost díky menšímu zvlnění vláken, proto jsou vhodné pro tvarové prvky. Pro prostorově nejsložitější prvky slouží tkaniny s vazbou atlasovou neboli saténovou, které mimo přizpůsobení složitým tvarům, umožňují vytvořit hladký povrch. [12] [14]

Při výrobě tkanin s odlišnými vazbami se v některých případech uplatňuje kombinace různých materiálů, nebo rozměrů vláken. Příkladem odlišných rozměrů vláken v podélném a příčném směru je jednosměrná tkanina. Tenká příčná vlákna slouží pouze jako fixace vláken přenášející namáhání. Tyto tkaniny se využívají například při výrobě lyží. [14][15]

Podobným typem je tkanina směsná, která mimo kombinaci odlišných rozměrů v podélném a příčném směru, kombinuje také materiály. U výše zmíněné jednosměrné tkaniny tak lze využít ve směru namáhání materiál s vysokou pevností a tuhostí (například

uhlíková vlákna), ale v příčném směru postačí levnější materiál o menším průměru vlákna (např. skelná vlákna), protože slouží pouze k fixaci podélných vláken. [14][15]

Hybridní tkanina kombinuje alespoň dva druhy materiálů. Je to z důvodu získání vlastností více než jednoho typu vlákna. Oproti směsné tkanině se odlišné materiály nevykytují pouze v určitém směru, ale střídají se vlákna každého materiálu v každém směru. Kombinují se tak materiály jako je aramidové, uhlíkové a skelné vlákno, dle požadavků na výslednou tkaninu. [12][14]



Obr. 5 Druhy vazeb tkanin. [15]

K výrobě výztužných systémů se využívá vláken uhlíkových, aramidových, přírodních, hlavně vláken skelných, jejichž zastoupení má největší podíl při výrobě výztuží.

Skelná vlákna – jsou hojně využívána díky poměru cena / užitné vlastnosti, jako nízká hmotnost, odolnost proti chemikáliím a relativně vysoká pevnost. Vyrábí se tavením sklářského kamene (směs křemenného písku, vápence, potaše a collemanitu), který je roz-taven při teplotě 1400 °C. Tavenina vytéká z trysek o průměru 2 mm a pomocí rychle rotujícího navíjecího zařízení se dosahuje požadovaného průměru. V průběhu tažení se na vlákna nanáší lubrikace, jejíž úkolem je chránit povrch elementárních vláken a přizpůsobit je k dalšímu zpracování. [14] [15]

Vlákna rozlišujeme dle jejich vlastností:

- C vlákna – odolné vůči kyselinám,
- E vlákna – elektrický izolant s vysokou prostupností záření (nejrozšířenější typ),
- S vlákna – zvýšená pevnost vláken,
- AR vlákna – odolné vůči zásadám. [12] [14]

Aramidová vlákna – jedná se o vyztužující vlákna s nejnižší hmotností na bázi aromatických polyamidů dosahující vysoké pevnosti a tuhosti. Mez pevnosti v tlaku je značně menší než v tahu, proto je nutné při navrhování výrobků zohlednit citlivost na zatížení tlakem v podélném směru a nevolit tento materiál pro aplikace namáhané na ohyb či tlak. Jelikož je aramidové vlákno hydrofilní, musí se před zpracováním sušit, aby bylo zaručeno spojení mezi vláknem a matricí. [12] [14] [15]

Uhlíková vlákna – vyznačují se velmi vysokou pevností a tuhostí, a naopak nízkou tažností. Další vlastností je jejich velmi dobrá elektrická vodivost a odolnost vůči korozi. Díky snášenlivosti s tělesnými tkáněmi jsou využívány i v kloubních náhradách. Při výrobě se využívá dvou postupů, kdy v prvním případě jde o využití polyakrylonitrilu (PAN), v případě druhém jde o výrobu ze surovin bohatých na uhlík. [6] [14]

Přírodní vlákna – mezi přírodní vyztužné systémy patří pouze rostlinná vlákna obsahující celulózu. Patří mezi ně len, konopí, bavlna, juta, sisal a ramie. Výhodou je nízká hustota a snadná likvidace (spalováním) po uplynutí životnosti aplikace. Oproti tomu je problém s působící vlhkostí, omezená délka vláken a nízká odolnost vůči zvýšeným teplotám při zpracování (do 200 °C). [14]

Tabulka 1 Porovnání vlastností vybraných vláken. [14]

Materiál	Hustota ρ [g/cm³]	Mez pevnosti v tahu [MPa]	E – modul [MPa]	Poměrné pro- dloužení při přetržení [%]
Sklo	2,53	4 400	86 000	< 4,6
E sklo	2,6	3 400	73 000	< 4,8
Uhlík	1,6 – 2	1 750 – 4 700	240 000 – 500 000	0,35 – 1,6
Aramid	1,45	3 400 – 3 800	80 000 – 186 000	2 – 4
Konopí	1,45	600	70 000	1,6
Sisal	1,45	600	20 000	2
Len	1,48	750	30 000	2
Juta	1,4	550	55 000	2

1.2.1.2 Matrice

Matrice je materiál, který prosycuje výztužný systém tak, že výsledný výrobek je tvarově stálý. Dalším úkolem matrice je přenos zátěže na vlákna a také jejich ochrana před vlivy okolního prostředí. [14]

Důležitým faktorem pro získání kvalitního kompozitního systému je zajištění adheze mezi maticí vláknem. K dosažení této podmínky je nutné zvolit druh matrice s vhodnou viskozitou a povrchovým napětím. V opačném případě by nemuselo dojít k úplnému prosycení, což by vedlo ke špatné funkci kompozitního systému. [14]

K prosycení výztuže se nejčastěji využívá polymerních matic. Ty se dělí na termose-ty (reaktoplasty) a termoplasty. Termose-ty jsou charakteristické tím, že vytvrzením vznikne prostorová polymerní síť, takže matrice zůstane v tuhém stavu i za zvýšených teplot. K vytvrzení dojde přimícháním tvrdidla, mezi které patří iniciátory (iniciují polymeraci pryskyřice) a urychlovače, které slouží ke zkrácení času síťovací reakce. Mezi nejpoužíva-nější termose-ty patří:

- polyesterové pryskyřice,
- vinylesterové pryskyřice,
- epoxidové pryskyřice,
- fenolické pryskyřice. [2][14]

Nenasycené polyesterové pryskyřice (UP-R) jsou bezbarvé, slabě nažloutlé roztoky, které se vytvrzují za běžných i zvýšených teplot bez vzniku těkavých vedlejších produktů. Vzniká pouze reakční teplo a pryskyřice se smršťuje (o 5 až 9 %). Jedná se o hojně využí- vanou matici pro kompozitní systémy díky její nízké viskozitě, dobrému prosycování vlá- ken a rychlému vytvrzení. Viskozita je závislá na obsahu styrenu, jehož obsah je mezi 30 a 50 % obsahu roztoku. Zvýšením obsahu styrenu se docílí snížení viskozity a tím se zlepši zpracovatelnost pryskyřice. Nevýhodou však je zkřehnutí, které styren ve větším množství způsobí. Využívá se převážně k prosycování skelných vláken či rohoží. [14][18]

Vinylesterové pryskyřice (VE-R) jsou díky kratším molekulovým řetězcům reaktiv- nější, mají vyšší stupeň zesílení a nižší viskozitu. Dokážou odolávat vyšším teplotám, ale také jsou křehké, v čemž jsou podobné s polyesterovými pryskyřicemi se zvýšeným obsa- hem fenolu. Naopak rozdíl oproti UP-R je vyšší houževnatost a odolnost vůči chemikáliím.

Oblast použití VE-R je nejen v aplikacích se zvýšeným korozním namáháním jako jsou chladicí věže, čistírny odpadních vod, komíny, lodě, přepravní nádrže, ale také u velkých nosných konstrukcí, kde je kladen důraz na vysokou pevnost. [14]

Epoxidové pryskyřice EP-R se vyznačují dobrými mechanickými vlastnostmi, vysokou rozměrovou stálostí a dobrou přilnavostí k různým povrchům. Použitím vhodných tvrdidel lze získat i vyšší teplotní odolnost. Snížení viskozity lze docílit reaktivními ředidly a zároveň mohou snížit hořlavost matrice. Konečné vlastnosti jsou ale dány především druhem tvrdidla, který je přizpůsobován dané aplikaci. EP-R se využívá jako matrice pro materiály v elektronice (vzhledem k izolačním vlastnostem pryskyřice), v leteckém průmyslu a také při výrobě velkorozměrových listů větrných elektráren, kdy již UP-R jako matrice nedostačuje. [14][15]

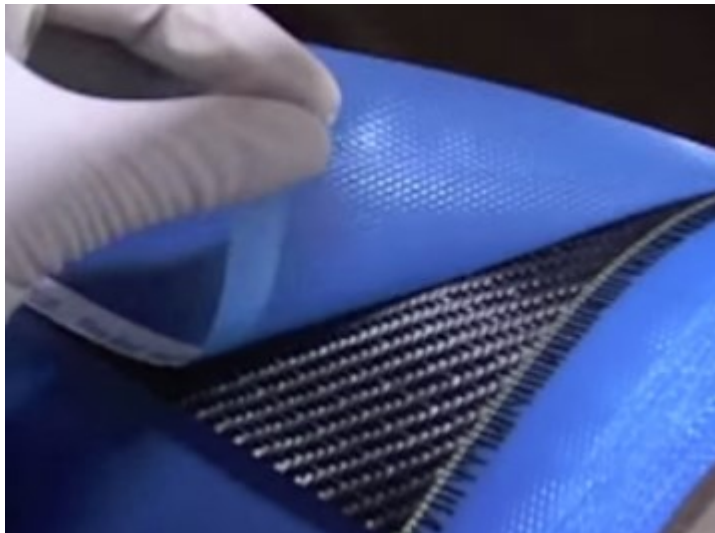
Fenolické pryskyřice PF-R se do zesíťovaného stavu přivádí dodáním tepla nebo za pomoci vytvrzovacích prostředků. Jsou odolné vůči nepolárním rozpouštědlům, kyselinám i povětrnosti a také mají dobrou odolnost vůči ohni. Slouží jako matrice výztužných systémů pro tkaniny, papír nebo dřevo (využívané např. v modelárnách jako formovací desky). Využívají se také jako pojivo při výrobě slévárenských pískových forem nebo brusných kotoučů. Jelikož i vytvrzená PF-R pryskyřice obsahuje zbytky nezreagovaného fenolu, který je zdraví škodlivý, nesmí přijít do kontaktu s potravinami. [18]

Termoplastické matrice jsou po vytvrzení v tuhém stavu, ale oproti termosetům za zvýšené teploty opět měknou. Po ochlazení pod kritickou teplotu přejdou znovu do tuhé fáze. Jejich výhodou je vysoká tažnost. Oproti tomu vzniká problém při zpracování díky vysoké viskozitě, která je značně vyšší než u termosetů. To má za následek vznik defektů v podobě bublin, či neprosycených pramenů vláken. Lze tomu předejít impregnací vlákna termoplastem. Mezi zástupce termoplastických matric se řadí polypropylen, polyamid, polyethylentereftalát, polybutylentereftalát, aromatické kopolyestery, bioplasty a další. Takové termoplasty jsou vyztužovány především krátkými vlákny (délka vlákna 0,2 mm), které jsou následně zpracovávány technologií vstřikováním. Termoplastická matrice ale může být také využívána pro výrobu desek (např. lisováním), kdy je výztužný systém ve formě rohože, tkaniny nebo jednosměrného pásu. [2][14][16]

1.2.2 Prepregy

Prepreg je termín pro výztužný systém, který byl předem impregnován pryskyřicí. Tato pryskyřice již obsahuje vytvrzovací činidlo, a proto je předem impregnovaný výrobek připraven k vytvarování požadovaného tvaru. Jednotlivé pláty lze na sebe vrstvit k získání požadované tloušťky výsledného výrobku. Aby nedošlo k slepení vrstev během skladování, je po obou stranách přiložena separační folie. K vytvrzení prepregu je nutné použít kombinaci zvýšeného tlaku a tepla. Příkladem vytvrzování je v lisech při zvýšených teplotách nebo v autoklávu. Prepregy mají nejčastěji epoxidovou (pro pevnostní aplikace) nebo fenolickou matrici (odolnost vůči ohni). Jako výztužný systém je možno použít tkaniny ze skelných vláken, uhlíkových nebo aramidových. [15][19][20]

Mezi největší přednosti prepregů patří samotná konstrukce, kdy jsou obě složky (matrice a výztužný systém) již spojeny. Tak odpadá úkon prosycování výztuže, při které by nemusely být všechna vlákna prosycena, nebo by mohly vzniknout bubliny v matrici. Další výhodou je již dané množství komponent a rovnoměrné rozložení matrice systému, která by v případě přebytečného množství způsobovala zhoršení mechanických vlastností. Na druhou stranu jsou prepregy dražší oproti nákladům na samostatné komponenty. Nevýhodou je také nutnost skladování při teplotách pod nulou (-18 °C). [19]



Obr. 6 Prepreg. [19]

2 VÝROBA SENDVIČOVÝCH KONSTRUKCÍ

Způsob výroby sendvičových systémů je založen převážně na principu vrstvení jednotlivých komponent a následné zaručení soudružnosti celku. Zvolený technologický postup pro výrobu kompozitu určuje jak jeho výsledné vlastnosti, tak cenu konečného produktu. Proto je při volbě výrobní technologie nutné zohlednit několik faktorů:

- použité materiály jádra a krycích vrstev,
- sériovost dílce,
- velikost a tvar výrobku,
- požadavek na kvalitu povrchu,
- požadované vlastnosti (pevnost a hmotnost),
- náklady na výrobu. [5] [21]

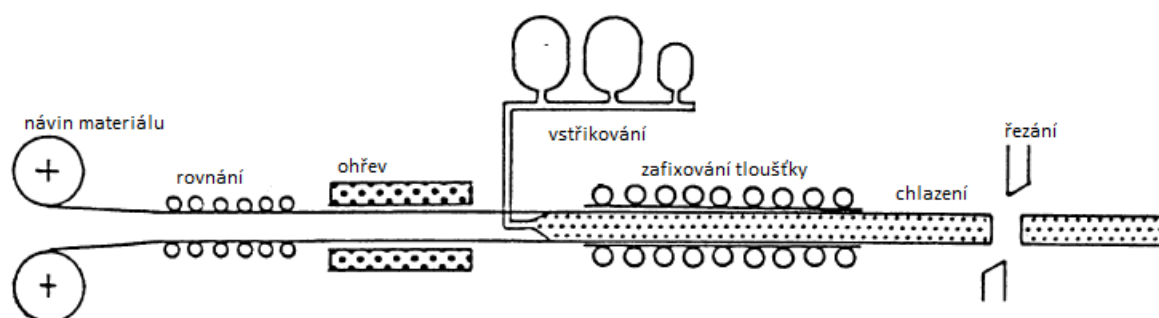
Jako první je sériovost dílce, kdy při malém množství výrobků není vhodné vytvářet strojní technologii, která by díl prodražila. Naopak u velkého množství výrobků by ruční výroba vedla dlouhým pracovním časům a tím i k prodražení výroby. Tvar a rozměr výrobků nese s sebou omezení výběru technologie výroby, kdy je třeba dbát na možnosti použitého zařízení. Výsledné mechanické vlastnosti výrobků jsou dány především použitými materiály sendvičového systému. V případě využití kompozitních materiálů pro krycí vrstvy sendviče jsou vlastnosti dány druhem použité výztuže a matrice. Co ale způsob výroby ovlivní je jejich množství a také orientace výztuže, kdy například nevhodně zvolené uspořádání výztužného systému, nadměrné množství matrice, či naopak nedostatečné prosycení výztuže může způsobit zhoršení mechanických vlastností. [21]

2.1 Výroba sendvičů lepením a zpěňováním

Sendvičové systémy z předem připravených krycích vrstev jako jsou plechy, balsa, překližka a podobně jsou s jádrem spojeny za pomoci adhezivní vrstvy, a to lepidla. To se volí dle druhu spojovaných materiálů a způsobu lepení. Prvním způsobem je aplikace jednosložkového lepidla nástřikem či natíráním na vrstvy, které mají být spojeny. Po určité době, kdy lepidlo mírně uschne, dojde ke spojení vrstev. Proces tuhnutí lze urychlit mírným zvýšením teploty a tlaku. Druhým typem lepení je použití dvousložkového lepidla na

bázi epoxidové pryskyřice nebo polyuretanu. Po smíchání složky rychle reagují a tvrdnou. Výhoda těchto lepidel spočívá v možnosti úpravy polohy jednotlivých vrstev, protože k vytvrzení dojde až po určité době a za zvýšeného tlaku (lisování). [5]

Dalším způsobem výroby sendvičového systému je zpěňování polymerního materiálu, nejčastěji polyuretanu. Materiál společně s aktivátory a hnacími přísadami způsobí mezi vrchními vrstvami sendviče chemickou reakci. Tato PUR pěna je silně přilnavá k povrchům, se kterými je v kontaktu. Při tváření v uzavřené formě může být sendvičový panel i složitějších tvarů. Jelikož je tento proces relativně pomalý, využívá se v některých případech kontinuální výroba. Princip je založen na odvíjení ocelových plechů z cívek (krycích vrstev sendviče), které jsou z důvodu zaručení správného průběhu expanze PUR pěny předehřívány. Po vstříknutí a zpěnění pěnového materiálu následuje chlazení, popřípadě dále řezání na požadované rozměry panelů. Princip je znázorněn na obrázku. [5]



Obr. 7 Princip kontinuální výroby sendvičových panelů s pěnovým jádrem. [5]

2.2 Výrobní technologie sendvičů s kompozitní krycí vrstvou

Technologie pro zpracování výztužných systémů s maticí se dělí dle různých hledisek, například podle druhu použité formy. Jedná se o formy:

- otevřené (jednodílné),
- uzavřené. [22]

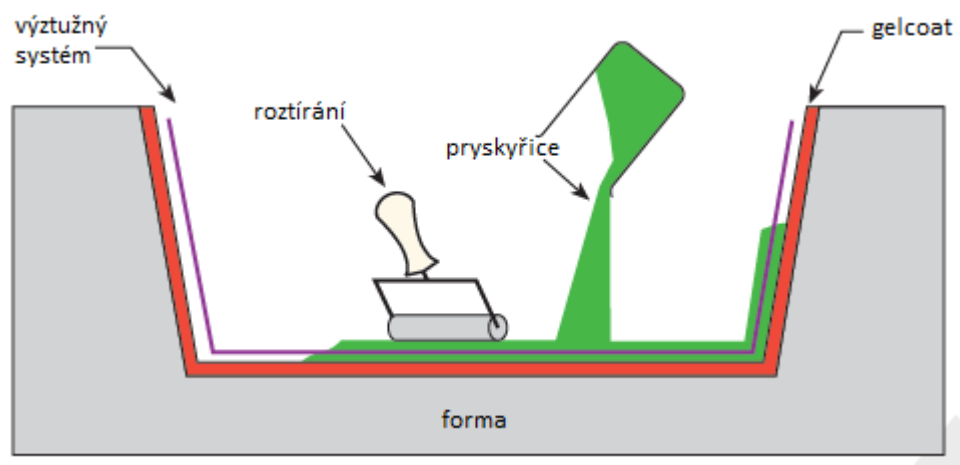
U většiny technologií je nutné nejprve navrhnout a sestrojít tvarovou formu pro daný výrobek. Pro získání tvaru formy se využívá materiálů jako je dřevo, sádra, tmely, pěny a podobně. Nejdůležitější částí formy je ale její povrchová vrstva tvořena například polyuretanovými nebo polyesterovými laky, která je v kontaktu s výrobkem. Kvalita jejího po-

vrchu bude totiž odpovídat kvalitě povrchu výrobků, a navíc je vyžadována její stálost při tepelných změnách, kterým je při výrobě vystavována. [21]

2.2.1 Ruční kladení

Jedná se o nejjednodušší postup výroby sendvičových systémů v malých sériích, výrobě prototypů a rozměrných výrobků. Technologie je však náročná na pracovní čas, zručnost a zkušenosti pracovníka. Důležitá je příprava formy, na kterou se aplikuje separátor, aby nedošlo k přilepení. Poté je nanesena vrstva pryskyřice, zvaná gelcoat. Ta slouží jako ochrana povrchu výrobku a plní také funkci estetickou. [14]

Při tzv. kladení za mokra se pryskyřice nanáší roztíráním nebo nástřikem, do které se vkládá tkanina či rohož výztužného systému. Tento proces se opakuje až do doby získání požadované tloušťky materiálu. U technologie je problém se vznikem vzduchových bublin, které negativně ovlivňují mechanické vlastnosti. Při ručním kladení je téměř nemožné zcela zamezit jejich vzniku, ale snahou je co nejvíce tento problém minimalizovat. K tomu se využívá drážkovaných válečků, které navíc zajistí, že dojde k lepšímu prosycení výztuže pryskyřicí. [6][14]



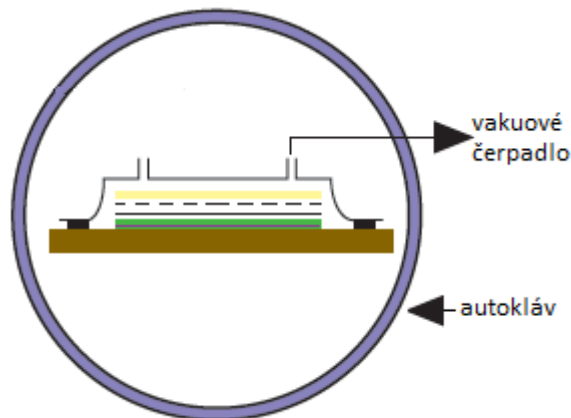
Obr. 8 Ruční kladení. [12]

