

Studium vlivu bimodularity laminátových struktur na jejich únosnost

Bc. Kateřina Vrabcová

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. Kateřina Vrabcová**
Osobní číslo: **T16274**
Studijní program: **N3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Výrobní inženýrství**
Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Studium vlivu bimodularity laminátových struktur na jejich únosnost**

Zásady pro vypracování:

1. Sestavte literární studii na dané téma
2. Vytvořte program pro výpočet ohybové tuhosti v závislosti na materiálových a geometrických parametrech sendvičové struktury
3. Na základě vytvořeného programu stanovte teoretické závislosti stupně bimodularity nosných laminátových potahů, počtu lamin a tuhosti jádra
4. Experimentálně vyšetřete hodnoty ohybové tuhosti s vyloučením vlivu indentace v místech podpor a vlivu smykové poddajnosti jádra
5. Dosažené výsledky vyhodnoťte

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

Dle doporučení vedoucího diplomové práce.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Oldřich Šuba, CSc.**
Ústav výrobního inženýrství

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

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

Ve Zlíně dne 1. 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 užit 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 15.5.2018

.....
K. Vrabcová

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 nevydělčně 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 přihlídně k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

ABSTRAKT

Diplomová práce je zaměřena na teoretické, modelové a experimentální studium ohybové tuhosti sendvičové struktury s vlivem bimodularity. Jsou stanoveny hodnoty ohybových tuhostí struktur na základě analytických výpočtů, konečněprvkových modelů, srovnávaných s experimentálně stanovenými hodnotami ohybových tuhostí pomocí speciálně upravených tlakových a čtyřbodových ohybových testů.

Klíčová slova: laminát, sendvičová struktura, mechanické zkoušky, bimodularita

ABSTRACT

This thesis is focused on the theoretical, model and experimental study of bending stiffness of sandwich structure with the influence of bimodularity. The bending stiffness values of structures are determined based on analytical calculations and finite element models compared to experimentally determined bending stiffness values using specially adapted pressure and four point bending tests.

Keywords: laminated plastic, sandwich structure, mechanical test, bimodular

Ráda bych poděkovala doc. Ing. Oldřichu Šubovi CSc. za odborné vedení, konzultace, trpělivost a ochotu, kterou mi v průběhu zpracování diplomové práce věnoval. Zvláštní poděkování patří doc. Dr. Ing. Vladimíru Patovi za pomoc a čas při měření vzorků.

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

OBSAH

ÚVOD	10
TEORETICKÁ ČÁST	11
1 SENDVIČOVÉ STRUKTURY	12
1.1 VNĚJŠÍ VRSTVY	14
1.1.1 Kovové materiály	14
1.1.2 Vláknové kompozity	15
1.2 ADHEZIVA	19
1.2.1 Epoxidové pryskyřice.....	20
1.2.2 Fenolytické pryskyřice	20
1.2.3 Polyuretanová lepidla.....	20
1.3 JÁDRO	21
1.3.1 Pěny.....	22
1.3.2 Voštiny	26
1.3.3 Balsové dřevo.....	29
2 TECHNOLOGIE VÝROBY	31
2.1 RUČNÍ LAMINACE	31
2.2 VAKUOVÁ INFUZE	31
2.3 VYTVRZOVÁNÍ PREPREGU V AUTOKLÁVU	32
3 BIMODULARITA	33
4 OHYBOVÁ TUHOST SENDVIČOVÝCH STRUKTUR	35
5 PORUCHY SENDVIČOVÝCH STRUKTUR	36
6 SHRUTÍ TEORETICKÉ STUDIE	38
PRAKTICKÁ ČÁST	39
7 STANOVENÍ CÍLŮ DIPLOMOVÉ PRÁCE	40
8 VZORKY PRO EXPERIMENTÁLNÍ ZKOUŠKY	41
9 EXPERIMENTÁLNÍ ZAŘÍZENÍ	42
9.1 ZWICK ROELL 1456	42
9.2 PŘÍSTROJ PROMI PC 3000	43
9.3 KAMERA OLYMPUS I-SPEED 2	44
10 VÝPOČET OHYBOVÉ TUHOSTI POMOCÍ PROGRAMU	45
10.1 STANOVENÉ HODNOTY	46
10.2 VYPOČTENÉ HODNOTY OHYBOVÉ TUHOSTI	46
11 STANOVENÍ ZÁVISLOSTI POČTU LAMIN NA TUHOSTI	47
12 ZKOUŠKA TLAKEM	48