2.2.2 Lisování prepregů

Předem impregnované výztuže (prepregy) a výrobky z nich se vytvrzují za pomoci zvýšeného tlaku a teploty. Jde o technologii lisování prostřednictvím hydraulického lisu nebo v autoklávu. Hlavní výhodou použití prepregů je možnost použít libovolný jádrový materiál bez nutnosti dalších úprav. V případě lisování se jednotlivé vrstvy sendvičového

systemu naskládají ve správném pořadí na sebe mezi ocelové desky, se kterými se pak vloží mezi vytemperované desky hydraulického lisu. Působením tlaku a zvýšené teploty dojde k vytvrzení a spojení jednotlivých vrstev. Teplota lisování se u polyesterových pryskyřic pohybuje mezi 130 až 160 °C, v případě epoxidových pryskyřic jde o teploty 125 až 200 °C. [14]

Dalším způsobem je vytvrzování výrobků za pomoci autoklávu. Autokláv je zařízení k vytvrzování kompozitních materiálů, u něhož je možné přesně regulovat teplotní, vakuovací a tlakové cykly. Metoda je velmi nákladná a umožňuje výrobu velmi kvalitních výrobků. Proto se využívá především v leteckém průmyslu. Základem procesu je navrstvení jednotlivých komponent sendviče a dalších pomocných materiálů, jako je separační a odsávací tkanina. Tyto pomocné materiály umožňují odvedení a zadržení přebytečné matrice od výrobku a zabrání tak ucpání systému. Vytvořený sendvičový systém včetně pomocných vrstev je umístěn do autoklávu pod vakuovací folií, kde následně nastavením technologických parametrů dojde k vytvrzení výrobku. [12] [14]



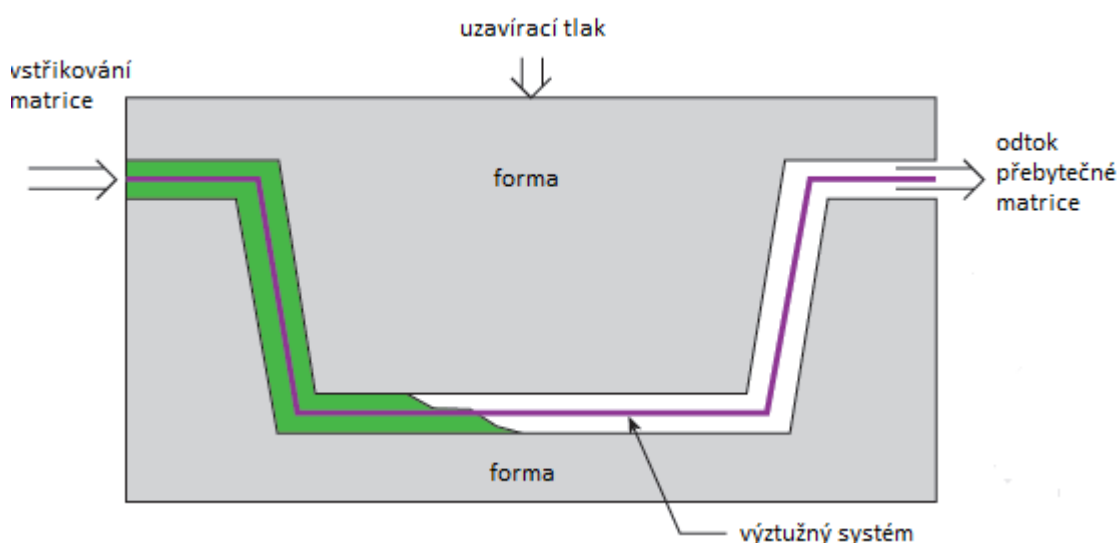
Obr. 9 Autokláv. [12]

2.2.3 RTM

Tato technologie (RTM – resin transfer moulding) vyžaduje uzavřenou formu, nejlépe ocelovou či hliníkovou, aby odolávala pracovním tlakům. Principem je kladení vrstev výztužného systému, který umožní spolehlivý tok pryskyřice do formy opatřené gelcoatem. Poté se forma uzavře a zajistí. Následně se vstřikovacím otvorem za pomoci vysokotlaké pumpy vhání pryskyřice. Dutina formy je plněna až do doby, kdy je forma zcela vyplněna. To určují kontrolní otvory na okrajích formy tak, že pryskyřice jimi začne vytékat. [21]

Používanější je ale modifikovaná metoda RTM, kdy k prosycování výztuže ve formě pomáhá vakuum. Metoda se nazývá VARTM (vacuum assisted resin transfer moulding) nebo také LRTM (light resin transfer moulding). Výhodou této technologie je používání nižších tlaků (0,1 až 0,3 MPa) než u klasické RTM, což umožňuje použití jednodílné formy uzavřené pružnou těsnicí folií. [21][22]

Při výrobě sendvičových systémů pomocí technologie RTM (VARTM) není vhodné používat pro jádrové materiály žádný druh voštin. U dalších druhů je nutné navrtání otvorů pro distribuci pryskyřice z jedné krycí vrstvy sendvičového systému na druhou. [12]



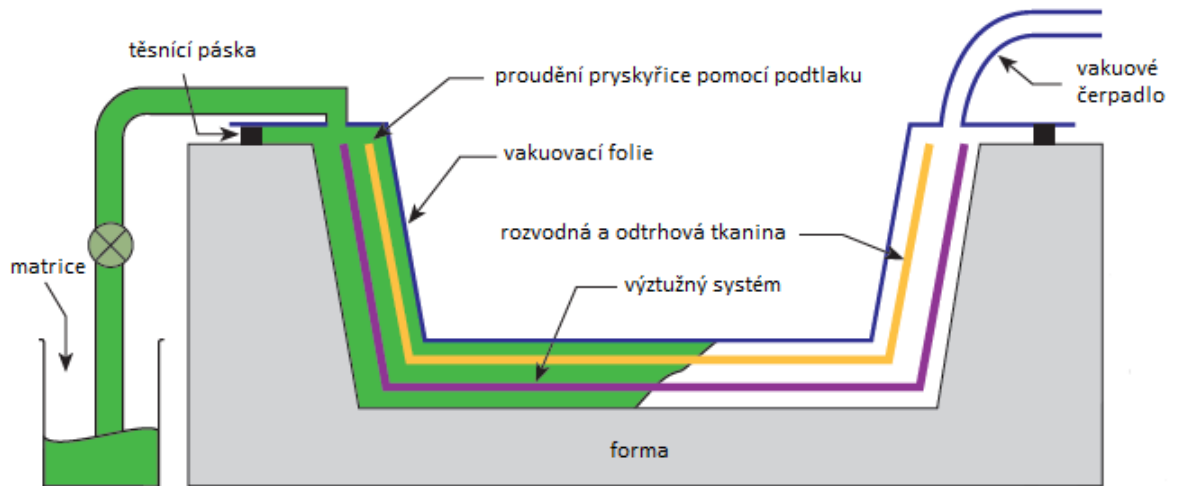
Obr. 10 Technologie RTM. [12]

2.2.4 Vakuová infuze

Podobná technologie jako RTM je vakuová infuze. Pojivo je do formy přiváděno ze zásobníku pomocí vakua. Forma má vždy pevnou spodní část, ale vrchní část může tvořit pružná kompozitní část, která vlivem vakua tvoří na výrobek přítlak. Tato konstrukce formy umožňuje výrobu oboustranně hladkých dílů, jako jsou sendvičové systémy. [21]

Dalším typem konstrukce formy je nahrazení vrchního dílu pružnou folií, která je připevněna k okrajům formy těsníci pásky. V tomto případě je rozvod matrice zajištěn buď pomocí rozvodných kanálů na okraji formy, nebo rozvodnou rohoží, která je umístěna na povrchu výztuže před uzavřením formy. K jednoduššímu odformování se v některých případech může použít pomocná, tzv. odtrhová tkanina, která je opatřena vrstvou separátoru. Technologie je vhodná pro výrobu velkorozměrných dílů, jako jsou trupy a paluby lodí,

kapotáž lokomotiv a vagonů, lopatky větrných elektráren a podobně, u nichž by jiná metoda výroby byla časově a výrobně náročná. V případě výroby sendvičových systémů je vhodné použít pěnové jádro. [21]



Obr. 11 Vakuová infuze. [12]

3 TESTOVÁNÍ SENDVIČOVÝCH KONSTRUKCÍ

Mechanické vlastnosti materiálu určují jeho vhodnost pro dané aplikace, nebo slouží k posouzení kvality na základě srovnávání předepsaných parametrů. Určují se různými způsoby, jako je získání informací z literatury či technického listu materiálu, teoretickým výpočtem, nebo právě pomocí mechanických zkoušek. Volba způsobu testování materiálu by měla připomínat zatěžování výrobku při reálné aplikaci. [25]

Základním rozdělením mechanických zkoušek je dle působící síly na zkoušky:

- statické,
- dynamické. [25]

U statických zkoušek se sleduje především pevnost materiálu při stanovených podmínkách. Pro posouzení se využívá zkoušek tahem, tlakem, ohybem, krutem a střihem. Každou z těchto metod popisuje norma, která mimo procesní parametry metody definuje všechny parametry zkušebního tělíska jako je tvar, jakost povrchu, rozměry a způsob vyhotovení. Díky tomu lze dosáhnout objektivních a jednoznačných výsledků. V případě dynamického zatěžování jsou zkušební vzorky zatěžovány náhle, pak se jedná o zkoušky rázové, nebo proměnlivě působícími silami, jež charakterizují namáhání cyklické. Porušení tedy nastává při menším napětí, než je tomu u zkoušek statických. [26]

3.1 Tlaková zkouška

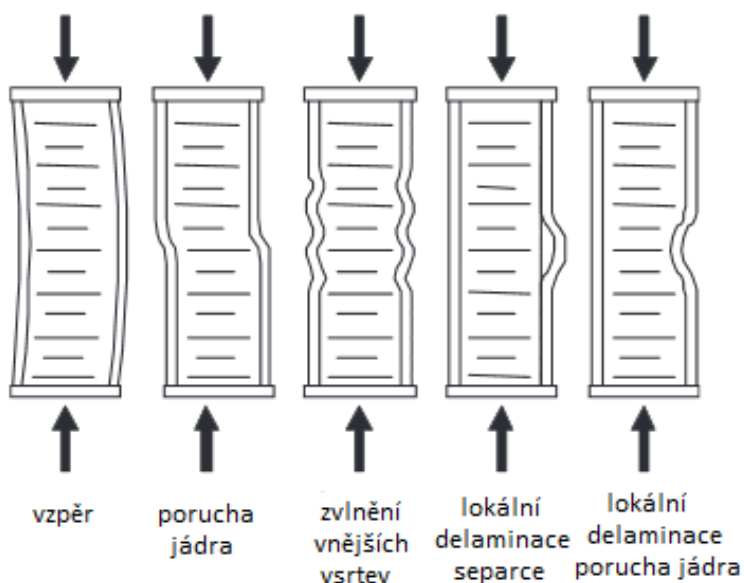
Tlaková zkouška poskytuje základ pro posouzení únosnosti sendvičového prvku. Princip spočívá v zatěžování vzorku tlakem. Důležitým faktorem pro dosažení správného výsledku je uložení vzorku tak, aby jeho osa byla rovnoběžná se směrem zatěžování. Parametry vzorku a procesní podmínky zkoušky jsou dány dle příslušné normy. [27]

Vlivem takového porušení může u sendvičového systému dojít k mnoha typům poškození, které lze rozdělit do dvou skupin:

1. Vlivem ztráty stability:
 - ztráta stability celku (při velké štíhlosti),
 - zvlnění vnější desky (lokální nestabilita).

2. Vlivem materiálové poruchy:

- odtržení krycích vrstev od jádra a následné vyboulení (nedostatečná pevnost spoje),
- materiálová porucha vnějších vrstev (křehký materiál krycí vrstvy a příliš tažný jádrový materiál),
- porucha jádra a následné vyboulení krycích vrstev. [28]



Obr. 12 Poruchy sendviče. [27]

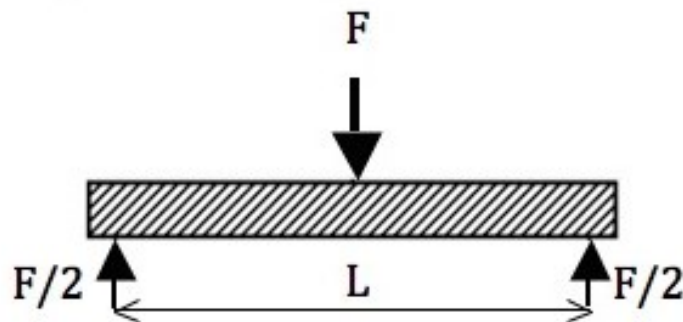
3.2 Zkouška ohybem

Ohybový moment vyvolává ve zkušebním vzorku na straně zatěžující síly tlak, na straně spodní, kde je podepřen tah. K získání výsledků za pomoci zkoušky ohybem se předpokládá lineární rozdělení normálových napětí v průřezu. Naměřené hodnoty jsou závislé na orientaci vláken kompozitních materiálů vzhledem k neutrální ose. Zkouška se rozděluje podle typu uložení na dva druhy:

- tříbodové uložení,
- čtyřbodové uložení. [14] [25]

3.2.1 Tříbodový ohyb

V případě tříbodového ohybu je zkušební vzorek zesponu podepřen dvěma podpěrami a konstantní rychlostí zatěžován danou silou. Ta působí z vrchní strany vzorku v místě stejně vzdáleném od obou podpěr až do přelomení nebo dokud deformace nedosáhne stanovené hodnoty. Významným bodem při této zkoušce je místo zatížení (střed délky zkušební vzorku). V tomto bodě je definováno místo lomu. [14] [17]



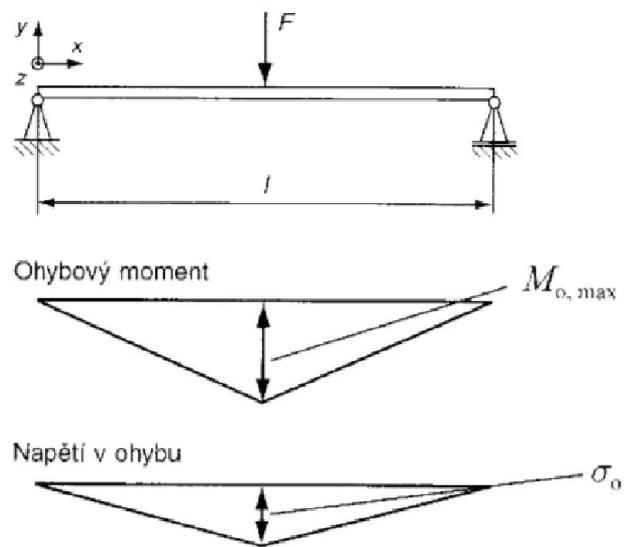
Obr. 13 Tříbodový ohyb (tříbodový ohyb). [17]

Ohybový moment je dán vztahem:

$$M_o = \frac{F \cdot l}{4} \quad (1)$$

Napětí je ze vztahu:

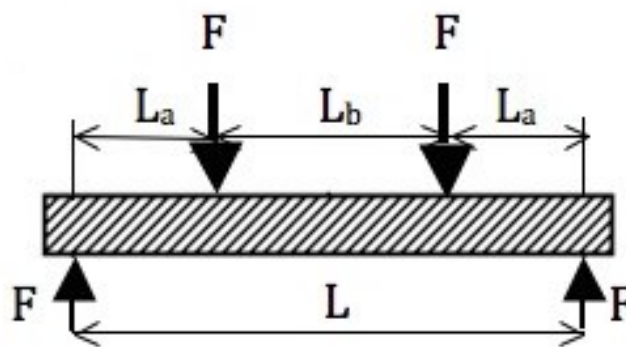
$$\sigma_o = \frac{M_o}{W_o} \quad (2)$$



Obr. 14 Napětí a ohybový moment (tříbodový ohyb). [14]

3.2.2 Čtyřbodový ohyb

Metoda čtyřbodového ohybu je obdobná jako u tříbodového, ale zatěžující síla působí ve dvou bodech. Hodnota pevnosti je při této metodě pak nižší než při tříbodovém ohybu. Při této zkoušce je po celé délce rozteče uložení vzorku konstantní ohybový moment, což je velkou výhodou při stanovování modulu pružnosti. [14] [17]



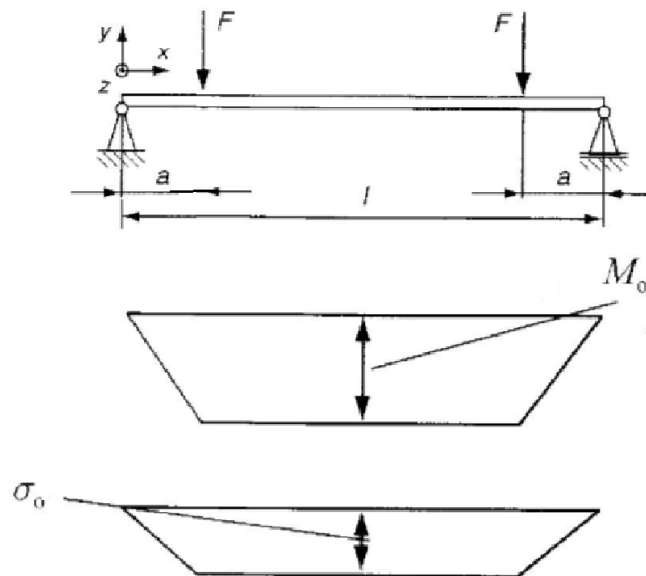
Obr. 15 Čtyřbodový ohyb. [17]

Ohybový moment je dán vztahem:

$$M_o = F \cdot a \quad (3)$$

Napětí je totožné jako u tříbodového ohybu:

$$\sigma_o = \frac{M_o}{W_o} \quad (2)$$



Obr. 16 Napětí a ohybový moment (čtyřbodový ohyb). [14]

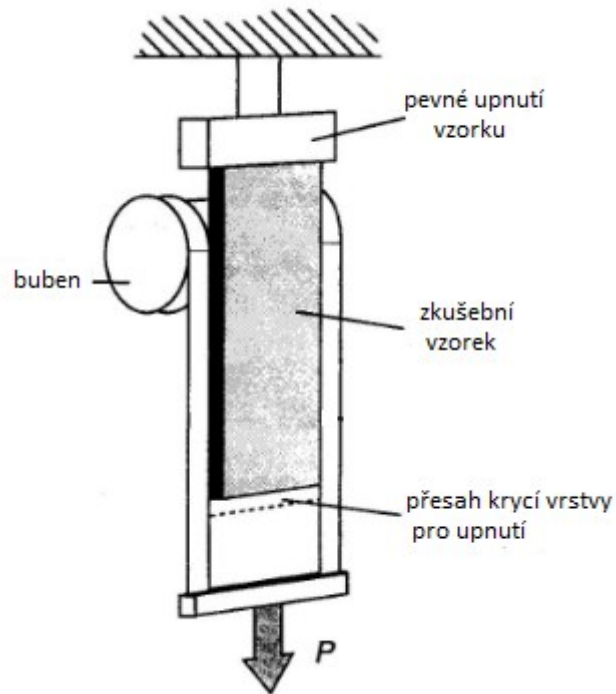
3.3 Zkouška odlupování

Zkoušky odlupu jsou určeny ke stanovení adheze mezi krycí vrstvou a jádrovým materiálem sendvičového systému. Zkouška je prováděna několika metodami, mezi které patří zkouška odlupu pomocí navíjecího bubnu, zkouška odlupem za pomoci tahu, nebo také tlaku vzduchu. [17]

3.3.1 Odlup pomocí navíjecího bubnu

Při této zkoušce je zkoušený sendvičový vzorek uchycen na jedné straně do nepohyblivých čelistí stisknutím přes krycí vrstvy. Na druhém konci vzorku je ponechán přesah krycí vrstvy tak, aby bylo možné jej uchytit na buben zařízení. Při zahájení zkoušení se buben odvaluje směrem k pevnému uchycení vzorku, přitom s sebou odlupuje krycí vrstvu. Tloušťka jádra v tomto případě nehraje roli, je pouze důležité, aby se při odlupování testo-

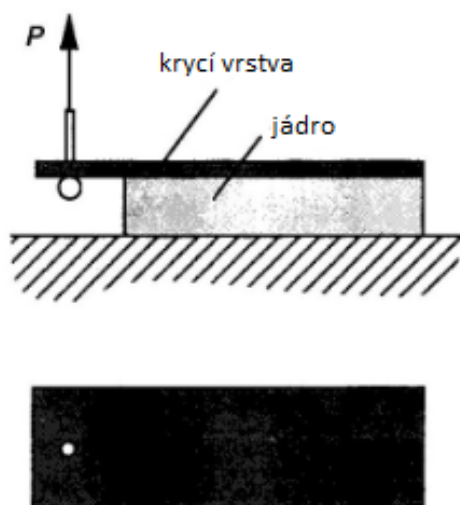
vaný vzorek neohýbal. Procesní parametry zkoušky, metodika a rozměry zkušebních vzorků jsou popsány normou ASTM D 1781. [17] [27]



Obr. 17 Odlup pomocí navíjecího bubnu. [17]

3.3.2 Odlup za pomoci tahu

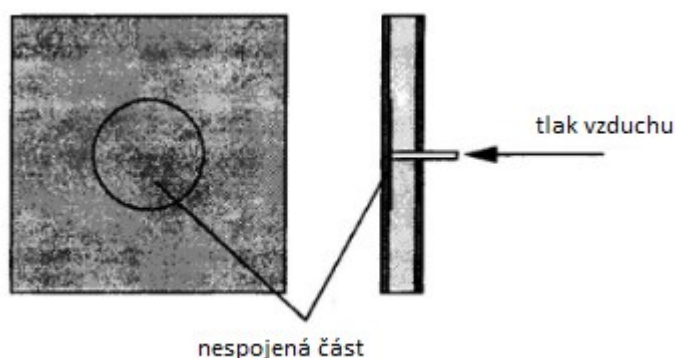
Princip tohoto typu zkoušky spočívá v odlupu vnější vrstvy za pomoci tahové síly. Spodní krycí vrstva sendviče je uchycena k pevné ocelové desce a vrchní je odlupována. Aby bylo možné vzorek uchytit k zatěžujícímu zařízení, je nutné vytvořit přesah krycí vrstvy sendviče například odfrézováním jádrového materiálu. Následně je do přesahu vyvrtán otvor pro zavedení trnu, který je při zkoušce tažen a odlupuje tak krycí vrstvu sendviče. [17]



Obr. 18 Odlup za pomoci tahu. [17]

3.3.3 Odlup za pomoci tlaku vzduchu

V případě metody odlupu za pomoci tlaku vzduchu se přivádí vzduch mezi jádro a krycí vrstvu. V tomto místě je zkušební vzorek opatřen nespojenou částí vytvořenou tak, že se zde při výrobě umístí teflonová tkanina. Do tohoto místa se poté pomocí trubičky připojené na kompresor vhání vzduch. Tlak vzduchu je postupně zvyšován až do odtržení vnější vrstvy. Výsledná hodnota tlaku potřebná k odlupu vrstev je zaznamenána a přepočítána na energii potřebnou k odtržení vrstev. [17]



Obr. 19 Odlup za pomoci tlaku vzduchu. [17]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

4 CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE

Cílem praktické části diplomové práce bylo vyhodnotit vliv počtu vnějších vrstev sendvičového systému na jeho chování. K vyhodnocení experimentu byla navržena sendvičová struktura, která využívala jako krycí vrstvu prepreg složený ze skelné tkaniny a epoxidové pryskyřice. Pro získání výsledků pak sloužily vyrobené zkušební vzorky, které kombinovaly různý počet vrstev prepregu a druh použitého jádrového materiálu. Jednalo se o voštinové jádro a o jádro pěnové, kvůli komplexnějším výsledkům testování. Pro každý druh použitého typu jádra se vyhodnocovaly výsledky samostatně, jelikož se zkoumal pouze vliv počtu vnějších, krycích vrstev.

Praktická část zahrnovala hned několik úkonů, které bylo nutné provést před samotným testováním konkrétních sendvičových prvků. Mezi jednotlivé fáze experimentu patřily:

- příprava použitých materiálů,
- sestavení jednotlivých vrstev sendvičových prvků,
- lisování,
- řezání zkušebních vzorků,
- zkouška tříbodovým ohybem,
- zkouška tlakem,
- vyhodnocení výsledků.

Během všech fází experimentu bylo využíváno poznatků z teoretické části a jednotlivé úkony probíhaly dle příslušných norem a technických listů používaných materiálů. Veškeré úkony k experimentální části diplomové práce, jako je výroba sendvičových prvků, jejich lisování a následné řezání na požadovaný rozměr, probíhaly v laboratořích fakulty, kde byly následně zkušební vzorky i testovány.

5 VLIV POČTU VNĚJŠÍCH VRSTEV NA VLASTNOSTI SENDVIČOVÝCH MATERIÁLŮ

Sendvičové prvky a výrobky z nich mají velké uplatnění v mnoha odvětvích. Nejčastěji se využívají v dopravním průmyslu, letectví. Díky svým vlastnostem, jako je především vysoká ohybová tuhost a odolnost vůči rázům při současné nízké hmotnosti konstrukce, se jeho uplatnění rozšiřuje. Mezi nejvyužívanější materiály používané pro jádro sendvičové struktury jsou pěnová polymerní jádra nebo jádra voštinová. Jako krycí vrstvy mohou být použity ocelové či hliníkové plechy, tkaninové lamináty a prepregy. [34]

Při různých aplikacích je sendvičový prvek namáhán nejčastěji na ohyb, nebo rázovým namáháním. Během zatěžování je maximální ohybové namáhání přenášeno hlavně krycími vrstvami, kde způsobuje na jedné straně sendvičové konstrukce tlak a napětí na straně druhé. Porušení je mimo použité materiály závislé na kvalitě spoje jádra a krycích vrstev. Porucha začíná tvorbou mikrotrhlin, které se následně šíří a spojují až do doby, kdy jejich velká koncentrace způsobí zlom celé struktury. [34]

Během předchozích experimentů byl ověřován nejen vliv počtu krycích vrstev, ale také vliv poměru matrice a výztuže v případě použití prepregu, nebo vliv výrobní technologie na vlastnosti sendvičového prvku. Autoři *Ladislav Fojtl, Soňa Rusnáková, Milan Žaludek a Vladimír Rusnák* v publikaci *Influence of the type and number of prepreg layers on the flexural strength and fatigue life of honeycomb sandwich structures* vyhodnocovali výše zmíněné faktory za pomoci experimentálního měření. Tento experiment byl posuzován na základě zkoušky tříbodovým ohybem a jeho výsledky ukazují, že významný vliv na životnost sendviče má druh použitého prepregu a v případě více vrstev také jeho uspořádání. Nejenom druh a geometrie výztužné tkaniny, ale také množství matrice ovlivnila výsledné vlastnosti. V případě většího množství matrice v prepregu byla pozorována vyšší únavová životnost. To bylo zřejmě způsobeno větším zatečením matrice do buněk voštinového jádra během výroby sendvičové struktury. Je však nutné podotknout, že druh také ovlivňuje chování při ohýbání sendvičové struktury. [34]

V některých případech se zkoumal také vliv tloušťky krycí vrstvy na únavovou pevnost lepených sendvičových prvků. Touto problematikou se zabývali autoři *Yi-Ming Jen a Li-Yen Chang* ve své publikaci *Effect of thickness of face sheet on the bending fatigue strength of aluminum honeycomb sandwich beams*. Konkrétně se jednalo o posouzení tří

druhů vzorků s různou tloušťkou krycí vrstvy z hliníkového plechu spojeného za pomoci adhezní vrstvy k hliníkovému voštinovému jádru. Posouzení výsledků u studovaných vzorků proběhlo na základě oddělování na rozhraní mezi lepidlem a plechem během zatěžování. Výsledek tohoto výzkumu zjistil, že během stejného zatížení v ohybu neexistuje žádný zřejmý vztah mezi tloušťkou plechu a životností spoje u sledovaných vzorků. [35]

6 VÝROBA ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ

Výroba zkušebních vzorků se prováděla za pomoci metody ručního kladení jednotlivých vrstev sendvičového prvku a následným lisováním v laboratorním vulkanizačním lisu. Po vylisování polotovarů bylo nutné nařezat zkušební vzorky, jejichž rozměry udává příslušná norma.

Při výrobě sendvičové desky, která byla určena k rozřezání na zkušební vzorky, bylo nutné nejprve připravit a nařezat potřebné rozměry jednotlivých komponent. S ohledem na velikost desek vulkanizačního lisu, potřebné rozměry zkušebních vzorků získané výpočtem dle normy a šířku prořezu při rozřezání, byl následně zvolen rozměr lisovaného sendvičového prvku.

6.1 Určení rozměrů zkušebních vzorků

Zkouška ohybem sendvičových konstrukcí dle normy ASTM C393 definuje zkušební vzorky jak pro ohyb tříbodový, tak čtyřbodový. K vyhodnocení experimentu byl zvolen ohyb tříbodový, jež definuje rozměry zkušebních vzorků následovně. Šířka zkušebního vzorku musí být v rozmezí dvojnásobku a šestinásobku tloušťky sendvičového prvku. V případě voštinového jádra musí být větší než šířka tří kompletních buněk a zároveň menší než polovina vzdálenosti spodních podpěr vzorku. Délka je stanovena jako vzdálenost spodních podpěr zvětšená o 50 mm. Námi zvolená vzdálenost podpěr má 130 mm. Výsledný zkušební vzorek dle kritérií normy byl zvolen 180 x 30 mm jak pro sendvičový prvek s jádrem voštinovým, tak pěnovým. [29]

Rozměry zkušebních vzorků pro standartní tlakovou zkoušku dle normy ASTM C364. Norma stanovuje šířku vzorku minimálně 50 mm a zároveň ne méně, než je dvojnásobek tloušťky sendvičového prvku. Pokud se jedná o sendvičový systém, kde je použito voštinové jádro, šířka vzorku nesmí být menší než šířka dvou kompletních buněk voštinového jádra. Délka zkušebního vzorku (rozměr rovnoběžný se směrem zatěžování během zkoušky) by neměl přesáhnout osminásobek sendvičové struktury. Dle těchto podmínek byl pro případ sendvičových prvků s voštinovým jádrem zvolen 50 x 40 mm (šířka x výška) a v případě jádra pěnového 50 x 60 mm (šířka x výška). [30]

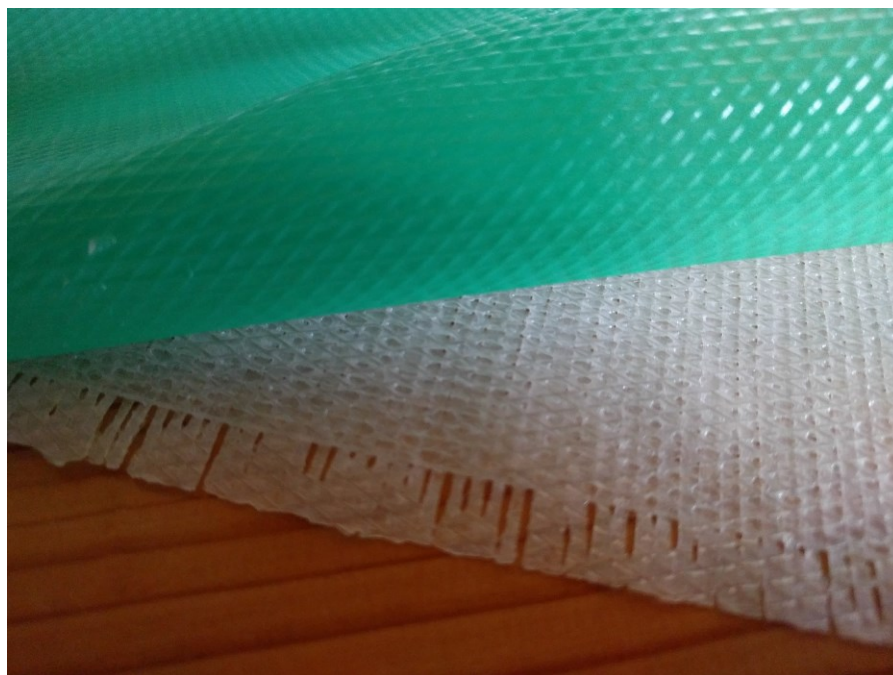
Zvolené rozměry lisovaných desek sendvičových prvků byly určeny ze stanovených velikostí vzorků pro jednotlivé zkoušky. Bylo nutné do rozměru zohlednit přídavek na ořezání (zarovnání) desek a následný prořez při dělení na jednotlivé vzorky.

6.2 Popis použitých materiálů pro výrobu

Při výrobě byly použity dva druhy sendvičových jader, voština a pěnové jádro. Pro oba druhy těchto jader byla zvolena jako krycí vrstva prepreg.

6.2.1 Krycí vrstvy z prepregu

Pro krycí vrstvy sendvičových konstrukcí byl použit prepreg od firmy Deltatech s označením VV320P - DT806R - 37. Jedná se o skelnou tkaninu, konkrétně E sklo, impregnovanou epoxidovou pryskyřicí. Její gramáž je 320 g/m^2 a tkanina je prosycena matricí o obsahu 37 %. Matrice se vyznačuje nízkou viskozitou a je vhodná pro zpracování v autoklávu či lisováním díky rychlému vytvrzování. V závislosti na době vytvrzování je doporučená teplota v rozmezí $65 \text{ }^\circ\text{C}$ až $140 \text{ }^\circ\text{C}$. [31]

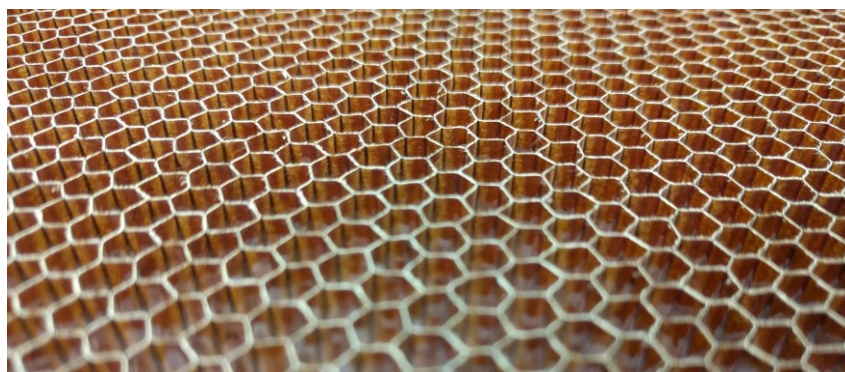


Obr. 20 Prepreg VV320P - DT806R. [vlastní]

6.2.2 Voštinové jádro

Prvním typem jádra použitého pro výrobu zkušebních vzorků bylo jádro voštinové, s označením Cormaster C2 – 4,8 – 48. Cormaster C2 značí voštinové jádro z nomexu, jehož výslednou strukturu zajišťuje slepení za pomoci fenolické pryskyřice. V tomto případě se jedná o voštinový jádrový materiál s hexagonálním tvarem buněk s tloušťkou 5 mm. V typovém označení číslo 4,8 vyjadřuje velikost jedné buňky v mm a číslo 48 značí hustotu v kg/m^3 . [33]

Tento typ voštinového jádra vyniká vysokou pevností při nízké hmotnosti, a proto se využívá především v automobilovém, lodním, železničním a sportovním odvětví. Uchovává si svou rozměrovou stabilitu ve vlhkém prostředí a také za zvýšených teplot, kde teplota dosahuje až $180\text{ }^\circ\text{C}$. [33]



Obr. 21 Voština. [vlastní]

6.2.3 Pěnové jádro

V druhé sérii vzorků bylo využito pěnového jádra z PET pěny od firmy AIREX s typovým označením T90.100. Jedná se o termoplastickou pěnu se strukturou uzavřených buněk. Využívá se především pro jádra sendvičových systémů, kde je kladen vyšší důraz na odolnost vůči ohni. Neabsorbuje vodu a vytváří dobré spojení s různými druhy pryskyřic. Její hustota je v tomto případě 110 kg/m^3 . Tloušťka pěny pro výrobu zkušebních vzorků byla zvolena 9 mm. [32]



Obr. 22 PET pěna. [32]

6.3 Lisování sendvičových prvků

Po navrstvení jednotlivých komponent bylo nutné sendvičový prvek zalisovat. Lisování probíhalo v laboratorním vyhřívaném lisu. Dle technického listu prepregu byla teplota nastavena na 140 °C a ihned poté se do lisu vložily ocelové desky k nahřátí na tuto teplotu. Po získání požadované teploty se desky vyjmuly a vložil se mezi ně sendvičový prvek. Aby nedošlo k přichycení krycích vrstev na ocelové desky, musely se desky naseparovat. Jako separační vrstva byla zvolena separační folie. Poté se desky opět vložily i se sendvičem do lisu na dobu 10 minut, která byla rovněž zvolena dle technického listu. Tento postup se opakoval pro vylisování všech potřebných vzorků.

Tabulka 2 Parametry vyhřívaného lisu. [vlastní]

Rozměry desek	250 x 250 mm
Příkon	2400 W
Maximální teplota	200 °C
Svírací síla	5 t



Obr. 23 Vyhřívavý lis. [vlastní]

6.4 Řezání zkušebních vzorků

Řezání zkušebních vzorků proběhlo za pomoci stolní pily Scheppach HS 80. Z vylisovaných vzorků o rozměru 200 x 200 mm byly odřezány okraje, čímž došlo k zarovnání stran. Poté bylo možné řezat vzorky na ohyb. K získání stejného rozměru u všech vzorků bylo využito dorazu stolní pily. Zkušební vzorky stanovené dle normy ASTM C393 pro zkoušku tříbodovým ohybem byly nařezány na rozměr 180 x 30 mm.

Stejným způsobem byly získány zkušební vzorky pro zkoušku tlakem dle normy ASTM C364, kdy v případě sendvičového prvku s voštinovým jádrem byly vzorky řezány na rozměr 50 x 40 mm a v případě jádra pěnového na rozměr 50 x 60 mm.

Označování sérií vzorků bylo zvoleno na základě vlastností zkušební vzorku. Číslo značí počet prepregů v krycích vrstvách na jedné a druhé straně sendvičového vzorku. Písmeno „v“ nebo „p“ označuje druh použitého jádra (v – voštinové jádro, p – pěnové jádro). „Ohyb“ či „tlak“ v názvu série určuje, pro jakou mechanickou zkoušku byla série vzorků určena (ohyb – zkouška tříbodovým ohybem, tlak – tlaková zkouška).



Obr. 24 Řezání vzorků. [vlastní]

Tabulka 3 Tabulka nařezaných vzorků. [vlastní]

Označení série zkušebních vzorků	Typ mechanické zkoušky	Typ jádrového materiálu	Počet krycích vrstev prepregu	Rozměr vzorku [mm]	Tloušťka vzorku [mm]	Počet vzorků
1_v_1_ohyb	Tříbodový ohyb	Voština	1	180 x 30	5,3	10
2_v_2_ohyb	Tříbodový ohyb	Voština	2	180 x 30	5,6	10
3_v_3_ohyb	Tříbodový ohyb	Voština	3	180 x 30	5,9	10
1_p_1_ohyb	Tříbodový ohyb	Pěna	1	180 x 30	9	10
2_p_2_ohyb	Tříbodový ohyb	Pěna	2	180 x 30	9,4	10
3_p_3_ohyb	Tříbodový ohyb	Pěna	3	180 x 30	9,8	10
1_v_1_tlak	Příčný tlak	Voština	1	50 x 40	5,3	10
2_v_2_tlak	Příčný tlak	Voština	2	50 x 40	5,6	10
3_v_3_tlak	Příčný tlak	Voština	3	50 x 40	5,9	10
1_p_1_tlak	Příčný tlak	Pěna	1	50 x 60	9	10
2_p_2_tlak	Příčný tlak	Pěna	2	50 x 60	9,4	10
3_p_3_tlak	Příčný tlak	Pěna	3	50 x 60	9,8	10

7 ZKOUŠKA TŘÍBODOVÝM OHYBEM

Zkouška tříbodovým ohybem dle normy ASTM C393 byla provedena v laboratoři Fakulty technologické UTB ve Zlíně na univerzálním zkušebním stroji Zwick 1456, kterým lze vyhodnotit zkoušku tahem, tlakem či ohybem. Součástí zařízení je vyhodnocovací software TestXpert II a také teplotní komora, která umožňuje testování za zvýšených nebo snížených teplot. Testování probíhalo za okolní teploty, tudíž komora nebyla v tomto případě využita. Maximální zatížení, jaké je zařízení schopné vyvinout je 20 kN.

Tabulka 4 parametry zkušebního stroje. [vlastní]

Maximální posuv příčnicku	800 mm/min
Snímače síly	2,5 – 20 kN
Teplotní komora	-80/+250 °C
TestXpert software	tah/ohyb/tlak

Součástí zařízení pro zkoušku ohybem byly podpěry vzorku, jejichž vzdálenost byla stanovena na 130 mm. Zatěžující síla působila ve stejné vzdálenosti od obou podpěr. Tloušťka podpěr včetně zatěžující čelisti měla 10 mm a rádius zaoblení 5 mm. Rychlost posuvu příčnicku byla nastavena na 6 mm/min.



Obr. 25 Čelisti pro zkoušku tříbodovým ohybem. [vlastní]

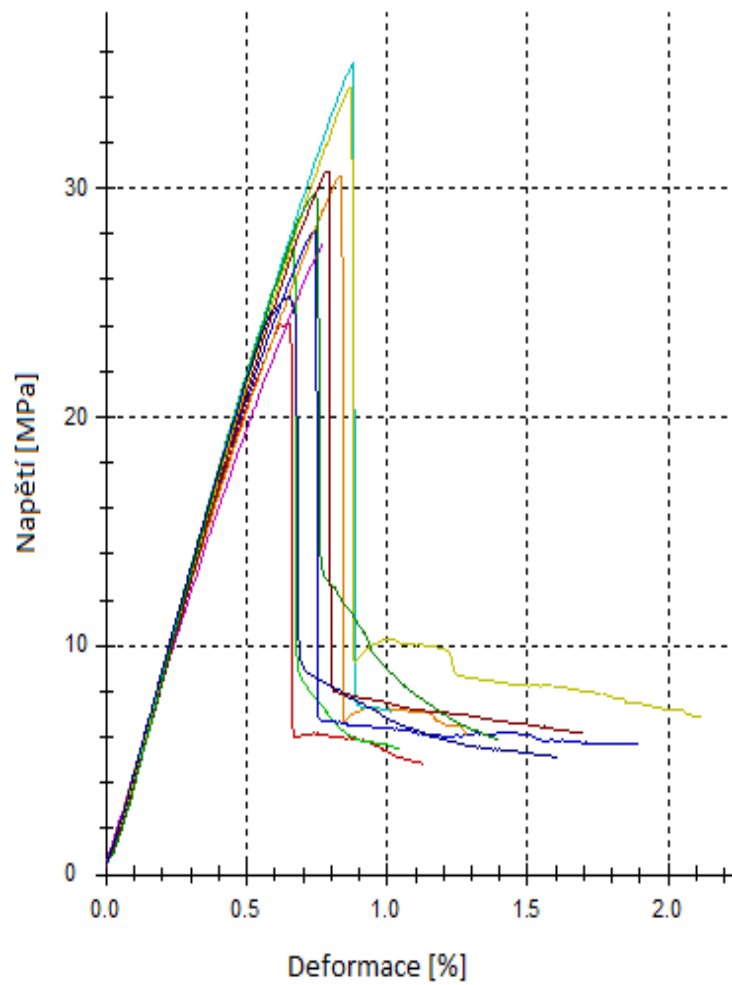
7.1 Naměřená data

Celkem bylo pro zkoušku tříbodovým ohybem vyhodnocováno 6 sérií po 10 kusech vzorků. První 3 série vzorků obsahovaly voštinové jádro a měnil se počet krycích vrstev. Totéž se týkalo vzorků s jádrem pěnovým, jimž připadly zbylé 3 skupiny vzorků, a opět se měnil počet krycích vrstev.