12.1	PŘÍPRAVEK.....	49
12.2	STANOVENÉ PARAMETRY PRO ZKOUŠKY TLAKEM	50
12.3	VÝSLEDKY MĚŘENÍ – VZOREK V1	50
12.4	VÝSLEDKY MĚŘENÍ – VZOREK V2	52
12.5	VÝSLEDKY MĚŘENÍ – VZOREK V3	54
12.6	SOUHRN VÝSLEDKŮ TLAKOVÝCH ZKOUŠEK	56
12.6.1	Modul pružnosti v tlaku	56
12.6.2	Mez pevnosti v tlaku	57
12.7	SKUTEČNÝ MODUL PRUŽNOSTI V TLAKU	58
12.8	VÝPOČET OHYBOVÉ TUHOSTI ZE ZÍSKANÝCH HODNOT TLAKOVÝCH ZKOUŠEK	60
13	ZKOUŠKA OHYBEM.....	63
13.1	STANOVENÍ PRŮHYBU	65
13.2	VÝPOČET OHYBOVÉ TUHOSTI ZE ZÍSKANÝCH HODNOT OHYBOVÝCH ZKOUŠEK.....	68
14	FEM MODEL	71
14.1	STANOVENÉ HODNOTY	71
14.2	STANOVENÍ PRŮHYBU	72
14.3	VÝPOČET OHYBOVÉ TUHOSTI POMOCÍ FEM MODELU.....	72
15	SROVNÁNÍ TEORETICKÝCH A EXPERIMENTÁLNÍCH HODNOT OHYBOVÉ TUHOSTI	73
16	DISKUZE VÝSLEDKŮ.....	74
	ZÁVĚR	75
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	76
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	81
	SEZNAM OBRÁZKŮ	83
	SEZNAM TABULEK.....	86
	SEZNAM GRAFŮ	87

ÚVOD

Sendvičové struktury hrají v dnešním světě významnou roli v mnoha různých průmyslových odvětvích. S výhodou se používají pro pokročilé aplikace v leteckém a automobilovém průmyslu.

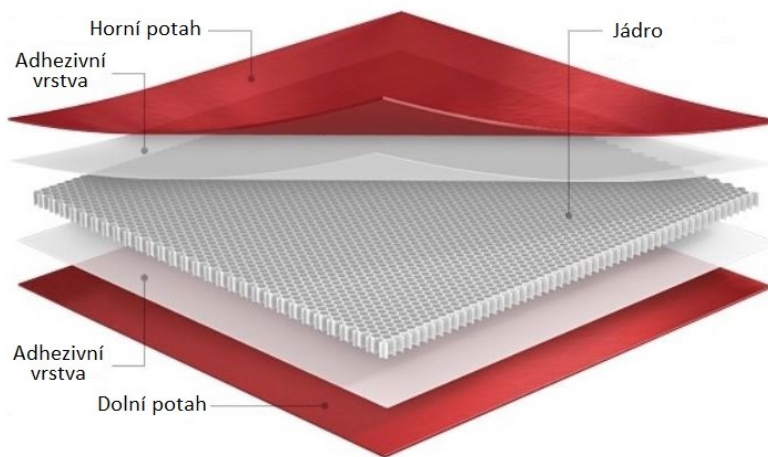
Sendvičové struktury představují zvláštní druh laminátového kompozitu, které se vyznačují vysokou tuhostí při nízké hmotnosti. Využití těchto struktur je tedy stále významnější a jejich rozvoj neustále roste. Sendvičové struktury sebou ovšem nesou i méně známý pojem bimodularity. Bimodularita sendvičových struktur hraje významnou roli při stanovování vlastností sendvičů a jejich chování při různých aplikacích. Velký vliv bimodularity vnějších vrstev zahrnuje ohybová tuhost sendvičové struktury. Porušení kterékoliv části sendvičové konstrukce může vést až k fatálním následkům.

V první části diplomové práce bude vypracována teoretická studie týkající se sendvičových struktur, jejich bimodularity a ohybové tuhosti, která je předmětem celé studie diplomové práce. V praktické části bude řešena ohybová tuhost sendvičových struktur, která se stanoví teoreticky i experimentálně. Dosažené výsledky budou srovnány a následně vyhodnoceny.

I. TEORETICKÁ ČÁST

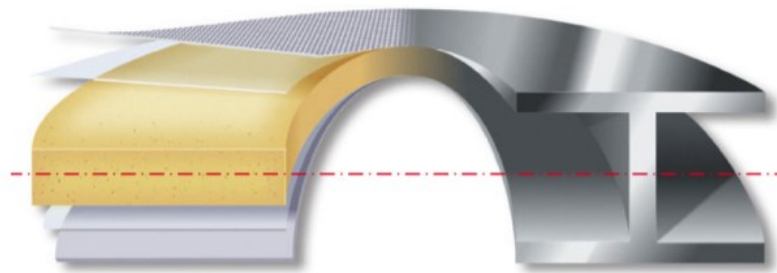
1 SENDVIČOVÉ STRUKTURY

Typické sendvičové struktury se skládají ze dvou poměrně tenkých, tuhých a pevných vrstev, které jsou od sebe odděleny jádrem. Jádro fixuje vzájemnou polohu horní a spodní vrstvy na konstantní tloušťce a zajišťuje fungování vrstev a jádra jako celku. Pro spojení těchto částí sendviče se obvykle využívá syntetických lepidel. Vnější vrstvy mohou být vyrobeny např. z kovových materiálů nebo vláknových kompozitů. Jádro je obvykle z polymerní pěny, voštiny nebo balsového dřeva. [1, 2, 3, 4]

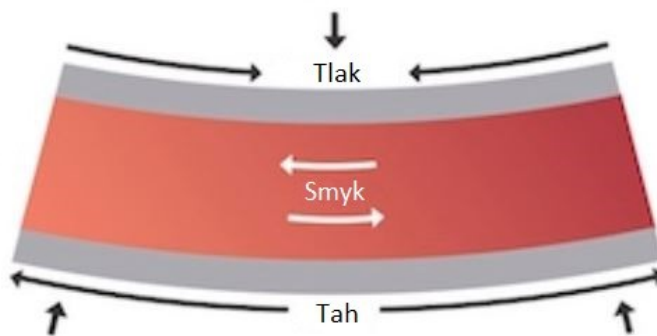


Obr. 1: Schéma sendvičové struktury [5]

Vnější vrstvy sendvičové struktury mohou být srovnány s pásnicemi I profilu, jelikož nesou ohybové napětí, kterému jsou vystaveny. Tyto vrstvy jsou zatěžovány tahovými a tlakovými silami. Podobně i jádro sendviče odpovídá struktuře I profilu. Jádro přenáší síly smykové, které vznikají mezi potahy. Mechanické chování sendvičového kompozitu závisí na materiálu, který byl použitý pro jeho konstrukci. Dále závisí na geometrických a technologických parametrech. [1, 6, 16]



Obr. 2: Srovnání sendvičové struktury a I profilu [16]