V následujících tabulkách je vždy aritmetický průměr měřené veličiny včetně směrodatné odchylky a chyby měření. Ke každé tabulce je graf závislosti napětí na deformaci se zakresleným průběhem pro jednotlivé vzorky v sérii.

Tabulka 5 Naměřená data – série vzorků 1_v_1_oheb. [vlastní]

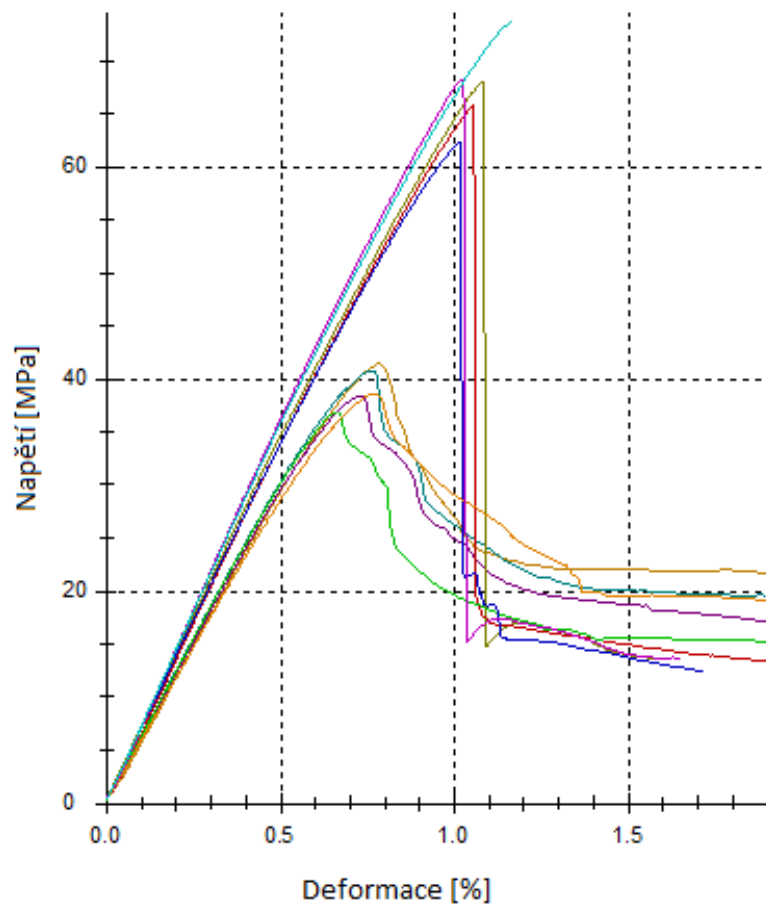
	E_r [MPa]	σ_{max} [MPa]	ϵ_{max} [%]	W_{max} [Nmm]
Aritmetický průměr	4380	24,9	1,4	387,3
Směrodatná odchylka	206	3,75	0,4	103,76
Chyba měření	4,7	15,06	30,69	26,79



Obr. 26 Závislost napětí na deformaci – série vzorků
1_v_1_ohyb. [vlastní]

Tabulka 6 Naměřená data – série vzorků 2_v_2_ohyb. [vlastní]

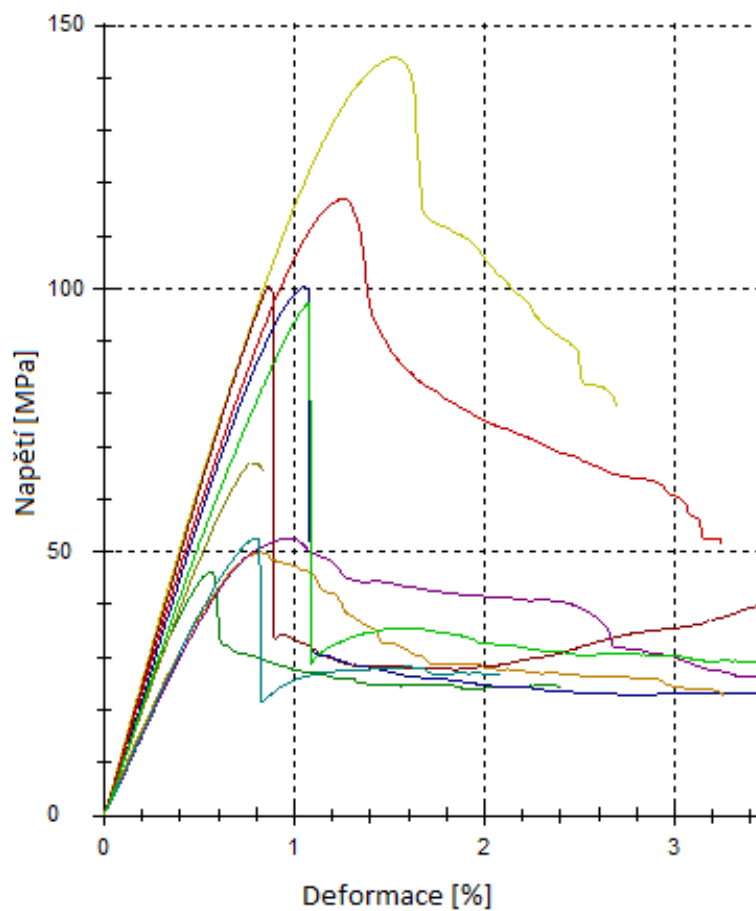
	E_r [MPa]	σ_{max} [MPa]	ϵ_{max} [%]	W_{max} [Nmm]
Aritmetický průměr	6590	46,3	2,9	1462,17
Směrodatná odchylka	567	12,8	1,6	370,92
Chyba měření	8,61	27,71	52,66	25,37



Obr. 27 Závislost napětí na deformaci – série vzorků
2_v_2_ohyb. [vlastní]

Tabulka 7 Naměřená data – série vzorků 3_v_3_ohyb. [vlastní]

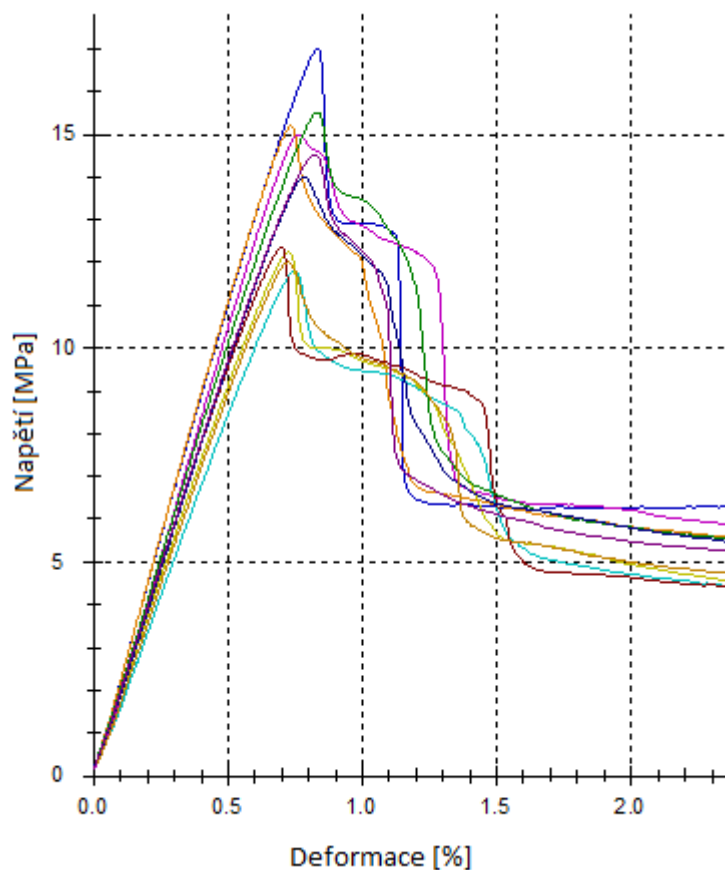
	E_r [MPa]	σ_{max} [MPa]	ϵ_{max} [%]	W_{max} [Nmm]
Aritmetický průměr	10400	79,8	3,7	3483,93
Směrodatná odchylka	1990	33,4	2,1	1940,6
Chyba měření	19,21	41,86	57,56	55,7



Obr. 28 Závislost napětí na deformaci – série vzorků
3_v_3_ohyb. [vlastní]

Tabulka 8 Naměřená data – série vzorků 1_p_1_ohyb. [vlastní]

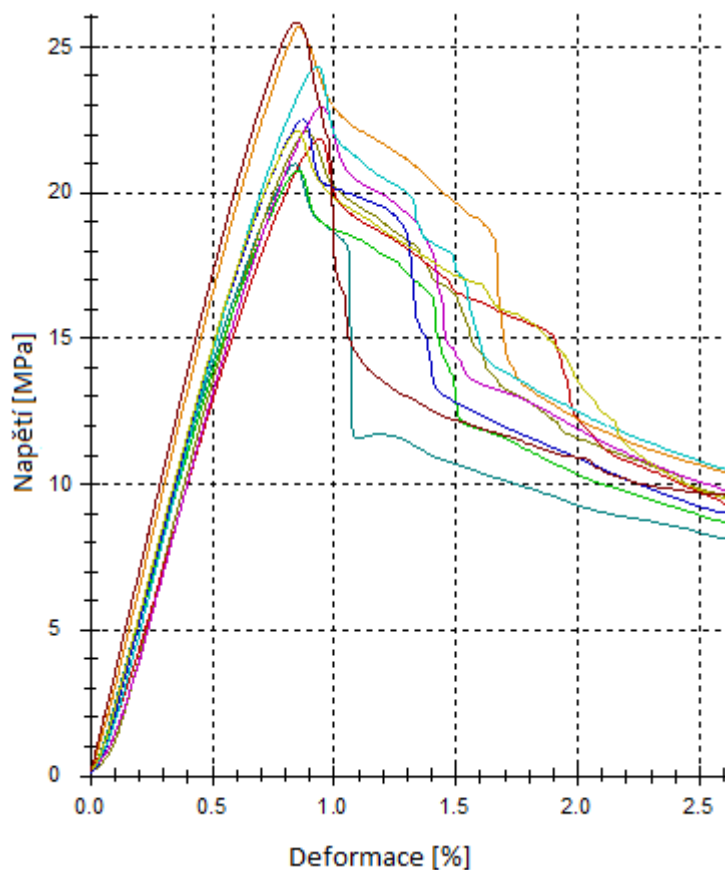
	E_r [MPa]	σ_{max} [MPa]
Aritmetický průměr	1990	12,5
Směrodatná odchylka	175	1,75
Chyba měření	8,81	14



Obr. 29 Závislost napětí na deformaci – série vzorků
1_p_1_ohyb. [vlastní]

Tabulka 9 Naměřená data – série vzorků 2_p_2_ohyb. [vlastní]

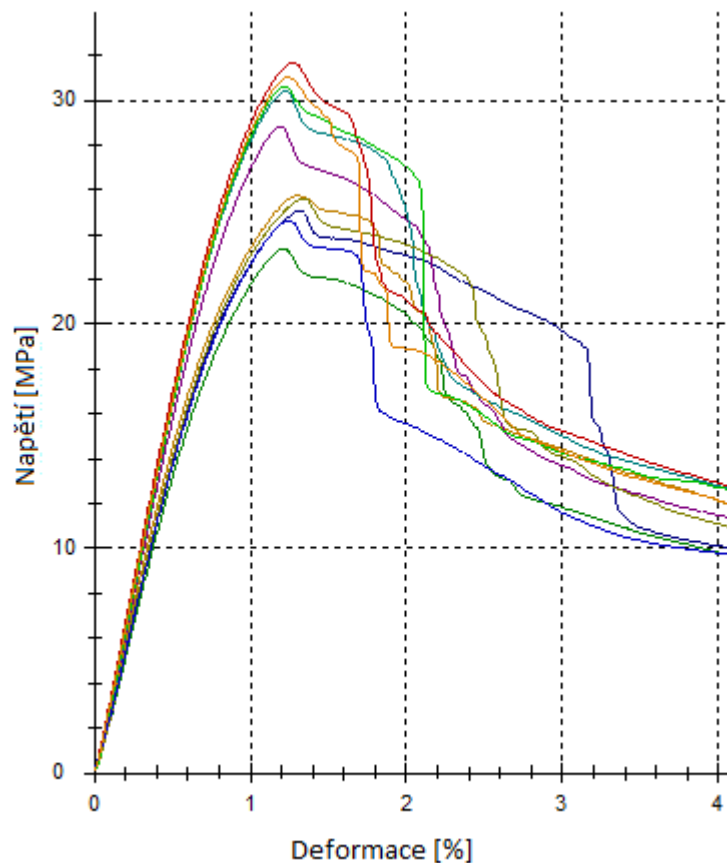
	E_r [MPa]	σ_{max} [MPa]	ϵ_{max} [%]	W_{max} [Nmm]
Aritmetický průměr	2970	21,4	10	2943,16
Směrodatná odchylka	354	1,8	2,6	738,79
Chyba měření	11,9	8,41	25,86	25,1



Obr. 30 Závislost napětí na deformaci – série vzorků
2_p_2_ohyb. [vlastní]

Tabulka 10 Naměřená data – série vzorků 3_p_3_ohyb. [vlastní]

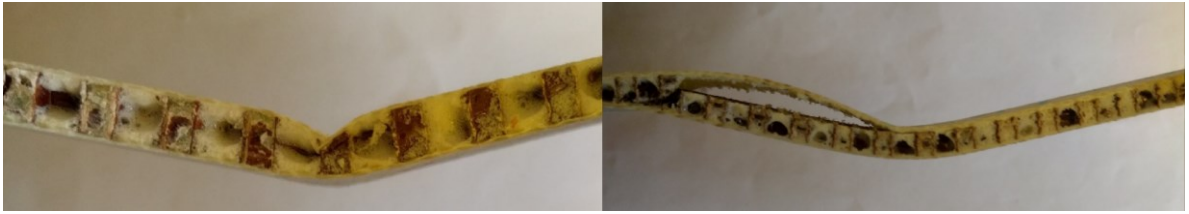
	E_r [MPa]	σ_{max} [MPa]
Aritmetický průměr	3210	25,7
Směrodatná odchylka	281	3,5
Chyba měření	8,78	13,63



Obr. 31 Závislost napětí na deformaci – série vzorků
3_p_3_ohyb. [vlastní]

7.2 Vyhodnocení zkoušky tříbodovým ohybem

Při měření byly získány nejen data ze zkušebního zařízení, ale také se pozorovaly typy deformací během zatěžování. U zkušebních vzorků s voštinovým jádrem a jednou, či dvěma krycími vrstvami (série vzorků 1_v_1_ohyb a 2_v_2_ohyb) docházelo k porušení v místě působení zatěžující síly. Porušení se projevilo nalomením krycích vrstev, které bylo patrnější na vnitřní straně ohybu a v tomto místě docházelo také ke zborcení jádra (voštiny). V případě vzorků s voštinovým jádrem a třemi krycími prepregy (3_v_3_ohyb) docházelo především k delaminaci, kdy se vnější vrstvy odtrhy od jádra. V některých případech se neprojevila delaminace, ale stejné porušení v podobě praskliny v místě zátěže jako u série vzorků 1_v_1_ohyb a 2_v_2_ohyb.



Obr. 32 Porušení vzorku 1_v_1_ohyb (vlevo) a porušení vzorku 3_v_3_ohyb (vpravo).
[vlastní]

U skupin vzorků s pěnovým jádrem (skupiny vzorků 1_p_1_ohyb, 2_p_2_ohyb a 3_p_3_ohyb) vykazovaly vzorky v místě působení zatěžující síly deformaci v podobě zlomu krycích vrstev, které vedlo k deformaci jádra. Toto poškození se týkalo všech vzorků s pěnovým jádrem a počtem vnějších vrstev od jedné do tří. Rozdíl byl pouze v míře deformace, kde s rostoucím počtem vnějších vrstev rostlo poškození (stlačení jádra v místě lomu). V případě skupin těchto vzorků nedocházelo k oddělení jádrového materiálu od vnějších vrstev.



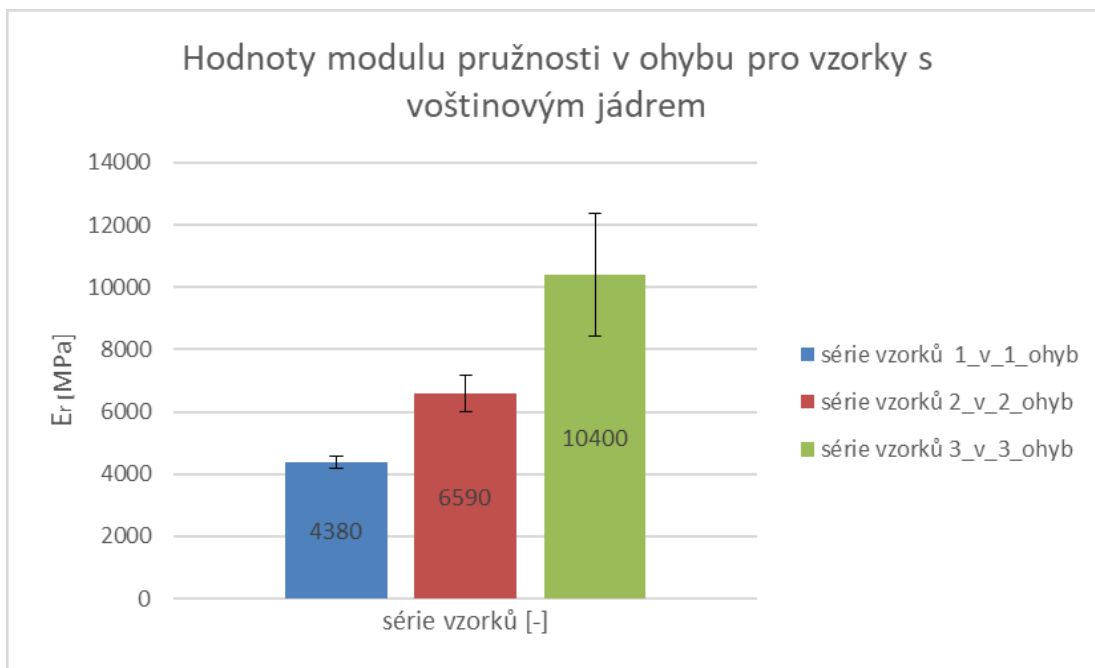
Obr. 33 Zkušební vzorky (shora: vzorek skupiny
1_p_1_ohyb, 2_p_2_ohyb a 3_p_3_ohyb). [vlastní]

Při vyhodnocování se vzájemně porovnávaly série vzorků zvlášť pro voštinové a zvlášť pro pěnové jádro. Z výsledků zkoušky tříbodovým ohybem je patrné, že u obou druhů jádrového materiálu se s rostoucím počtem vnějších vrstev modul pružnosti v ohybu zvyšuje. Další důležitou posuzovanou hodnotou je mezní napětí. Stejně jako v případě modulu s rostoucím počtem vrstev roste.

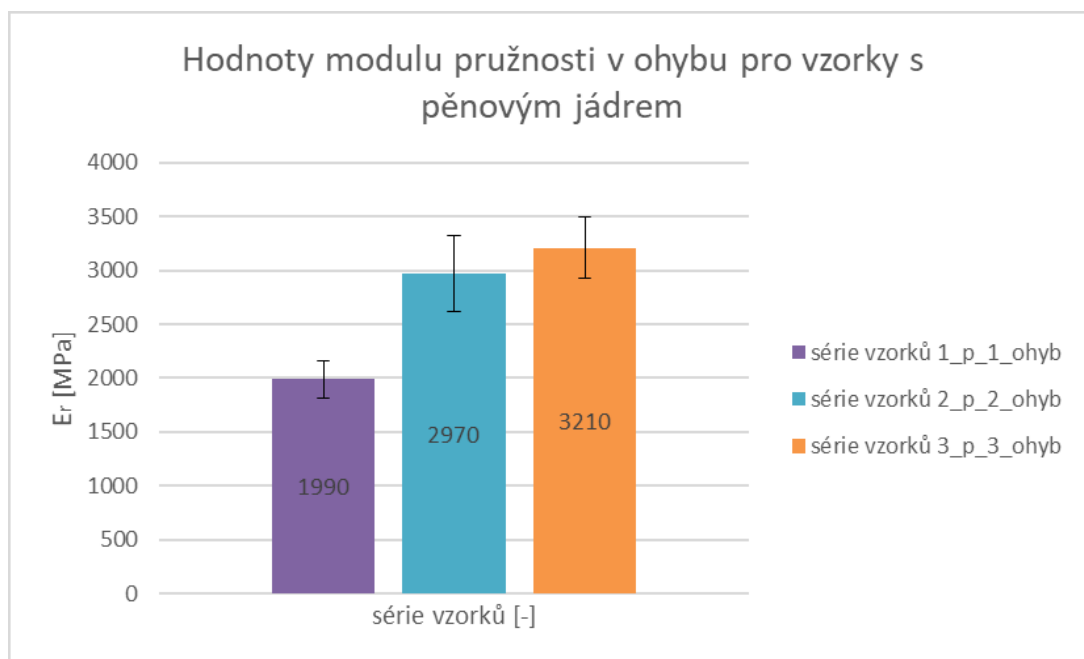
Tabulka 11 Shrnutí hodnot. [vlastní]

Skupina vzorků	E_r [MPa]	σ_{max} [MPa]	ϵ_{max} [%]	W_{max} [Nmm]
1_v_1_ohyb	4380	24,9	1,4	387,3
2_v_2_ohyb	6590	46,3	2,9	1462,17
3_v_3_ohyb	10400	79,8	3,7	3483,93
1_p_1_ohyb	1990	12,5	-	-
2_p_2_ohyb	2970	21,4	10	2943,16
3_p_3_ohyb	3210	25,7	-	-

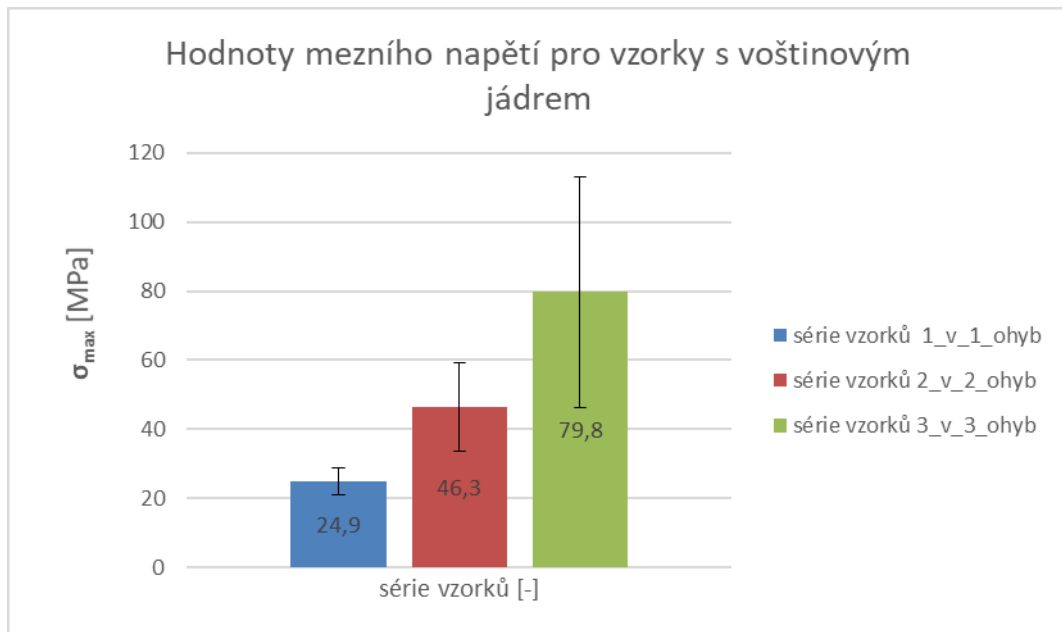
Ze získaných dat je patrné, že u některých sérií vzorků nejsou vyhodnoceny některé veličiny. Důvodem je průběh poruchy u vzorků, kdy nedošlo k porušení celého sendvičového prvku současně, ale nejprve se projevila lokální porucha (prasknutí krycí vrstvy, případně delaminace s jádrovým materiálem) na krycí vrstvě zatěžované ohýbací čelistí (vrchní vrstva, kde působí tlakové namáhání). Jednalo se o vzorky sérií s pěnovým jádrem 1_p_1_ohyb a 3_p_3_ohyb. V případě série 2_p_2_ohyb je sice tato hodnota vyhodnocena, ale byla zaznamenána pouze u dvou vzorků ze série 10 kusů, proto není ani tato hodnota objektivní. Konkrétně se jedná o veličiny jako je poměrná deformace a také práce při maximálním ohybovém napětí. To je patrné z příložených tabulek naměřených dat, kdy v těchto případech nebyl software schopen tyto veličiny vyhodnotit.