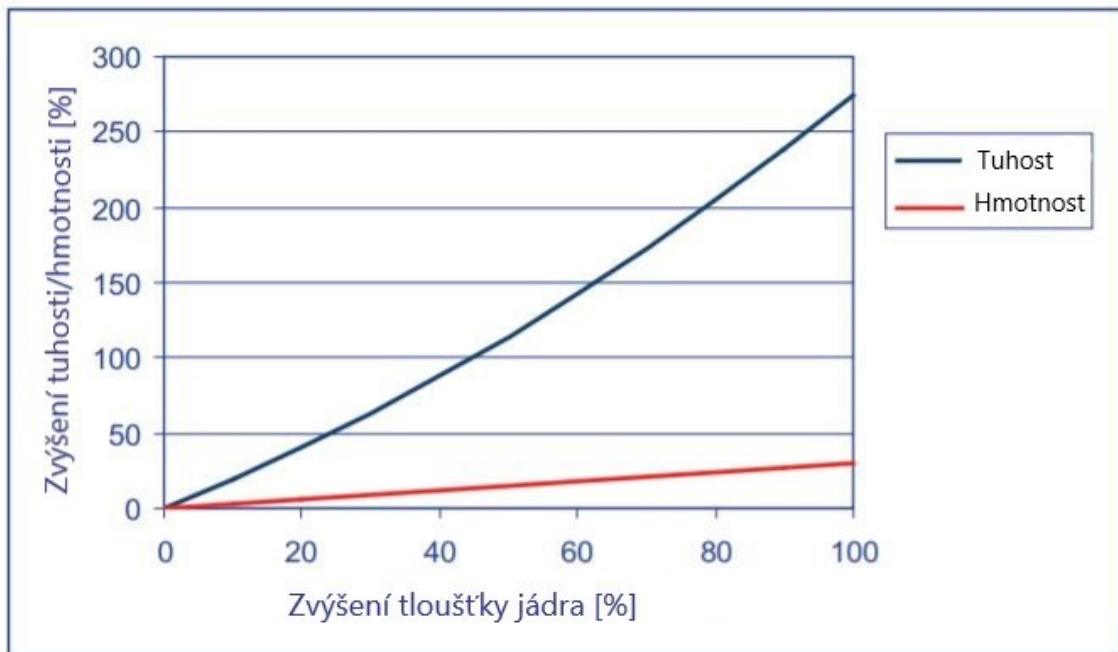


Obr. 3: Znázornění tlakové, tahové a smykové síly [5]

Hlavním účelem sendvičové struktury je dosáhnout vysoké ohybové pevnosti a tuhosti při nízké hmotnosti. Pro dosažení lehké sendvičové struktury se využívají jádra z materiálu s nízkou hustotou, která se pohybuje okolo 50-80 kg/m³. Se zvyšující se tloušťkou jádra značně roste pevnost a ohybová tuhost sendviče. Výhodou je, že zvyšování tloušťky vede jen k velmi malému nárůstu hmotnosti. Závislost tuhosti, pevnosti a hmotnosti na tloušťce jádra je znázorněna na následujících obrázcích. [1, 7]

	Laminát	Tloušťka jádra t	Tloušťka jádra 3t
Relativní tuhost	1	x 7	x 37
Relativní pevnost	1	x 3,5	x 9,25
Relativní hmotnost	100 %	+ 3 %	+ 6 %

Obr. 4: Závislost tuhosti, pevnosti a hmotnosti na tloušťce jádra [8]



Obr. 5: Vliv tuhosti a hmotnosti sendvičové struktury na zvyšující se tloušťku jádra [16]

Mimo vysoké ohybové pevnosti a tuhosti přináší sendvičové struktury i řadu dalších výhod. Mezi ně patří únavová odolnost, odolnost proti rázům, odolnost proti šíření trhlin, tepelná odolnost, tepelná izolace, tlumení vibrací a šumu a další. [3, 6]

1.1 Vnější vrstvy

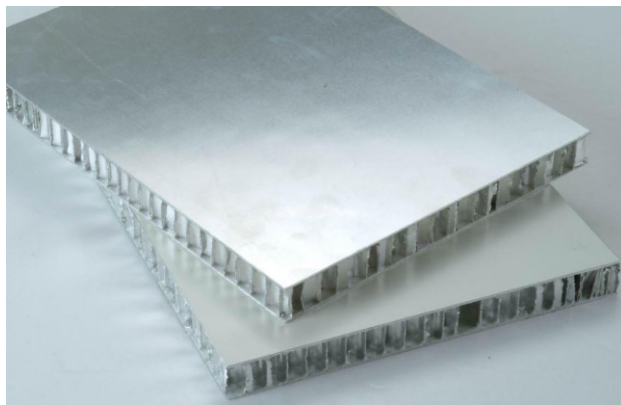
Pro výrobu vnějších vrstev se často používají konvenční kovové materiály, jako je ocel, nerezová ocel a hliník. Mimo kovových materiálů se také využívají vláknové kompozity, které se snadno aplikují. Vláknové kompozity mohou být připůsobeny tak, aby splňovaly řadu požadavků, které jsou na danou sendvičovou strukturu kladeny. [16]

1.1.1 Kovové materiály

Sendvičové struktury s kovovými potahy se využívají ve stavebnictví, kde se používají např. pro stěny velkých průmyslových a chladírenských budov, sportovních hal a logistických center. Dále se kovové potahy využívají v dopravě a lodním průmyslu pro lodní příčky, požární ochranu, vnitřní podlahy apod. [26]



Obr. 6: Sendvičová struktura tvořena kovovým potahem a polyuretanovým jádrem [26]

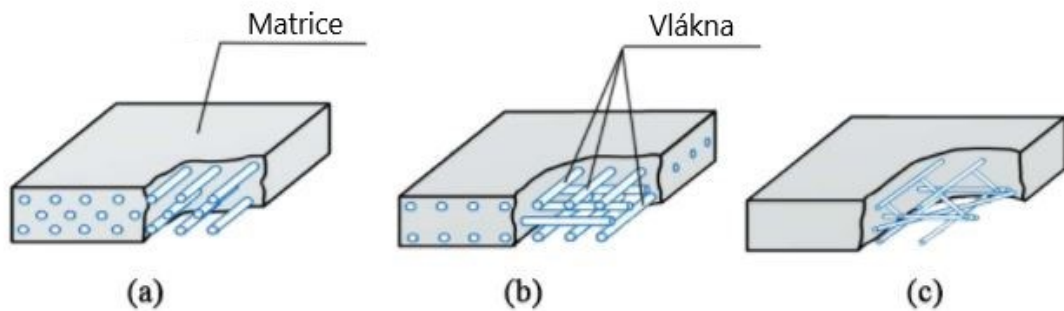


Obr. 7: Sendvičová struktura tvořena hliníkovými potahy a hliníkovou voštinou [17]

1.1.2 Vláknové kompozity

Vláknové kompozity jsou tvořeny vláknovou výztuží obklopenou pryskyřičnou matricí. Statické mechanické vlastnosti, jako je pevnost, jsou dány především výztuží. Dynamické mechanické vlastnosti, jako je houževnatost, výrazněji určuje matrice. [21]

Vlastnosti kompozitu ovlivňuje materiál vláken, jejich procentuální zastoupení v matrici i jejich orientace. Pevnost a tuhost kompozitu je výrazně lepší ve směru uložení vláken. Vlákna jsou nejčastěji uspořádána jednosměrně nebo vícesměrně. Nejběžnější používaná vlákna jsou skelná, uhlíková a aramidová. [18, 19]



Obr. 8: Struktura kompozitního materiálu vyztuženého dlouhými vlákny v případě jednosměrné (a), vícesměrné (b) a nahodilé (c) orientace vláken [20]

- **Skelná vlákna**

Skelná vlákna patří mezi nejběžnější vlákna používaná pro vláknové kompozity. Hlavním důvodem použití těchto vláken je cena, která je výrazně nižší než cena vláken uhlíkových. Jsou vyráběna z určitého typu skla, nejběžnější je E-sklo z bezalkalické skloviny, které je vynikajícím elektrickým izolantem s vysokou propustností pro záření. Nevýhodou skelných vláken je nízký modul pružnosti. [18, 19, 22]



Obr. 9: Skelná vlákna (E-sklo) [23]

Tab. 1: Vybrané vlastnosti sklených vláken (E-sklo) [19]