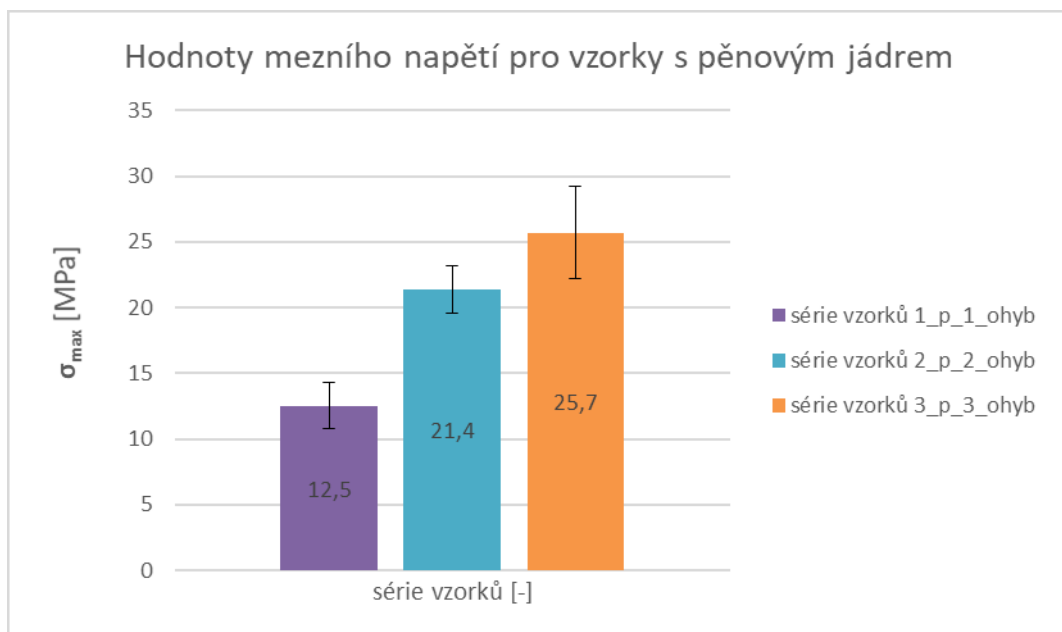
Obr. 34 Hodnoty modulu pružnosti v ohybu pro vzorky s voštinovým jádrem. [vlastní]



Obr. 35 Hodnoty modulu pružnosti v ohybu pro vzorky s pěnovým jádrem. [vlastní]



Obr. 36 Hodnoty mezního napětí pro vzorky s voštinovým jádrem. [vlastní]



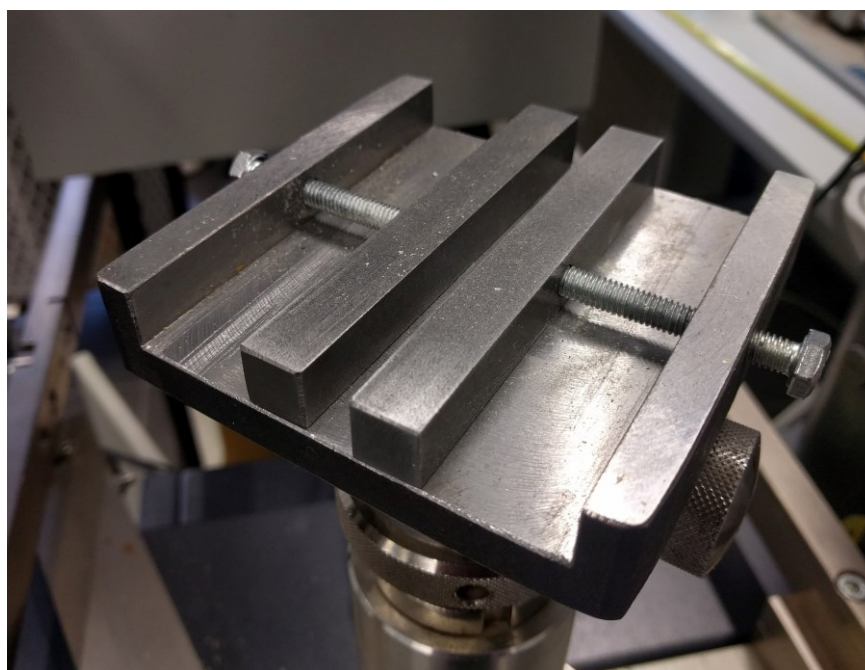
Obr. 37 Hodnoty mezního napětí pro vzorky s pěnovým jádrem. [vlastní]

Jak bylo předpokládáno, výsledky měření prokázaly růst modulu pružnosti a mezního napětí s rostoucím počtem krycích vrstev. Naměřená data vzorků s pěnovým jádrem nedosahovala tak velkých odchylek jako v případě sérií vzorků s jádrem voštinovým. Na Obr. 35 až Obr. 37 jsou graficky znázorněny hodnoty modulu pružnosti a mezního napětí včetně směrodatné odchylky.

8 ZKOUŠKA TLAKEM

Zkouška tlakem provedena dle normy ASTM C364 proběhla stejně jako v případě zkoušky tříbodovým ohybem na univerzálním zkušebním zařízení Zwick 1456. Jeho popis a parametry včetně veškerého příslušenství byly popsány v kapitole 7.

Zkušební vzorky byly uchyceny do čelistí vhodných pro tento druh zkoušky. Jelikož se jedná o pohyblivé čelisti, je možné uchytit a otestovat různé tloušťky sendvičových prvků až o rozměru 54 mm. V případě šířky zkušebních čelistí je možné uchytit testovaný vzorek o maximálním rozměru 100 mm.



Obr. 38 Čelisti pro zkoušku tlakem. [vlastní]

8.1 Naměřená data

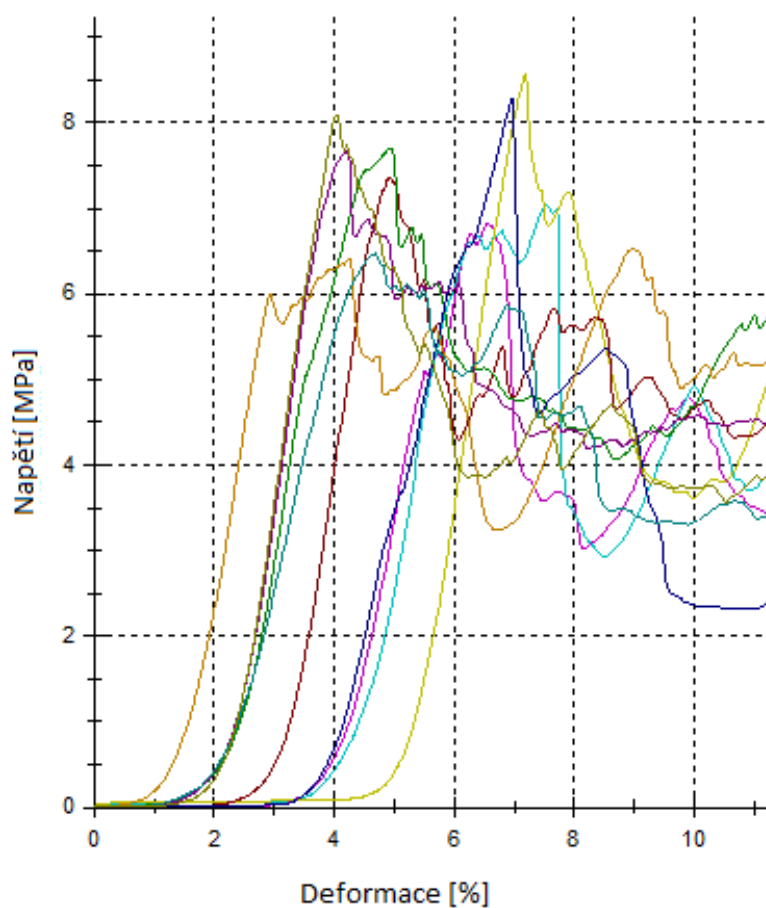
V případě zkoušky příčným tlakem byly série vzorků stejné jako při zkoušce tříbodovým ohybem. I během této zkoušky byly výsledky z každé série vyhodnocovány na základě 10 vzorků konkrétní skupiny. Rozdílem ve vzorcích oproti zkoušce tříbodovým ohybem byly pouze jejich rozměry.

Při měření zkoušky tlakem byly především sledovány veličiny, jako je modul pružnosti v tlaku, smluvní mez kluzu a maximální hodnota zatěžující síly. Z každé série zkušebních vzorků se dopočítal aritmetický průměr, směrodatná odchylka a také chyba měření. Sledovala se rovněž závislost napětí na deformaci, která je pro jednotlivé vzorky v sérii

znázorněna v následujících grafech. Naměřená data byla vyhodnocena a srovnána mezi jednotlivými sériemi vzorků.

Tabulka 12 Naměřená data – série vzorků 1_v_1_tlak. [vlastní]

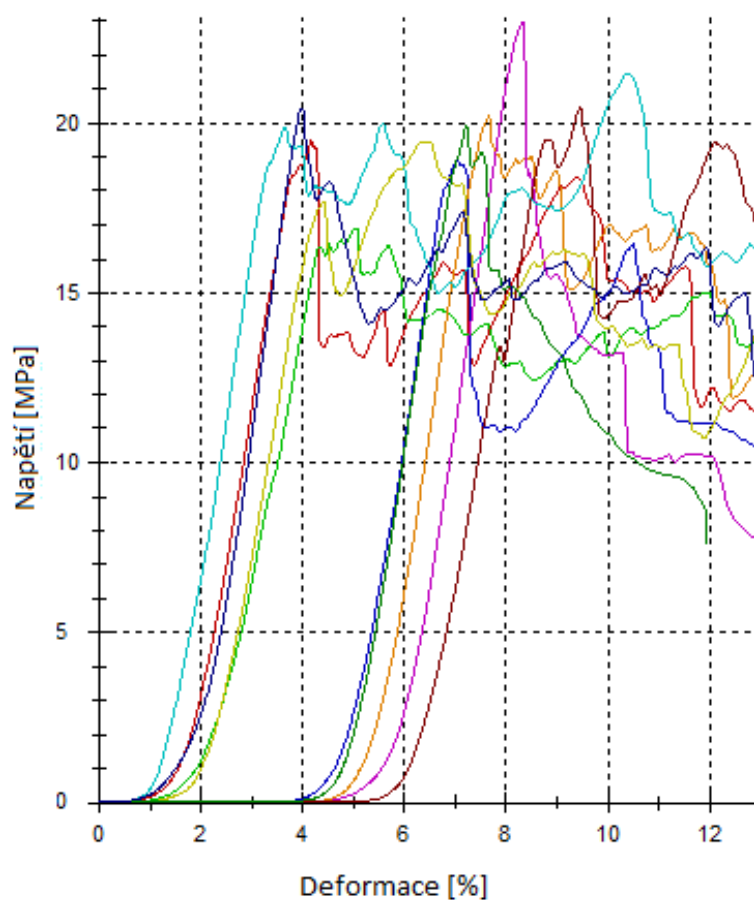
	E_c [MPa]	σ_{max} [MPa]
Aritmetický průměr	372	6,96
Směrodatná odchylka	67,2	0,922
Chyba měření	18,09	13,24



Obr. 39 Závislost napětí na deformaci – série vzorků 1_v_1_tlak. [vlastní]

Tabulka 13 Naměřená data – série vzorků 2_v_2_tlak. [vlastní]

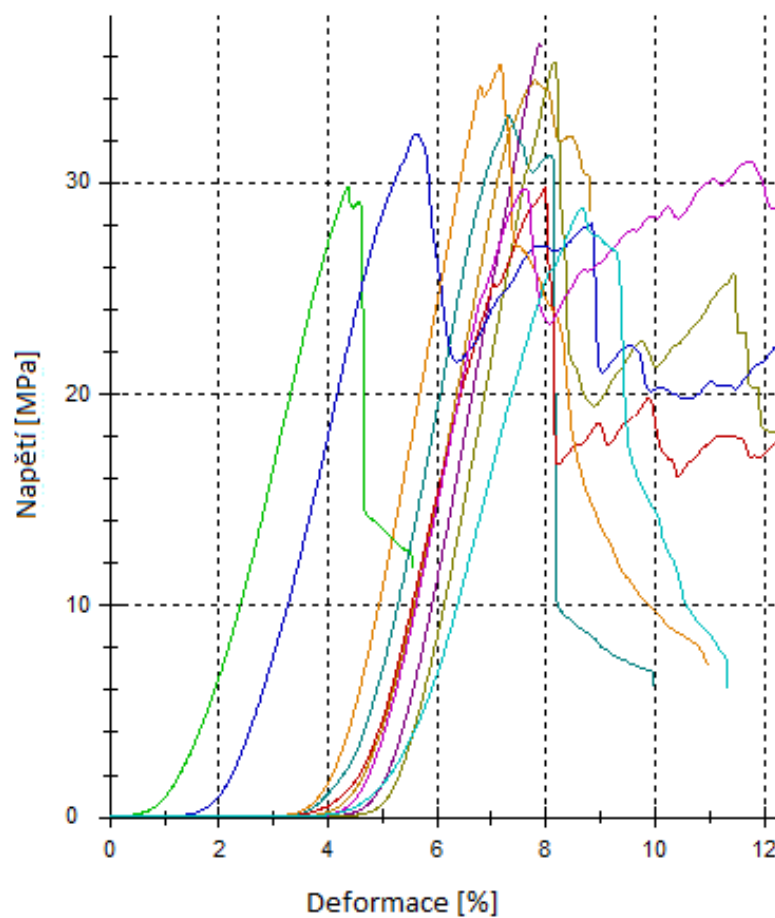
	E_c [MPa]	σ_{max} [MPa]
Aritmetický průměr	894	19,3
Směrodatná odchylka	107	1,66
Chyba měření	11,92	8,56



Obr. 40 Závislost napětí na deformaci – série vzorků 2_v_2_tlak. [vlastní]

Tabulka 14 Naměřená data – série vzorků 3_v_3_tlak. [vlastní]

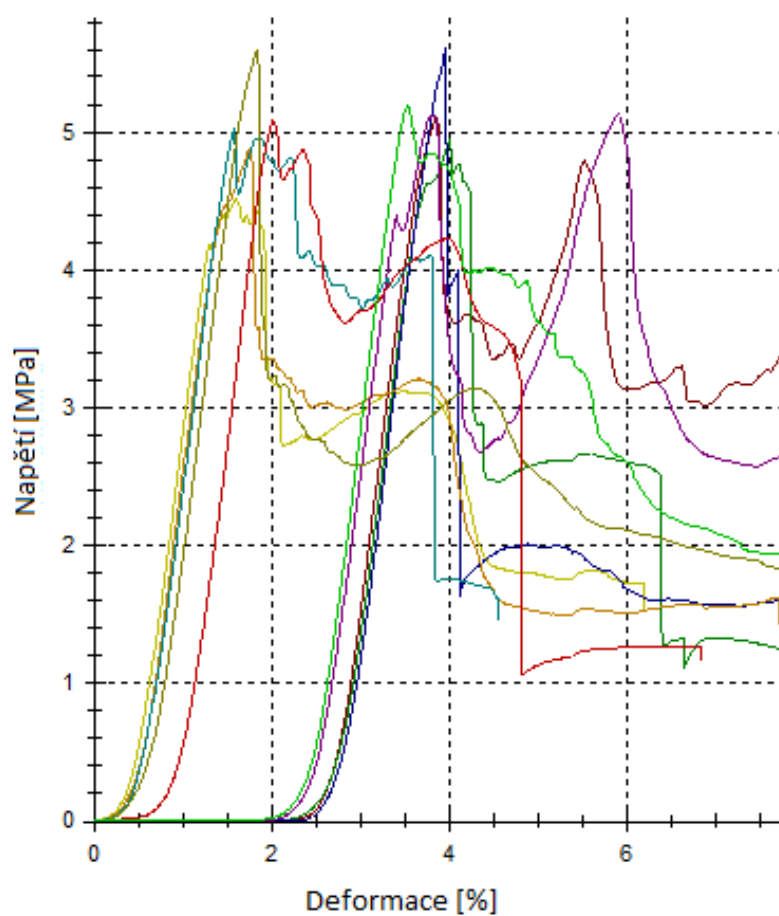
	E_c [MPa]	σ_{max} [MPa]	ϵ_{max} [%]	W_{max} [Nmm]
Aritmetický průměr	1230	30,7	9,2	10635,88
Směrodatná odchylka	153	3,66	1,6	4225
Chyba měření	12,45	11,93	17,21	39,72



Obr. 41 Závislost napětí na deformaci – série vzorků 3_v_3_tlak. [vlastní]

Tabulka 15 Naměřená data – série vzorků 1_p_1_tlak. [vlastní]

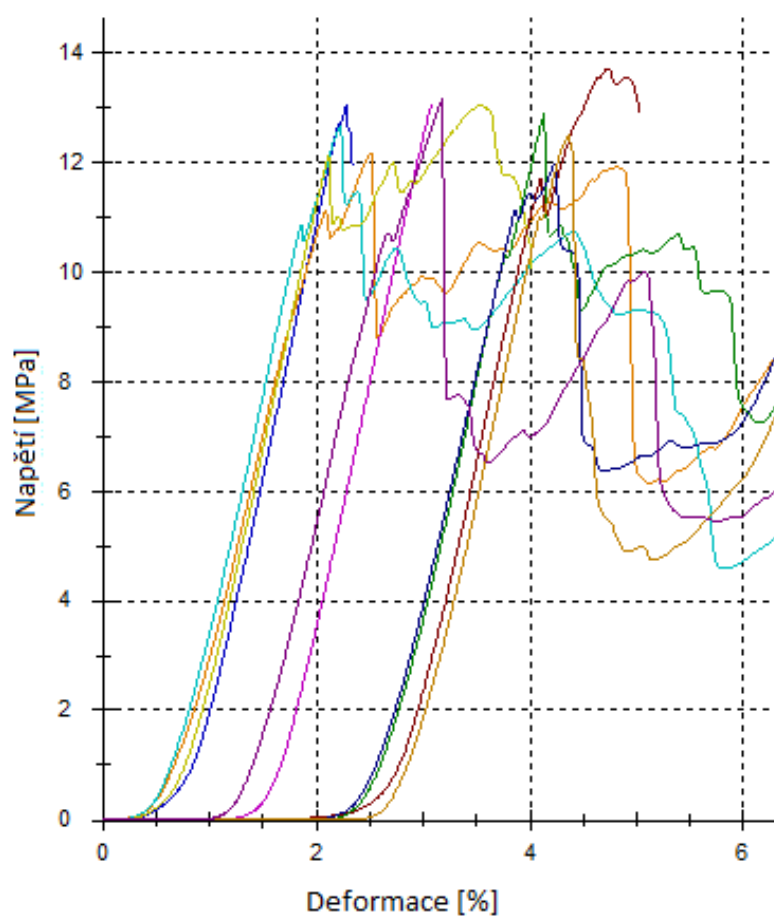
	E_c [MPa]	σ_{max} [MPa]
Aritmetický průměr	493	4,81
Směrodatná odchylka	24	0,215
Chyba měření	4,88	4,48