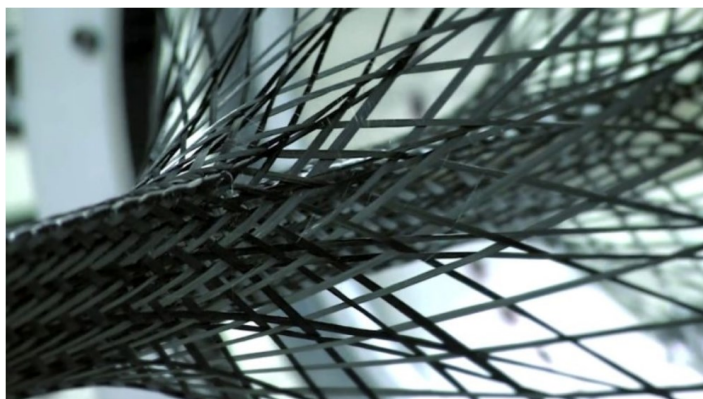
Hustota [g/cm ³]	2,54
Pevnost v tahu [GPa]	3,5
Modul pružnosti [GPa]	73,5

- **Uhlíková vlákna**

Uhlíková vlákna vynikají svou vysokou pevností a tuhostí, tepelnou odolností, odolností proti únavě a nízkou hmotností. Nevýhodou vláken je nízká odolnost proti rázu, která je způsobena křehkostí uhlíkového vlákna. [23]

Uhlíková vlákna se vyrábějí z celulózy, polyakrylonitridu (PAN) nebo z tzv. anizotropní smoly. Vlákna z celulózy mají méně dokonalou strukturu a používají se převážně jako izolační materiál pro vysoké teploty. Vlákna vyrobená z polyakrylonitridu jsou považována za standardní vlákna. Příprava vláken ze smoly je nákladná, ale konečná cena je příznivá vzhledem k nízké ceně výchozí suroviny. Tyto vlákna mají vysokou hodnotu modulu pružnosti v tahu a dobré tepelné a elektrické vlastnosti. Pevnost v tlaku je nižší oproti standardním vláknům. [19, 22]

Vlákna se dělí na vysokopevnostní uhlíková vlákna a vysokomodulová uhlíková vlákna. Vysokopevnostní vlákna (HS) jsou získána při 900 °C až 1 500 °C a jsou pevnější a levnější. Vysokomodulová vlákna (HM) se získávají další karbonizací při teplotě 2 000 °C až 2 800 °C. Tyto vlákna mají menší tahovou pevnost, ale vynikají vyšším modulem pružnosti v tahu. [19]



Obr. 10: Uhlíková vlákna [30]

Tab. 2: Vybrané vlastnosti uhlíkových vláken [19]

Uhlíková vlákna	HS	HM
Hustota [g/cm ³]	1,78	1,79
Pevnost v tahu [GPa]	4,3	2,35
Modul pružnosti [GPa]	235	358

- **Aramidová vlákna**

Aramidové vlákno je vyrobeno z aromatických polyamidů vyvinutých firmou DuPont pod obchodním názvem Kevlar. Výhodou aramidových vláken je velmi nízká hustota, vysoká pevnost, velmi dobře tlumí vibrace a má dobrou rázovou houževnatost. Mezi základní druhy kevlaru můžeme zařadit kevlar 29, který má uplatnění v průmyslu (kabely) a kevlar 49, který slouží např. pro zesílení trupů lodí, letadel apod. Aramidová vlákna se často používá v kombinaci s jinými typy vláken. [19, 22, 23, 25]



Obr. 11: Aramidová vlákna [23]

Tab. 3: Vybrané vlastnosti aramidových vláken [19]

Kevlar	Kevlar 29	Kevlar 49
Hustota [g/cm ³]	1,45	1,45
Pevnost v tahu [GPa]	2,8	3
Modul pružnosti [GPa]	63	134

Matrice je pojivo výztuže ve vláknových kompozitech. Jejím úkolem je zajistit tvarovou stálost výrobku, přenášet rovnoměrně zatížení na vlákna, chránit vlákna před vlivy okolí, poskytovat odolnost proti šíření trhlin apod. Jako matrice se používají termosetické a termoplastické pryskyřice. [19, 22]