Obr. 42 Závislost napětí na deformaci – série vzorků 1_p_1_tlak. [vlastní]

Tabulka 16 Naměřená data – série vzorků 2_p_2_tlak. [vlastní]

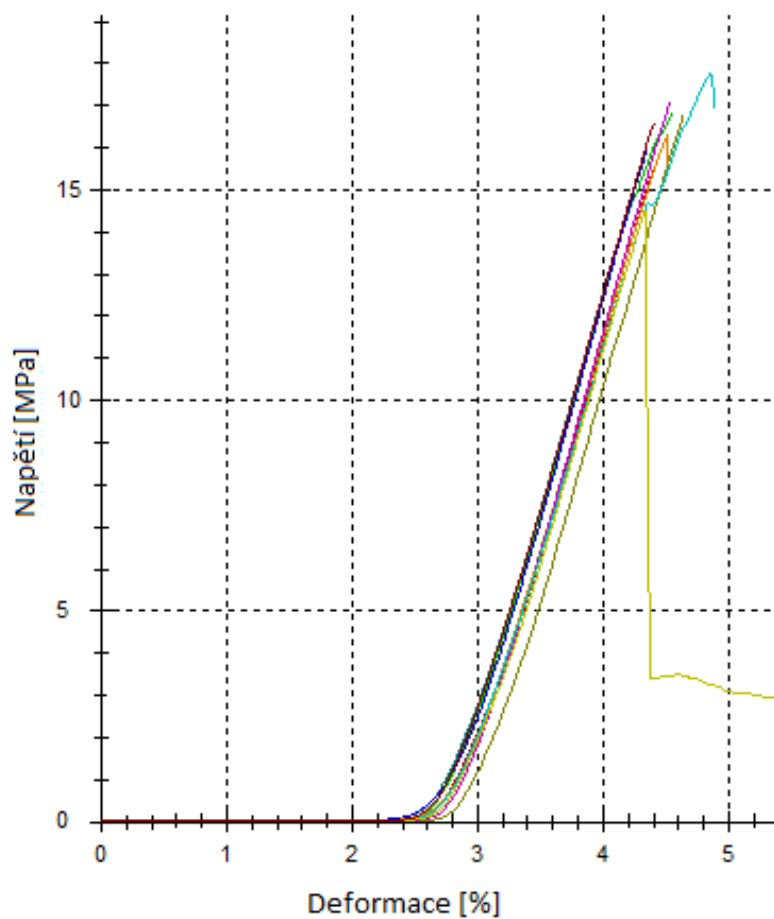
	E_c [MPa]	σ_{max} [MPa]	ϵ_{max} [%]	W_{max} [Nmm]
Aritmetický průměr	853	11,7	5,6	11697,13
Směrodatná odchylka	41,3	0,685	4,5	13695,37
Chyba měření	4,84	5,84	80,49	117,08



Obr. 43 Závislost napětí na deformaci – série vzorků 2_p_2_tlak. [vlastní]

Tabulka 17 Naměřená data – série vzorků 3_p_3_tlak. [vlastní]

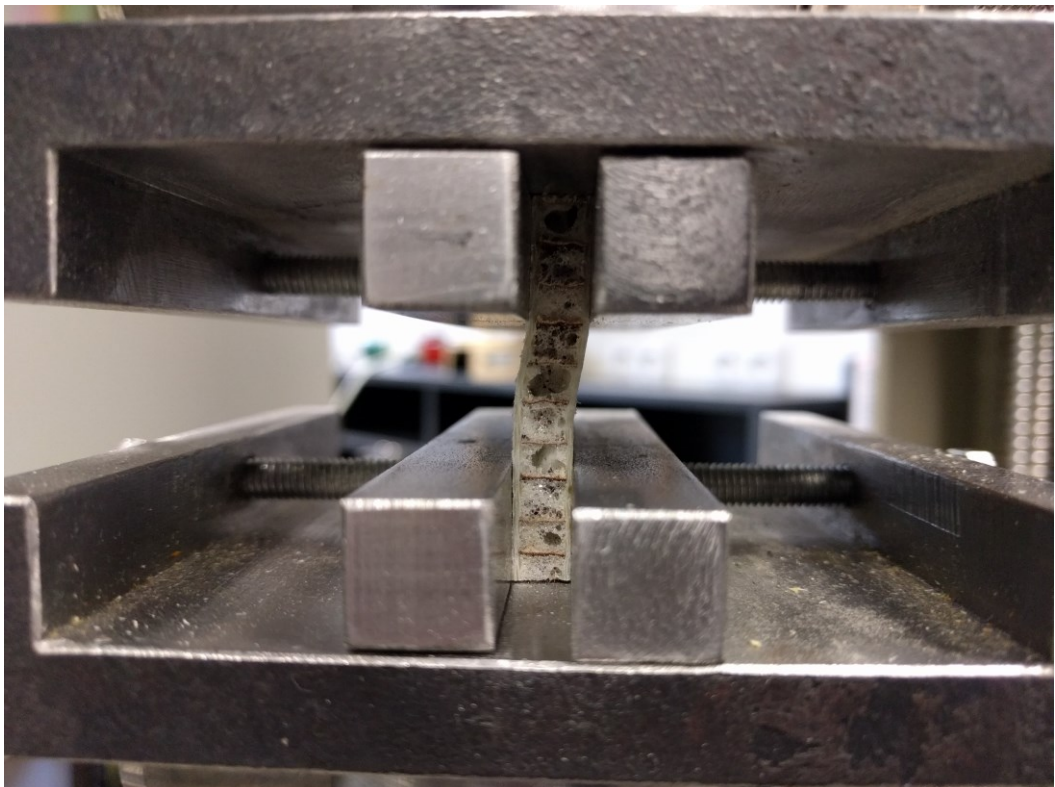
	E_c [MPa]	σ_{max} [MPa]	ϵ_{max} [%]	W_{max} [Nmm]
Aritmetický průměr	1010	15,2	4,6	4829,54
Směrodatná odchylka	19	3,64	0,3	733,19
Chyba měření	1,88	24,03	7,3	15,18



Obr. 44 Závislost napětí na deformaci – série vzorků 3_p_3_tlak. [vlastní]

8.2 Vyhodnocení zkoušky tlakem

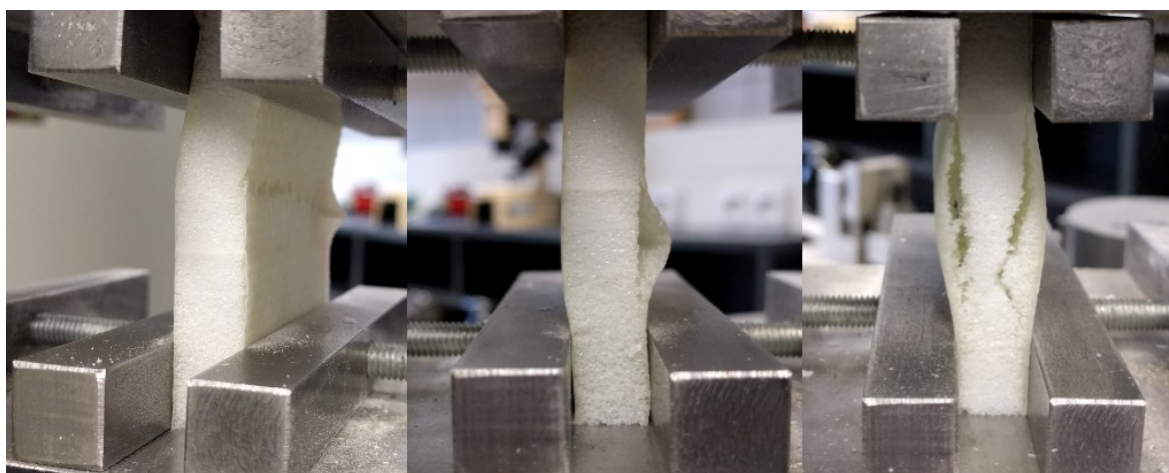
Vyhodnocení zkoušky tlakem bylo rozděleno opět do dvou částí, kdy se porovnávaly vzorky zvlášť s voštinovým (skupina vzorků 1_v_1_tlak, 2_v_2_tlak a 3_v_3_tlak) a zvlášť s pěnovým jádrem (skupina vzorků 1_p_1_tlak, 2_p_2_tlak a 3_p_3_tlak). V sérii označené jako 1_v_1_tlak docházelo především ke stlačení celku sendvičové struktury až do doby, kdy byl cyklus zkoušky ukončen, aby nedošlo k dotyku horní a spodní čelisti. Poškození se projevilo rozpraskáním krycích vrstev v oblasti uchycení vzorku mezi čelistmi. U dvou a tří vrstev sendviče s voštinovým jádrem (série vzorků 2_v_2_tlak a 3_v_3_tlak) nedocházelo k příliš velké deformaci vzorku, ale vzorky byly poškozeny současným prasknutím obou krycích vrstev zároveň a následným stlačením jádrové struktury. V některých případech došlo k vybočení vzorku vlivem poškození krycí vrstvy na jedné straně a přetržením voštiny (především u série vzorků číslo 3_v_3_tlak). Takové vybočení zkušební vzorku z osy zatěžující síly je znázorněno na Obr. 43, po kterém následovalo zmíněné poškození.



Obr. 45 Průběh zatěžování vzorku série číslo 3_v_3_tlak. [vlastní]

Série vzorků s pěnovým jádrem vykazovala oproti voštinovému jádru lepší spojení s krycími vrstvami, což také ovlivnilo typ porušení. V případě série vzorků s označením

1_p_1_tlak docházelo k praskání krycí vrstvy a stlačení pěnového jádra. V některých případech se pěnová struktura pouze stlačila, někdy vedl působící tlak až k prasknutí pěnového jádra. U dalších dvou sérií vzorků (série 2_p_2_tlak a 3_p_3_tlak) se poškození projevovalo ve formě delaminace vnější vrstvy od jádra. U vzorků s dvěma vrstvami prepregu na povrchu (série vzorků 2_p_2_tlak) byla trhлина v oblasti spoje mezi jádrem a krycí vrstvou. Oproti tomu u série vzorků se třemi vrstvami prepregu v krycí vrstvě (série 3_p_3_tlak) nedocházelo vlivem tlaku k separaci vrstev krycích od jádra sendvičového prvku, ale k rozlomení jádrového materiálu a průhybu krycích vrstev, které poté praskly nebo se vrátily po odlehčení do původní polohy.

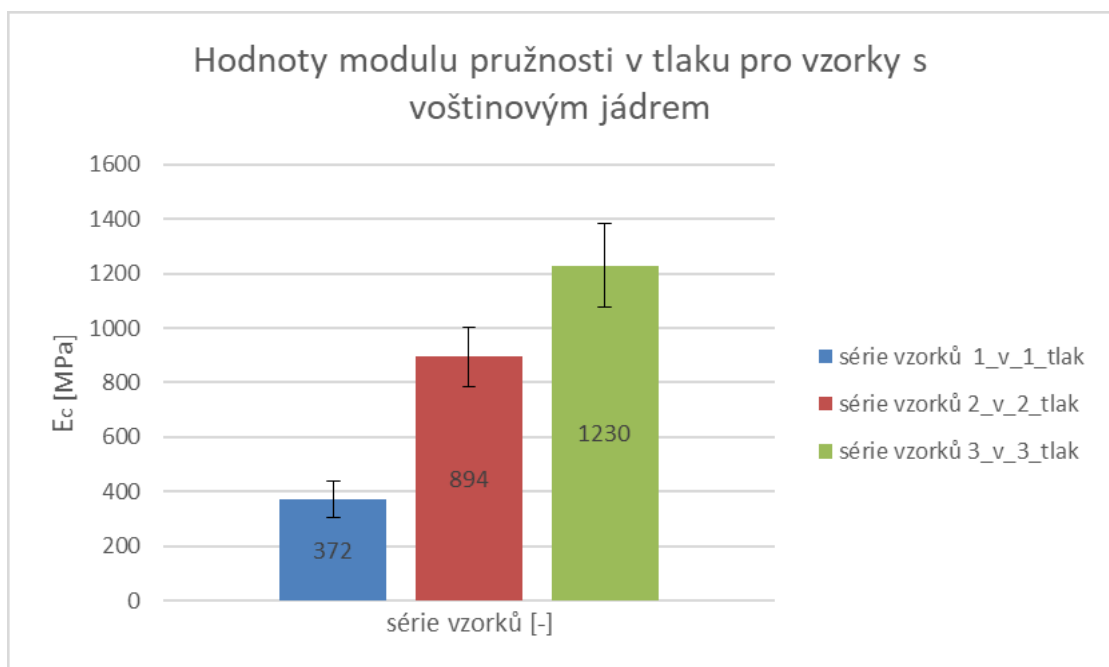


Obr. 46 Poškození vzorků (zleva: série 1_p_1_tlak, 2_p_2_tlak a 3_p_3_tlak). [vlastní]

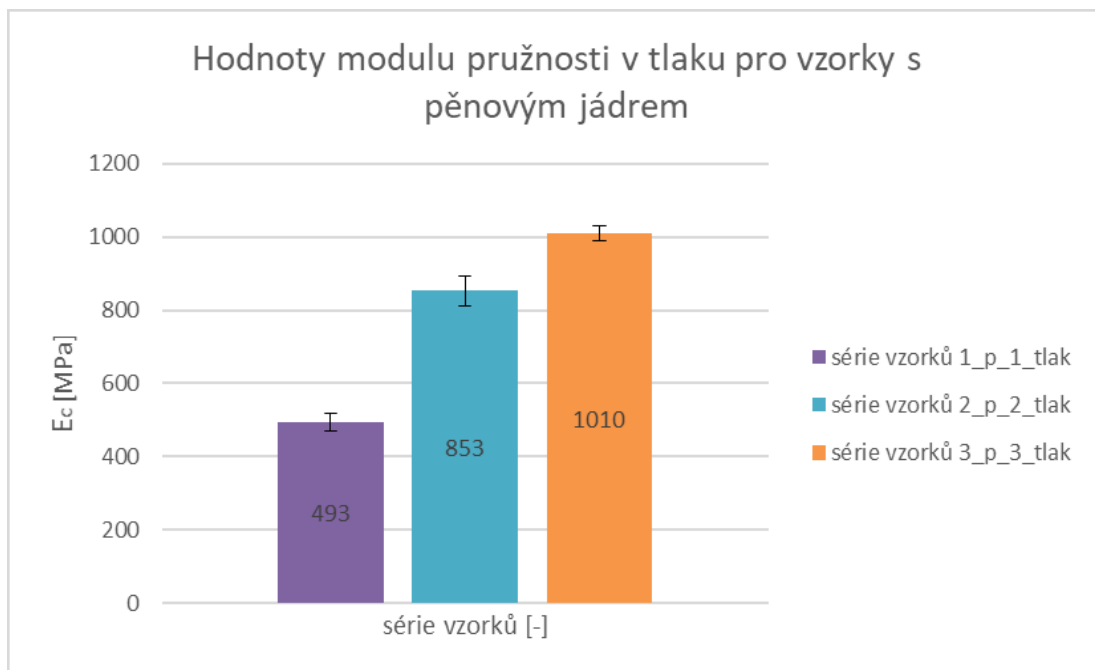
Získaná data ze zkušebního zařízení byla zaznamenána a pro porovnání hodnot mezi jednotlivými skupinami vzorků byla sestavena Tabulka 18. Během vyhodnocení zkoušky tlakem by shledán obdobný výsledek jako v případě zkoušky třibodovým ohybem, a to, že s rostoucím počtem prepregu v krycí vrstvě rostou hodnoty modulu pružnosti v tlaku a mezního napětí. V případě měření veličin jako je poměrná deformace a práce při maximálním ohybovém napětí, lze vyhodnotit pouze u série 3_p_3_tlak. U ostatních sérií byly tyto veličiny získány pouze u některých zkušebních vzorků z dané série, nebo vůbec. Pro názornost výsledků byla data zaznamenána do příslušných grafů včetně směrodatné odchylky.

Tabulka 18 Shrnutí hodnot. [vlastní]

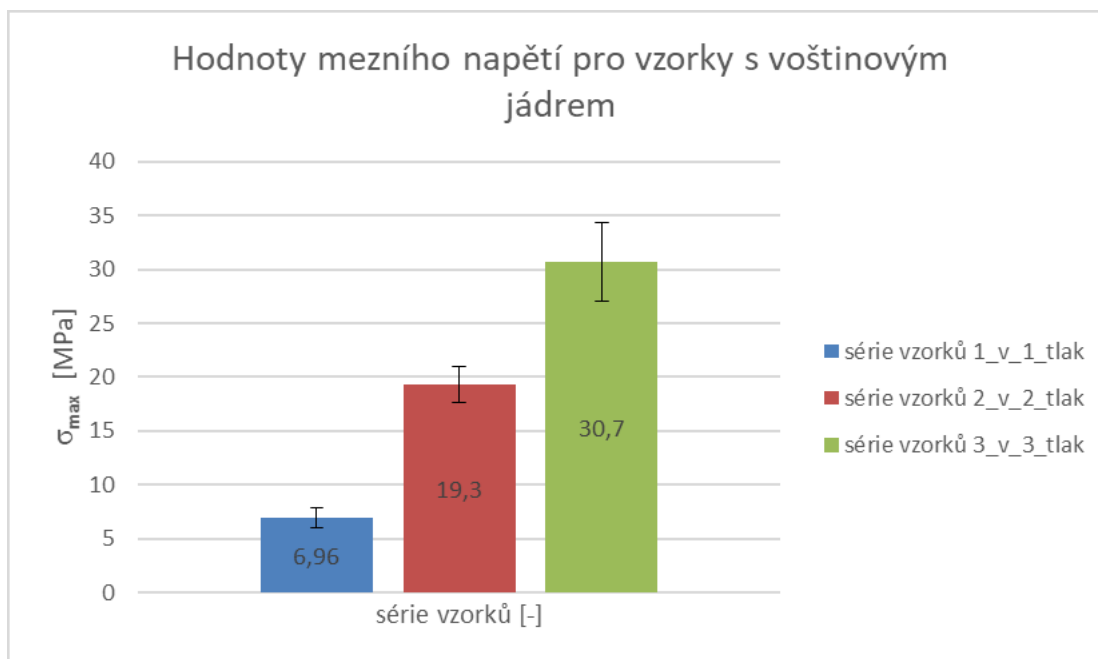
Skupina vzorků	E_c [MPa]	σ_{max} [MPa]	ϵ_{max} [%]	W_{max} [Nmm]
1_v_1_tlak	372	6,96	-	-
2_v_2_tlak	894	19,3	-	-
3_v_3_tlak	1230	30,7	9,2	10635,88
1_p_1_tlak	493	4,81	-	-
2_p_2_tlak	853	11,7	5,6	11697,13
3_p_3_tlak	1010	15,3	4,6	4829,54



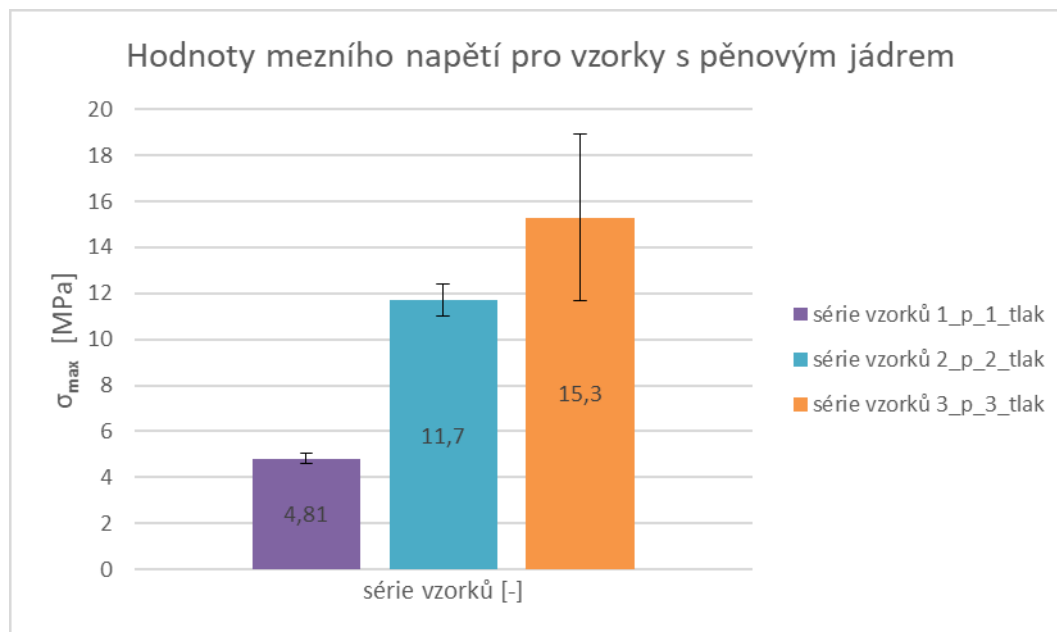
Obr. 47 Hodnoty modulu pružnosti v tlaku pro vzorky s voštinovým jádrem. [vlastní]



Obr. 48 Hodnoty modulu pružnosti v tlaku pro vzorky s pěnovým jádrem. [vlastní]



Obr. 49 Hodnoty mezního napětí pro vzorky s voštinovým jádrem. [vlastní]



Obr. 50 Hodnoty mezního napětí pro vzorky s pěnovým jádrem. [vlastní]

Vzájemná odlišnost naměřených dat v jednotlivých sériích (směrodatná odchylka) pro tlakovou zkoušku byla jako u tříbodového ohybu markantnější u sendvičových prvků s voštinovým jádrem. Jedinou výjimku tvořila hodnota mezního napětí u série 3_p_3_tlak, kdy byla zaznamenána pouze u dvou vzorků z celkového počtu deseti měřených, a proto nelze posoudit její správnost včetně směrodatné odchylky.

ZÁVĚR

Diplomová práce na téma Vliv počtu vnějších vrstev na mechanické vlastnosti sendvičových kompozitních materiálů se soustředila na posouzení chování materiálu s různým počtem vrstev prepregu v krycí vrstvě během zatěžování.