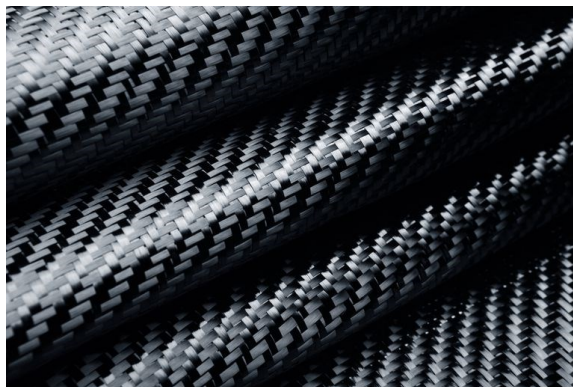
Mezi termosetické pryskyřice řadíme například polyesterové, epoxidové nebo vinylesterové pryskyřice. Tyto matrice se vytvrzují pomocí chemických reakcí. Mezi termoplastické pryskyřice řadíme polyethylenové, polypropylenové, polystyrenové a polypropylenové pryskyřice. Výhodou termoplastů je, že v průběhu zpracování neprobíhá chemický proces,

který by ovlivnil jakost výrobku, ale pouze roztavení a ztuhnutí matrice. Další výhodou termoplastů oproti termosetům je jejich houževnatost. [19, 21, 22]

- **Prepregy**

Prepregy jsou předimpregnovaná vlákna, která se stále častěji využívají ve vysoce výkonných aplikacích, především díky snadnému použití, výborným mechanickým vlastnostem a kvalitní povrchové úpravě. [31]

Hlavní složkou prepregu je předimpregnovaná výztuž napuštěná částečně vytvrzenou pryskyřicí. Nejčastěji se využívá epoxidová pryskyřice, lze však použít i jiné typy pryskyřic, včetně většiny termosetových a termoplasických pryskyřic. Pro výztuž se využívá např. uhlíkových, aramidových nebo skelných vláken. Prepregy se vrství do požadované tloušťky ve formě, kde jsou následně vytvrzeny za působení tepla a tlaku. Nevýhodou prepregů je jejich skladování, musí se uchovávat buď chlazené, nebo zmrazené. [31]



Obr. 12: Prepreg z uhlíkových vláken [24]

1.2 Adheziva

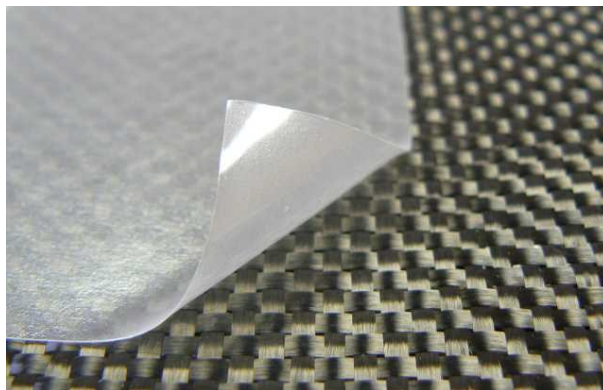
Adheze je schopnost především dvou různých materiálů k sobě přilnout. Aby vnější vrstvy a jádro spolu vzájemně spolupracovali, musí být lepidlo schopno mezi těmito vrstvami přenášet smykové síly. Jednoduché pravidlo spočívá v tom, že by lepidlo mělo být schopno přenášet stejné smykové síly jako jádro. [14, 16]

Mezi nejpoužívanější lepidla pro sendvičové struktury patří syntetická lepidla na bázi epoxidových pryskyřic, fenolických pryskyřic nebo polyuretanová lepidla. [27]

1.2.1 Epoxidové pryskyřice

Epoxidové pryskyřice patří mezi nejpoužívanější a dobře dostupná adheziva. Mají dobrou chemickou odolnost, při vytvrzování nevytváří těkavé látky a dochází pouze k minimálnímu smrštění. Výhodou je velmi dobrá přilnavost s celou řadou různých materiálů. Epoxidové pryskyřice jsou bezbarvé až nažloutlé materiály. [27, 28]