Cílem této práce bylo seznámit se s problematikou z oblasti sendvičových kompozitních materiálů. Teoretická část diplomové práce zahrnovala popis sendvičových kompozitních prvků včetně popisu jednotlivých komponent a možnostech použití různých materiálů. Další částí bylo popsání výrobních technologií vhodných pro výrobu sendvičových výrobků. Poslední kapitola teoretické části obsahovala informace o možnostech testování mechanických vlastností a vzniku defektů při daném způsobu zatěžování sendvičového prvku.

V rámci praktické části byly nejprve vyrobeny zkušební vzorky pro mechanické testování, konkrétně pro zkoušku třibodovým ohybem a zkoušku tlakem. Polotovarem pro vzorky byly sendvičové desky vyrobeny lisováním při teplotě 140 °C. Následným rozřezáním na stolní pile bylo dosaženo požadovaných rozměrů pro danou zkoušku. Pro každou zkoušku vzniklo 6 sérií vzorků po 10 kusech, které kombinovaly druh jádra a 1, 2 nebo 3 krycí vrstvy. Jako jádrový materiál bylo zvoleno nomexové voštinové jádro a PET pěna. Krycí vrstvu tvořil prepreg ze skelné tkaniny a epoxidové pryskyřice.

Zkouška třibodovým ohybem byla provedena dle normy ASTM C393. Způsob vyhodnocení spočíval v porovnávání dat jednotlivých skupin vzorků získaných ze zkušebního zařízení a také ve vizuálním posouzení vzniklých porušení testovaných vzorků. Výsledky prokázaly rostoucí modul pružnosti v ohybu i maximální ohybové napětí s rostoucím počtem vnějších vrstev od jedné do tří. U pěti sérií vzorků docházelo ke zlomení krycí vrstvy a následnému zborcení jádra. Jedinou výjimku tvořila série 3_v_3_oheb, kdy docházelo k delaminaci vnější vrstvy od jádra.

Zkouška tlakem dle normy ASTM C364 prokázala obdobné výsledky v oblasti naměřených hodnot jako zkouška třibodovým ohybem. S rostoucím počtem krycích vrstev narůstala hodnota modulu pružnosti v tlaku i maximálního ohybového napětí. V případě jednovrstvých vzorků s pěnovým jádrem a všech vzorků s jádrem voštinovým se vada projevovala rozpraskáním krycí vrstvy a stlačením jádra. U zbylých sérií se poruchy projevovaly ve formě delaminace, kdy došlo k prasknutí pěnového jádra.

Během měření se hodnoty pro jednotlivé vzorky v rámci série lišily, na což poukazují hodnoty směrodatné odchylky a chyby měření přiložené v tabulkách výsledků.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] KOVAŘÍK, Václav a Pavel ŠLAPÁK. *Boulení a vrásnění sendvičových desek*. Praha: Academia, 1974.
- [2] VRBKA, Jan. *Mechanika kompozitů* [online]. Brno: Fakulta strojního inženýrství VUT v Brně, 2008 [cit. 2018-01-08]. Dostupné z: https://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:HtFmFkYRmJgJ:https://www.vutbr.cz/www_base/priloha.php%3Fdpid%3D83340+&cd=1&hl=cs&ct=clnk&gl=cz
- [3] AGARWAL, Bhagwan D. a Lawrence J. BROUTMAN. *Vláknové kompozity*. Praha: SNTL, 1987.
- [4] Sendvičové konstrukce. *Mmspektrum* [online]. 2001, (1) [cit. 2018-01-08]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/sendvicove-konstrukce.html>
- [5] DAVIES, J. M. *Lightweight sandwich construction*. Malden, MA: Blackwell Science, 2001. ISBN 978-0-632-04027-8.
- [6] MIRACLES D. B., DONALDSON S. L. *ASM Handbook: Volume 21 Composites*. USA: ASM International, Materials Park, OH 44073-0002, 2001. ISBN 0-87170-703-9.
- [7] ZENKERT, Dan. *The handbook of sandwich construction*. Engineering Materials Advisory Services, 1997. ISBN 978-094-7817-961.
- [8] LEHMHUS, Dirk, Matthias BUSSE, Axel S. HERRMANN a K. KAYVANTASH. *Structural materials and processes in transportation*. Weinheim, Germany: Wiley-VCH, 2013. ISBN 978-3527327874.
- [9] Fiberglass Manufacturing. In: *Vetrotextiles* [online]. [cit. 2018-01-08]. Dostupné z: <https://www.vetrotextiles.com/technologies/fiberglass-manufacturing>
- [10] Sandwich technology. In: *Diabgroup* [online]. 2012 [cit. 2018-01-08]. Dostupné z: <http://www.diabgroup.com/en-GB/Knowledge>
- [11] CRIPPS, David. Core Materials. In: *Netcomposites* [online]. [cit. 2018-01-08]. Dostupné z: <https://netcomposites.com/guide-tools/guide/core-materials>

- [12] Gurit: Gurit Guide to Composites. In: *Directindustry* [online]. [cit. 2018-01-08]. Dostupné z: <http://pdf.directindustry.com/pdf/gurit/gurit-guide-to-composites/37817-728312.html>
- [13] Výrobky z hliníkové pěny. *Mmspektrum* [online]. 2007, (12) [cit. 2018-01-08]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/vyrobky-z-hlinikove-peny.html>
- [14] EHRENSTEIN, Gottfried W. *Polymerní kompozitní materiály*. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [15] Všeobecný a základní popis materiálů používaných při výrobě kompozitů. In: *Havel-composites* [online]. 2014 [cit. 2018-01-08]. Dostupné z: <http://www.havel-composites.com/clanky/4-Technologie/74-Vseobecny-a-zakladni-popis-materialu-pouzivanych-pri-vyrobe-kompozitu.html>
- [16] ZEMAN, Lubomír. Kompozity s termoplastickou maticí a automobilový průmysl, 2. část. In: *Plasticportal*[online]. 2014 [cit. 2018-01-08]. Dostupné z: <http://www.plasticportal.cz/cs/kompozity-s-termoplastickou-matrici-a-automobilovy-prumysl-2-cast/c/2653>
- [17] BĚHÁLEK, Luboš. *Polymery: Mechanické vlastnosti polymerů – statické namáhání* [online]. Publi, 2015 [cit. 2018-01-08]. ISBN 978-80-88058-68-7. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/09.html>
- [18] BĚHÁLEK, Luboš. *Polymery: Reaktoplasty* [online]. Publi, 2015 [cit. 2018-01-08]. ISBN 978-80-88058-68-7. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/21.html>
- [19] What Are Prepregs? In: *Fibreglast* [online]. [cit. 2018-01-08]. Dostupné z: http://www.fibreglast.com/product/about-prepregs/Learning_Center
- [20] Prepreg technologie. In: *Form-composite* [online]. [cit. 2018-01-08]. Dostupné z: <http://www.form-composite.com/prepreg>
- [21] Technologie výroby kompozitů. In: *Havel-composites* [online]. 2014 [cit. 2018-01-08]. Dostupné z: <http://www.havel-composites.com/clanky/0-/76-Technologie-jejich-popis-a-schemata.html>
- [22] KOŘÍNEK, Zdeněk. *Kompozity* [online]. 2016 [cit. 2018-01-08]. Dostupné z: <http://kompozity.webnode.cz/>

- [23] Sandwich structures. In: *Admatis* [online]. 2015 [cit. 2018-01-08]. Dostupné z: http://www.admatis.com/eng/competencies_material_science_sandwich.html
- [24] KAŠPAR, Josef. *TRANSFER: Výzkum a vývoj pro letecký průmysl* [online]. Praha, 2006 [cit. 2018-01-08]. ISBN 1801-9315. Dostupné z: <http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:G8D4oQJMvoYJ:www.vzlu.cz/cs/1-s955.pdf+&cd=1&hl=cs&ct=clnk&gl=cz>
- [25] Mechanické vlastnosti. In: *Oddělení povrchového inženýrství Západočeská univerzita v Plzni* [online]. [cit. 2018-01-08]. Dostupné z: https://www.opi.zcu.cz/mechanicke_vlastnosti.pdf
- [26] HAMERNÍK, Jan. Vlastnosti kovových materiálů a jejich zkoušení. In: *Jhamernik* [online]. 2006 [cit. 2018-01-08]. Dostupné z: <http://jhamernik.sweb.cz/vlastnosti.htm>
- [27] Mechanical Testing of Sandwich Panels. In: *Hexcel* [online]. [cit. 2018-01-08]. Dostupné z: http://www.hexcel.com/user_area/content_media/raw/SandwichPanels_global.pdf
- [28] BAUMRUK, Martin. *Mechanika kompozitních materiálů, analytické metody výpočtu stabilitních úloh kompozitních desek a sendvičových panelů a jejich porovnání s MKP*. Praha. ČVUT Fakulta strojní.
- [29] *C393/C393M-11 Standard test method for core shear properties of sandwich constructions by beam flexure*. West Conshohocken: ASTM International, 2012.
- [30] *C364/C364M-07 (reapproved 2012) Standard test method for edgewise compressive strength of sandwich constructions*. West Conshohocken: ASTM International, 2012.
- [31] Delta preg: Toray Group. In: *Delta-tech.it* [online]. Itálie: Delta-Preg S.p.A. Uninominale, 2017 [cit. 2018-04-25]. Dostupné z: http://www.tanso.se/wp-content/uploads/2017/03/CatalogA4_2017Feb.pdf
- [32] AIREX T90. In: *Airexbaltekbanova* [online]. Švýcarsko, 2016 [cit. 2018-04-25]. Dostupné z: <https://www.airexbaltekbanova.com/airex-t90-fire-resistant-foam.html>

- [33] CORMASTER C2: High performance lightweight material from SCHÜTZ for industrial applications. In: *Schuetz-composites* [online]. Německo [cit. 2018-04-25]. Dostupné z: <https://www.schuetz-composites.net/downloads/datenblaetter/datenblatt-schuetz-cormaster-c2/datasheet-schuetz-cormaster-c2-en.pdf?cid=33o>
- [34] FOJTL, Ladislav, Soňa RUSNÁKOVÁ, Milan ŽALUDEK a Vladimír RUSNÁK. Influence of the type and number of prepreg layers on the flexural strength and fatigue life of honeycomb sandwich structures. *Materiali In Tehnologije*. 2015, 49(4), 515-519. DOI: 10.17222/mit.2014.124. ISSN 1580-3414.
- [35] Jen, Y.-M a Chang, L.-Y. Effect of thickness of face sheet on the bending fatigue strength of aluminum honeycomb sandwich beams. *Engineering Failure Analysis* [online]. 2009 [cit. 2018-05-10]. ISSN 13506307.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

PUR	Polyuretan.
EPS	Expandovaný polystyren.
XPS	Extrudovaný polystyren.
PET	Polyethylentereftalát.
PVC	Polyvinylchlorid.
SAN	Styren akrylonitril.
PAN	Polyakrylonitril.
ρ	Hustota [kg/m^3].
E	Modul pružnosti [MPa].
UP-R	Nenasycená polyesterová pryskyřice.
VE-R	Vinylesterová pryskyřice.
EP-R	Epoxidová pryskyřice.
PF-R	Fenolická pryskyřice.
tzv.	Takzvaně.
RTM	Resin transfer moulding.
VARTM	Vacuum assisted resin transfer moulding.
LRTM	Light resin transfer moulding.
M_o	Ohybový moment [MPa].
F	Síla [N].
l	Délkový rozměr [mm].
σ_o	Ohybové napětí [MPa].
W_o	Modul průřezu v ohybu [mm^3].
a	Vzdálenost [mm].
σ_{max}	Maximální ohybové napětí [MPa].

ε_{\max}	Deformace při σ_{\max} [%].
W_{\max}	Práce při σ_{\max} [Nmm].
E_r	Modul pružnosti v ohybu [MPa].
E_c	Modul pružnosti v tlaku [MPa].

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1 Sendvičový systém. [23]</i>	12
<i>Obr. 2 Pěnové jádrové materiály. [10]</i>	14
<i>Obr. 3 Voština. [6]</i>	16
<i>Obr. 4 Balsový jádrový materiál. [10]</i>	17
<i>Obr. 5 Druhy vazeb tkanin. [15]</i>	20
<i>Obr. 6 Prepreg. [19]</i>	24
<i>Obr. 7 Princip kontinuální výroby sendvičových panelů s pěnovým jádrem. [5]</i>	26
<i>Obr. 8 Ruční kladení. [12]</i>	27
<i>Obr. 9 Autokláv. [12]</i>	28
<i>Obr. 10 Technologie RTM. [12]</i>	29
<i>Obr. 11 Vakuová infuze. [12]</i>	30
<i>Obr. 12 Poruchy sendviče. [27]</i>	32
<i>Obr. 13 Tříbodový ohyb (tříbodový ohyb). [17]</i>	33
<i>Obr. 14 Napětí a ohybový moment (tříbodový ohyb). [14]</i>	34
<i>Obr. 15 Čtyřbodový ohyb. [17]</i>	34
<i>Obr. 16 Napětí a ohybový moment (čtyřbodový ohyb). [14]</i>	35
<i>Obr. 17 Odlup pomocí navíjecího bubnu. [17]</i>	36
<i>Obr. 18 Odlup za pomoci tahu. [17]</i>	37
<i>Obr. 19 Odlup za pomoci tlaku vzduchu. [17]</i>	37
<i>Obr. 20 Prepreg VV320P - DT806R. [vlastní]</i>	43
<i>Obr. 21 Voština. [vlastní]</i>	44
<i>Obr. 22 PET pěna. [32]</i>	45
<i>Obr. 23 Vyhřívání lis. [vlastní]</i>	46
<i>Obr. 24 Řezání vzorků. [vlastní]</i>	47
<i>Obr. 25 Čelisti pro zkoušku tříbodovým ohybem. [vlastní]</i>	48
<i>Obr. 26 Závislost napětí na deformaci – série vzorků 1_v_1_ohyb. [vlastní]</i>	50
<i>Obr. 27 Závislost napětí na deformaci – série vzorků 2_v_2_ohyb. [vlastní]</i>	51
<i>Obr. 28 Závislost napětí na deformaci – série vzorků 3_v_3_ohyb. [vlastní]</i>	52
<i>Obr. 29 Závislost napětí na deformaci – série vzorků 1_p_1_ohyb. [vlastní]</i>	53
<i>Obr. 30 Závislost napětí na deformaci – série vzorků 2_p_2_ohyb. [vlastní]</i>	54
<i>Obr. 31 Závislost napětí na deformaci – série vzorků 3_p_3_ohyb. [vlastní]</i>	55

<i>Obr. 32 Porušení vzorku 1_v_1_ohyb (vlevo) a porušení vzorku 3_v_3_ohyb (vpravo). [vlastní]</i>	<i>56</i>
<i>Obr. 33 Zkušební vzorky (shora: vzorek skupiny 1_p_1_ohyb, 2_p_2_ohyb a 3_p_3_ohyb). [vlastní]</i>	<i>56</i>
<i>Obr. 34 Hodnoty modulu pružnosti v ohybu pro vzorky s voštinovým jádrem. [vlastní]</i>	<i>58</i>
<i>Obr. 35 Hodnoty modulu pružnosti v ohybu pro vzorky s pěnovým jádrem. [vlastní]</i>	<i>58</i>
<i>Obr. 36 Hodnoty mezního napětí pro vzorky s voštinovým jádrem. [vlastní]</i>	<i>59</i>
<i>Obr. 37 Hodnoty mezního napětí pro vzorky s pěnovým jádrem. [vlastní]</i>	<i>59</i>
<i>Obr. 38 Čelisti pro zkoušku tlakem. [vlastní]</i>	<i>60</i>
<i>Obr. 39 Závislost napětí na deformaci – série vzorků 1_v_1_tlak. [vlastní]</i>	<i>61</i>
<i>Obr. 40 Závislost napětí na deformaci – série vzorků 2_v_2_tlak. [vlastní]</i>	<i>62</i>
<i>Obr. 41 Závislost napětí na deformaci – série vzorků 3_v_3_tlak. [vlastní]</i>	<i>63</i>
<i>Obr. 42 Závislost napětí na deformaci – série vzorků 1_p_1_tlak. [vlastní]</i>	<i>64</i>
<i>Obr. 43 Závislost napětí na deformaci – série vzorků 2_p_2_tlak. [vlastní]</i>	<i>65</i>
<i>Obr. 44 Závislost napětí na deformaci – série vzorků 3_p_3_tlak. [vlastní]</i>	<i>66</i>
<i>Obr. 45 Průběh zatěžování vzorku série číslo 3_v_3_tlak. [vlastní]</i>	<i>67</i>
<i>Obr. 46 Poškození vzorků (zleva: série 1_p_1_tlak, 2_p_2_tlak a 3_p_3_tlak). [vlastní]</i>	<i>68</i>
<i>Obr. 47 Hodnoty modulu pružnosti v tlaku pro vzorky s voštinovým jádrem. [vlastní]</i>	<i>69</i>
<i>Obr. 48 Hodnoty modulu pružnosti v tlaku pro vzorky s pěnovým jádrem. [vlastní]</i>	<i>70</i>
<i>Obr. 49 Hodnoty mezního napětí pro vzorky s voštinovým jádrem. [vlastní]</i>	<i>70</i>
<i>Obr. 50 Hodnoty mezního napětí pro vzorky s pěnovým jádrem. [vlastní]</i>	<i>71</i>

SEZNAM TABULEK

<i>Tabulka 1 Porovnání vlastností vybraných vláken. [14]</i>	21
<i>Tabulka 2 Parametry vyhřívaného lisu. [vlastní]</i>	45
<i>Tabulka 3 Tabulka nařezaných vzorků. [vlastní]</i>	47
<i>Tabulka 4 parametry zkušebního stroje. [vlastní]</i>	48
<i>Tabulka 5 Naměřená data – série vzorků 1_v_1_ohyb. [vlastní]</i>	49
<i>Tabulka 6 Naměřená data – série vzorků 2_v_2_ohyb. [vlastní]</i>	50
<i>Tabulka 7 Naměřená data – série vzorků 3_v_3_ohyb. [vlastní]</i>	51
<i>Tabulka 8 Naměřená data – série vzorků 1_p_1_ohyb. [vlastní]</i>	52
<i>Tabulka 9 Naměřená data – série vzorků 2_p_2_ohyb. [vlastní]</i>	53
<i>Tabulka 10 Naměřená data – série vzorků 3_p_3_ohyb. [vlastní]</i>	54
<i>Tabulka 11 Shrnutí hodnot. [vlastní]</i>	57
<i>Tabulka 12 Naměřená data – série vzorků 1_v_1_tlak. [vlastní]</i>	61
<i>Tabulka 13 Naměřená data – série vzorků 2_v_2_tlak. [vlastní]</i>	62
<i>Tabulka 14 Naměřená data – série vzorků 3_v_3_tlak. [vlastní]</i>	63
<i>Tabulka 15 Naměřená data – série vzorků 1_p_1_tlak. [vlastní]</i>	64
<i>Tabulka 16 Naměřená data – série vzorků 2_p_2_tlak. [vlastní]</i>	65
<i>Tabulka 17 Naměřená data – série vzorků 3_p_3_tlak. [vlastní]</i>	66
<i>Tabulka 18 Shrnutí hodnot. [vlastní]</i>	69

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha P1: Naměřená data – zkouška ohybem.

Příloha P2: Naměřená data – zkouška tlakem.

Příloha P3: Data z technického listu – prepreg DELTATECH VV320P - DT806R – 37.

Příloha P4: Technický list – voštinové jádro.

Příloha P5: Technický list – pěnové jádro.

PŘÍLOHA P I: NAMĚŘENÁ DATA – ZKOUŠKA OHYBEM

Série vzorků	E_r [MPa]	σ_{max} [MPa]	ϵ_{max} [%]	W_{max} [Nmm]	Série vzorků	E_r [MPa]	σ_{max} [MPa]	ϵ_{max} [%]	W_{max} [Nmm]
1_v_1_ohyb	4280	19,8	1,1	268,12	1_p_1_ohyb	2250	14,8	-	-
	4590	21,4	1	283,36		2270	13,5	-	-
	4310	23,8	1,9	428,33		2110	14,1	-	-
	4150	26,9	1,3	394,18		1720	10,3	-	-
	3980	-	0,8	264,91		1860	10,5	-	-
	4590	30,8	1	403,96		1960	10,5	-	-
	4430	29,7	2,1	612,34		2020	13,9	-	-
	4370	25,5	1,7	445,52		1940	13	-	-
	4600	24,9	1,4	406,92		1840	10,9	-	-
	4500	21,4	1,6	365,32		1960	13,3	-	-
2_v_2_ohyb	6070	37,8	4	1806,1	2_p_2_ohyb	3010	20	8,1	2420,76
	6060	34,6	5,1	2095,65		2740	20,3	-	-
	6240	36,8	2,8	1465,04		2410	19,5	-	-
	6970	61,9	1,6	1151,9		2950	19,9	-	-
	6970	59,2	2	1234,84		3170	21,5	11,8	3465,56
	6190	33,1	4,4	1595,48		3380	24,3	-	-
	6870	56,4	1,7	1087,07		2470	20,6	-	-
	5850	35,8	5,1	1910,76		2960	22,3	-	-
	7430	61,1	1,7	1141,8		3150	21,2	-	-
	7270	-	1,2	1133,04		3490	24,6	-	-
3_v_3_ohyb	12900	133	2,7	5776,72	3_p_3_ohyb	2780	21,7	-	-
	12600	86,2	-	-		3010	22,2	-	-
	10200	40,2	2,4	1463,67		3100	22,7	-	-
	11800	100	7	4645,94		3320	27,5	-	-
	7910	49,9	3,3	2574,5		3480	28,8	-	-
	7690	51,7	4,6	3929,26		3050	22,6	-	-
	7930	48,8	2,1	1492,86		3540	29,6	-	-
	10100	-	0,8	759,23		3460	29,2	-	-
	12000	115	3,2	5431,84		2850	22,8	-	-
	10700	93,4	6,9	5281,38		3470	29,4	-	-

PŘÍLOHA P II: NAMĚŘENÁ DATA – ZKOUŠKA TLAKEM

Série vzorků	E_c [MPa]	σ_{max} [MPa]	ϵ_{max} [%]	W_{max} [Nmm]	Série vzorků	E_c [MPa]	σ_{max} [MPa]	ϵ_{max} [%]	W_{max} [Nmm]
1_v_1_tlak	391	5,28	-	-	1_p_1_tlak	506	4,41	-	-
	385	6,61	-	-		457	4,81	-	-
	468	8,29	-	-		450	4,87	-	-
	407	7,27	-	-		509	5,05	-	-
	321	7,45	-	-		495	4,66	-	-
	278	7,22	-	-		492	4,88	-	-
	430	5,8	-	-		500	4,55	-	-
	380	7,54	-	-		480	5,1	-	-
	254	6,44	-	-		527	4,78	-	-
	402	7,73	-	-		510	4,94	-	-
2_v_2_tlak	851	19,5	-	-	2_p_2_tlak	902	12	2,3	3435,99
	713	16,3	-	-		795	10,8	13,4	35715,72
	875	18,8	-	-		905	-	3,1	3125,75
	985	20,2	-	-		838	12,2	-	-
	996	22,7	-	-		890	10,9	4	9810,78
	877	19,7	-	-		840	12,8	5	6397,42
	855	17,7	-	-		883	11,9	-	-
	763	19,4	-	-		850	11,4	-	-
	974	19,5	-	-		789	11,3	-	-
	1050	19,7	-	-		840	12,2	-	-
3_v_3_tlak	1370	34	8,8	11005,29	3_p_3_tlak	1020	-	4,3	4331,18
	1380	-	7,9	6238,31		1000	-	4,6	4731,53
	1340	32,1	-	-		1010	-	4,4	4083,28
	1340	35	-	-		1020	-	4,5	5314,41
	1100	25,1	-	-		1040	-	4,3	4205,83
	1080	29,4	-	-		1000	-	4,5	4697,87
	1050	32,2	-	-		1040	-	4,5	4785,34
	1360	34,4	11	14664,05		977	17,7	4,9	6657,89
	1240	28,1	-	-		1000	12,6	5,4	4849,69
	1000	26,2	-	-		1020	-	4,4	4638,43

PŘÍLOHA P III: DATA Z TECHNICKÉHO LISTU – PREPREG

DELTA TECH VV320P - DT806R – 37

www.deltatech.it



Fabric name ¹ Nome tessuto ¹	FAW Grammatura (g/m ²)	Weave Armatura	Weight rate Ripartizione del peso (warp/weft) (ordito/trama)	Yarn type Tipo di filato (warp/weft) (ordito/trama)	Warp Ordito (ends/cm) (fil/cm)	Weft Trama (ends/cm) (fil/cm)	Std width Altezza std (cm)	Std roll length/ Lung. std rotolo ¹ (m)	Laminato Thickness ² Spessore lamina ² (mm)
E GLASS BALANCED FABRICS - TESSUTI BILANCIATI DI VETRO E									
V050P	50	Plain - Tela	55/45	EC5 11 tex	25,0	20,0	110	50	0,06
V105P	106	Plain - Tela	51/49	EC7 22 tex/ EC7 22 tex	24,0	23,0	126	50	0,11
V200T	195	Twill 2x2	50/50	EC9 68 tex	14,3	14,3	120	50	0,16
V300S	300	BH Satin Raso 8 fili	52/48	EC9 68 tex	22,9	21,1	100	50	0,24
V320P	320	Plain - Tela	50/50	Roving 300 tex	5,3	5,3	120	33	0,26
V320T	320	Twill 2x2	50/50	Roving 300 tex	5,3	5,3	120	33	0,26
V345P	345	Plain - Tela	51/49	Roving 320 tex	5,5	5,3	120	33	0,28
V345T	345	Twill 2x2	51/49	Roving 320 tex	5,5	5,3	120	33	0,28
V380T	380	Twill 2x2	50/50	Roving 300 tex	6,4	6,3	120	33	0,31
V580T	580	Twill 2x2	50/50	Roving 600 tex/ Roving 2x600 tex	4,6	2,5	110	33	0,48
V600S	600	BH Satin Raso 8 fili	50/50	EC13 300 tex	10,0	10,0	125	25	0,49
V770S	770	4H Satin Raso liscio	50/50	Roving 1200 tex	3,2	3,2	100	33	0,63
V880T	880	Twill 2x2	50/50	Roving 1200 tex	3,6	3,7	120	25	0,71
E GLASS UNIDIRECTIONAL FABRICS - TESSUTI UNIDIREZIONALI DI VETRO E									
V190U	190	UD 4H Satin Raso liscio	80/20	EC9 68 tex/ EC9 34 tex	22,5	10,5	100	50	0,15
V305S	305	UD 4H Satin Raso liscio	87/13	EC9 136 tex/ EC9 34 tex	19,5	11,0	100	50	0,23
V430U	425	Plain - Tela	90/10	EC9 5x136 tex/ EC9 68 tex	5,5	6,3	124	33	0,35
ALUMINIUM COATED GLASS FABRICS - TESSUTI DI VETRO ALLUMINIZZATI									
V200TM	190	Twill 2x2	50/50	EC9 68 tex	14,0	14,0	127	50	0,17
V290TM	290	Twill 2x2	50/50	EC9 3x68 tex/ EC11 204 tex	7,0	7,0	100	50	0,25
OTHER FIBRES FABRICS - TESSUTI CON ALTRE FIBRE									
BB660T	630	Twill 1x3	67/33	Basalt 600 tex/ Basalt 300 tex	6,9	6,9	127	25	0,48
INN120P	120	Plain - Tela	50/50	Inneagra S - 1045 dtex	5,8	5,8	122	50	0,26
PP090 (Pud Pj)	90	Plain - Tela	50/50	PA 6.6 - 235 dtex	18,0	18,0	125	50	0,15
V300S2	300	BH Satin Raso 8 fili	50/50	S2 Glass - 66 tex	22,5	22,5	127	50	0,26
Z2300T	300	Twill 2x2	50/50	Zylon HM - 164 tex	9,1	9,1	125	50	0,36
HYBRID FABRICS - TESSUTI IBRIDI									
GA210T	210	Twill 2x2	50/50	HS 3K+HM Aramid 130 tex (1:1)/ HS 3K+HM Aramid 130 tex (1:1)	6,4	6,4	120	50	0,27
GP200P	200	Plain - Tela	49/51	HS Carbon 3K/ Black PET 1670 dtex	4,8	6,0	100	50	0,25
GV281T	280	Twill 2x2	50/50	HS 3K+Roving 300 tex (1:1)/ HS 3K+Roving 300 tex (1:1)	5,4	5,6	100	50	0,28
GV410U	410	Plain - Tela	98/02	HS Carbon 12K/ EC9 Glass 34 tex	5,0	3,0	100	50	0,41
GV510U	510	Plain - Tela	94/06	HS Carbon 24K/ EC9 Glass 136 tex	3,0	2,2	100	33	0,51

¹ Standard fabric types and width are given in this catalogue; more options are available upon request.
I tessuti e le altezze in questo catalogo fanno riferimento a prodotti standard; altre opzioni sono disponibili su richiesta.

² Thickness value is approximate and depends on the resin content in the laminato.
Lo spessore della lamina ha valore indicativo e dipende dal contenuto di resina nel laminato.

Epoxy matrix systems

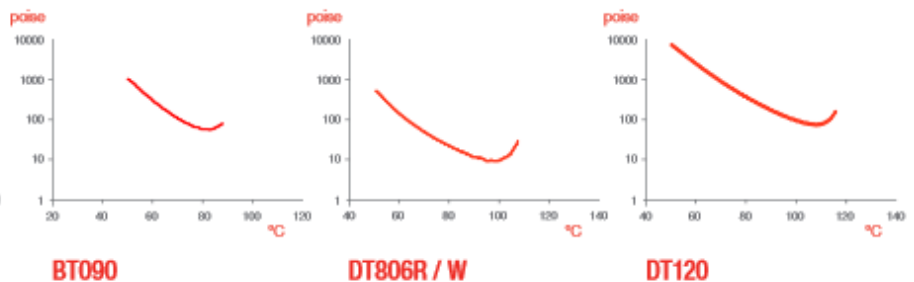
Sistemi resinosi epossidici

	LOW TEMPERATURE - BASSA TEMPERATURA		FAST CURING - CICLO RAPIDO	
	BT090	TR23	DT806R / DT806W	DT121R
Features and Applications Settori di applicazione e caratteristiche	Low temperature curing system Components from low cost/low temperature moulds. <i>Sistema a bassa temperatura di cura</i> Componenti da stampi per basse temperature.	Tooling Systems Also available higher Tg variants (TR33S and TR43) and longer outlife product (TR25). <i>Sistemi per stampi</i> Disponibili varianti a Tg maggiore (TR33S e TR43) e versione con maggiore vita di banco (TR25).	Low viscosity system for Out of autoclave processing and fast press moulding. DT806W is the tackier version. <i>Sistema a bassa viscosità per processi fuori autoclave e cura rapida in pressa.</i> DT806W la versione con più tack.	Fast Curing Resin for Visual Cosmetic Applications For autoclave and press moulding. Aesthetic carbon fabrics 200 to 400 g/m ² . <i>Sistema a cura rapida per applicazioni cosmetiche</i> Per autoclave e pressa. Tessuti estetici di carbonio da 200 a 400 g/m ² .
Viscosity ⁽¹⁾ Viscosità ⁽¹⁾	Low Bassa	Low Bassa	Low Bassa	Medium-high Medio-alta
Cure Temperature Temperatura di cura (°C)	45 ÷ 110	Preliminary cure: 45 ÷ 60 25 h @ 45°C 10 h @ 60°C Post-cure: up to 200°C	65 ÷ 140 16 h @ 65°C 5 h @ 80°C 1 h @ 120°C	75 ÷ 135 (Autoclave) 120 ÷ 150 (Press moulding/pressa)
Gel time ⁽²⁾ (min @ °C) ⁽²⁾	4÷8 @ 90°C	Not Applicable for Tooling Systems. <i>Non applicabile per i sistemi da stampi.</i>	50÷60 @ 80°C 15÷19 @ 100°C 4÷6 @ 120°C 2÷3 @ 130°C	55÷65 @ 80°C 14÷18 @ 100°C 5÷7 @ 120°C
Tg ⁽³⁾ / Cure Cycle Tg ⁽³⁾ / Ciclo di cura	90÷95°C ⁽³⁾ / 180 min @ 70°C 100÷110°C ⁽³⁾ / 40 min @ 90°C 120÷130°C ⁽³⁾ / 20 min @ 120°C	205°C ⁽³⁾ with 4 h @ 200°C post-cure (250°C ⁽³⁾ maximum Tg for TR43)	90°C÷100°C ⁽³⁾ / 5 h @ 80°C 120°C÷130°C ⁽³⁾ / 1 h @ 120°C	90°C ⁽³⁾ / 12 h @ 80°C 120°C ⁽³⁾ / 90 min @ 120°C
Shelf Life Vita di banco	1÷2 days (gg) @ 20°C 60 days (gg) @ -18°C	2÷3 days (gg) @ 20°C 180 days (gg) @ -18°C Increased shelf life variant TR25 available (4 to 5 days) <i>Disponibile versione con vita di banco aumentata: TR25 (4÷5 giorni)</i>	21 days (gg) @ 20°C 365 days (gg) @ -18°C	21 days (gg) @ 20°C 365 days (gg) @ -18°C

Viscosity profile

Curve di viscosità

(Constant heating rate 2°C/min
Riscaldamento costante 2°C/min)



PŘÍLOHA P IV: TECHNICKÝ LIST – VOŠTINOVÉ JÁDRO

CORMASTER C2

High performance lightweight material from SCHÜTZ for industrial applications.



CORMASTER
ADVANCED COMPOSITES



ADVANTAGES

- Excellent cost-benefit ratio.
- Superior mechanical properties with high strength to weight ratios
- High dimensional stability under heat and moisture
- High temperature capabilities, service temperature up to 180°C
- Product uniformity and exceptional resin to paper cohesion

DELIVERY TIME

- A lot of CORMASTER C2 honeycombs types are available on stock
- **When the honeycomb is on stock:** delivery time never exceeds 10 working days
 - **When the honeycomb has to be manufactured:** delivery time never exceeds 20 working days

MATERIAL

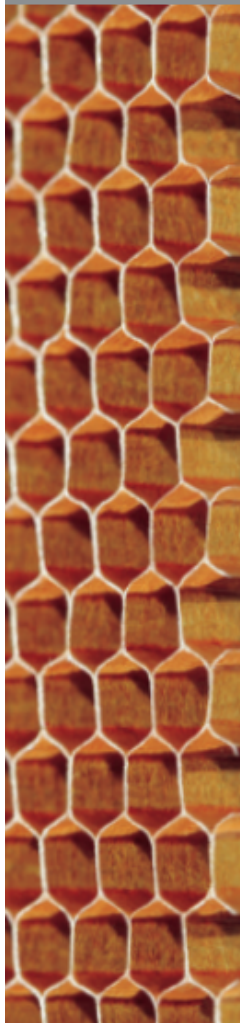
- non metallic structures made from NOMEX® T722 paper sheets
- bonded together and coated with a phenolic resin



APPLICATION

- Main structural sandwich applications in industrial applications (f.e. automotive, naval, rail, transport and sports industries)

CORMASTER C2

Technical data



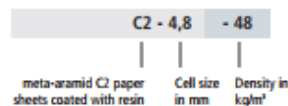
CORMASTER TYPE	Compressive strength (MPa)		Shear strength (MPa)		Shear modulus (MPa)		
	bare	stabilized	L	W	L	W	
HEXAGONAL CONFIGURATION							
 C2 - 3,2	- 48	1,8	2,0	1,2	0,7	36,0	24,0
	- 64	3,0	3,4	1,6	0,85	50,0	35,0
	- 80	4,4	4,6	1,75	1,0	56,0	32,0
	- 123	9,9	10,0	3,0	2,0	91,0	65,0
C2 - 4,8	- 32	0,8	0,9	0,55	0,32	18,0	13,0
	- 48	1,8	2,0	1,12	0,54	37,0	23,0
	- 64	3,0	3,2	1,6	0,85	50,0	27,0
	- 96	6,5	6,8	2,35	1,3	74,0	36,0
C2 - 6,4	- 32	0,6	0,7	0,5	0,32	17,0	13,0
	- 50	1,9	2,0	1,1	0,53	37,0	16,0
	- 64	3,2	3,3	1,35	0,72	46,0	23,0
C2 - 9,5	- 32	0,6	0,7	0,6	0,3	15,0	12,0
	- 48	1,3	1,57	0,82	0,4	28,8	18,5
OVEREXPANDED CONFIGURATION							
 C2 - 4,8	- 29 OX	0,5	0,6	0,25	0,3	8,0	12,0
	- 48 OX	1,7	2,0	0,5	0,7	15,0	25,0
C2 - 6,4	- 48 OX	1,7	2,0	0,5	0,55	12,5	23,0
	- 56 OX	2,0	2,1	0,6	0,7	16,0	29,0

Honeycombs density: the allowable tolerance is +/- 13% from the nominal density.
These mechanical properties are only representative. If required, specification minima must be confirmed by SCHÜTZ in writing.

Dr. H. J. SCHÜTZ & CO. KGaA, SCHÜTZSTRASSE 12, 56242 SELTERS



To submit an offer we need the CORMASTER type with cell size and density together with the dimensions (width, length and thickness) of the required honeycomb product. Please notice, that it is very important to consider the different properties for L- and W-Shear. Do not hesitate to contact us, if you have particular requirements.



SCHÜTZ GmbH & Co. KGaA
Schützstraße 12
D-56242 Selters
Phone + 49 (0) 2626/77- 221
Fax + 49 (0) 2626/77- 431
cor.order@schuetz.net
www.schuetz.net

PŘÍLOHA P V: TECHNICKÝ LIST – PĚNOVÉ JÁDRO

AIREX®



AIREX® T90

GM-TDS-122

The Fire Resistant Structural Foam

DATA SHEET 11.2016 - Replaces 09.2016

DESCRIPTION



AIREX® T90 is a closed-cell, thermoplastic and recyclable polymer foam with excellent fire, smoke & toxicity (FST) properties.

It has very good mechanical properties and an extraordinary resistance to fatigue, is chemically stable, UV-resistant and has negligible water absorption. It is thermally stable during high temperature processing and post curing. T90 is designed for easy use with all resin systems and processing technologies.

AIREX® T90 is the ideal core material for structural sandwich applications requiring high fire resistance.

CHARACTERISTICS

- Superior fire resistance (FAR 25.853; NF 16-101; DIN 5510)
- Outstanding fatigue strength
- Excellent long term thermal stability up to 100 °C (212 °F)
- Best thermal stability in process up to 150 °C (302 °F)
- Good thermal insulation
- Highly consistent material properties
- Easy to process with all types of resin and lamination processes
- Good adhesion (skin-to-core bond)
- Very high chemical stability
- No water absorption, no after-expansion, no outgassing

APPLICATIONS

- **Road and Rail:** Floors, sidewalls, front ends, interiors, roofs, engine covers
- **Marine:** Decks, interiors, superstructures
- **Industrial:** Covers, containers, x-ray tables, sporting goods
- **Architecture and Construction:** Roofs, claddings, domes, portable building

PROCESSING

- Contact molding (hand/spray)
- Vacuum infusion
- Resin infusion / injection (VARTM / RTM)
- Adhesive bonding
- Pre-preg processing
- Compression molding (GMT, SMC)
- Thermoforming

www.airexbaltekbanova.com

Europe | Middle East | India | Africa
Airex AG
5643 Sins, Switzerland
T +41 41 789 66 00 | F +41 41 789 66 60
corematerials@3AComposites.com

North America | South America
Baltik Inc.
High Point, NC 27261, USA
T +1 336 398 1900 | F +1 336 398 1901
corematerials.americas@3AComposites.com

Asia | Australia | New Zealand
3A Composites (China) Ltd.
201201 Shanghai, China
T +86 21 585 86 006 | F +86 21 338 27 298
corematerials.asia@3AComposites.com

AIREXBALTEKBANOVA

MECHANICAL PROPERTIES							
Typical properties for AIREX® T90		Unit (metric)	Value ¹⁾	T90.60	T90.100	T90.150	T90.210
Density	ISO 845	kg/m ³	Average <i>Typ. range</i>	65 60 - 70	110 105 - 115	145 140 - 150	210 200 - 220
Compressive strength perpendicular to the plane	ISO 844	N/mm ²	Average <i>Minimum</i>	0.80 0.7	1.4 1.2	2.2 2.0	3.8 3.2
Compressive modulus perpendicular to the plane	ISO 844	N/mm ²	Average <i>Minimum</i>	50 35	80 70	105 95	170 145
Tensile strength perpendicular to the plane	ASTM C297	N/mm ²	Average <i>Minimum</i>	1.5 1.2	2.2 1.6	2.7 2.2	3.0 2.4
Tensile modulus perpendicular to the plane	ASTM C297	N/mm ²	Average <i>Minimum</i>	85 70	120 90	170 140	225 180
Shear strength	ISO 1922	N/mm ²	Average <i>Minimum</i>	0.46 0.4	0.8 0.7	1.2 1.1	1.85 1.5
Shear modulus	ISO 1922	N/mm ²	Average <i>Minimum</i>	12 10.5	20 18	30 26	50 44
Shear elongation at break	ISO 1922	%	Average <i>Minimum</i>	25 15	10 5	8 4	5 3
Thermal conductivity at 10°C	EN 12667	W/m.K	Average	0.037	0.035	0.038	0.045
Standard sheet	Width ²⁾	mm ± 5		1220	1220	1220	1220
	Length ²⁾	mm ± 5		2440	2440	2440	2440
	Thickness	mm ± 0.5		5 to 100	5 to 100	5 to 100	5 to 100

Finishing Options, other dimensions and closer tolerances upon request

¹⁾ Minimum values acc. DNV definition; test sample thickness 20 mm except thermal conductivity (50mm)

²⁾ Alternative width 610 mm, alternative length 1220 mm

Fire performance	Standard		T90.60	T90.100	T90.150	T90.210
Aircraft	FAR/CS 25.853/ABD0031	Flammability (60s)	passed	passed	passed	passed
	FAR/CS 25.853/ABD0031	Smoke density	passed	passed	passed	passed
	FAR/CS 25.853/ABD0031	Toxicity	passed	passed	passed	passed
Rail	DIN 5510/2 / DIN 54837	Burning behavior	S4	S4	S4	S4
	DIN 5510/2 / DIN 54837	Smoke density	SR2	SR2	SR2	SR2
	DIN 5510/2 / DIN 54837	Dripping	ST2	ST2	ST2	ST2
	DIN 5510/2 / DIN 53438-2	Edge flaming	S1/K1	S1/K1	S1/K1	tbd
	DIN 5510/2	Toxicity (FED)	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Rail	NF 16-101	Flammability	M2	M1	M1	M1
	NF 16-101	Smoke density	F1	F1	F1	F1
Rail	EN 45545-2	Sandwich	HL3 achievable, depending on sandwich design ³⁾			
		Core alone	HL3 achievable ⁴⁾			
Building & Construction	DIN 4102-1	Material Class	tbd	B1	tbd	B1
Building & Construction	EN 13501-1	Fire reaction behaviour		C		C
	EN 13501-1	Smoke production	tbd	s2	tbd	s2
	EN 13501-1	Flaming droplets		d0		d0

³⁾ Certificates available for specific sandwich designs

⁴⁾ Depending on density, thickness and application; test results on request

The data provided gives approximate values for the nominal density and DNV minimum values according to DNV type approval certificate.

The information contained herein is believed to be correct and to correspond to the latest state of scientific and technical knowledge. However, no warranty is made, either expressed or implied, regarding its accuracy or the results to be obtained from the use of such information. No statement is intended or should be construed as a recommendation to infringe any existing patent.

GM-TDS-122