Epoxidové pryskyřice se používají jako lepidla v tekutém nebo tuhém stavu. V případě tekutého lepidla dochází k vytvrzování přidáním tvrdidla v předepsaném poměru. Tuhá lepidla již tvrdidlo obsahují, k vytvrzení dochází zahřátím na předepsanou teplotu. Na následujícím obrázku je epoxidová pryskyřice spolu s tvrdidlem ve formě fólie, která je snadno aplikovatelná. [28, 29]



Obr. 13: Epoxidová pryskyřice ve formě fólie [29]

1.2.2 Fenolické pryskyřice

Fenolické pryskyřice byly první lepidla pro kovy a mají dlouhou historii úspěšného použití pro spojování kovů a dřeva. Vznikají polykondenzací fenolu s aldehydy, nejčastěji s formaldehydem. Při použití se vytvrzují zahřátím nebo účinkem katalyzátorů. Výhodou fenolických pryskyřic je pevnost a trvanlivost při zvýšených teplotách. Nevýhodou je tvorba vodní páry při vytvrzování. [27, 28]

1.2.3 Polyuretanová lepidla

Polyuretanová lepidla mohou být jednosložková nebo dvousložková. Častěji se vyskytují lepidla dvousložková, kdy je jednou složkou vždy izokyanát. Polyuretanová lepidla poskytují silné a pružné spojení, které jsou odolné proti nárazu a mají dobrou odolnost vůči nízkým teplotám ve srovnání s jinými lepidly. Tyto lepidla jsou používána v širokém rozsahu

materiálů. Hlavní uplatnění nacházejí při lepení vláknových kompozitů, ve stavebnictví pro konstrukční silové spoje apod. [27]

1.3 Jádro

Funkcí jádra je udržovat vnější potahy ve stabilní poloze tak, aby se nedeformovala směrem dovnitř nebo ven a vzdálenost mezi potahy byla konstantní. Jádro musí přenášet smyková zatížení. Pokud jádro není schopno toto zatížení přenášet, vnější vrstvy spolu nespolupracují a sendvič ztrácí tuhost. [16]

Jádro může být vyrobeno z různých materiálů, jako je hliník, plast, různé druhy pěn, balsové dřevo, papír nebo z minerální vlny. [32]



Hliníková voština



Plastová voština



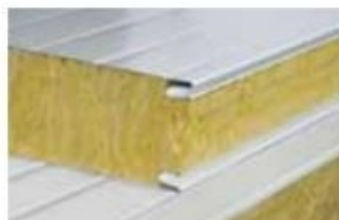
Pěnové jádro



Dřevěné jádro



Papírová voština



Minerální vlna

Obr. 14: Příklady sendvičových jader [32]

1.3.1 Pěny

Pěny jsou vyráběny z nejrůznějších polymerních materiálů, jako je polyvinylchlorid, polystyren, polyuretan nebo polymetakrylimid. Mimo polymerních materiálů mohou být pěny ve formě kovů. Všechny materiály mají různé vlastnosti, ale jejich společnou charakteristikou je nízká hmotnost. [3]

- **Polyvinylchlorid (PVC)**

Polyvinylchloridová pěna je jednou z nejvšestrannějších materiálů pro výrobu sendvičových jader na trhu. PVC pěny mají uzavřenou strukturu a řadu vynikajících vlastností, jako jsou:

- odolnost proti vlhkosti,
- odolnost vůči mnoha rozpouštědlům,
- dobré fyzikální vlastnosti ve srovnání s jinými pěnama s podobnou hustotou,
- dobrá pevnost spojů s běžnými lepidly a laminovacími pryskyřicemi,
- snadné zpracování,
- vynikající životnost,
- samozhášivost. [33]

PVC pěny jsou k dispozici v různých hustotách od 45 kg/m^3 až po 400 kg/m^3 . Jejich struktura může být lineární nebo zesíťovaná. Zesíťované PVC pěny mají vyšší odolnost vůči teple a rozpouštědlům, fyzikální vlastnosti jsou obecně o 20–40 % vyšší. [33]

PVC pěny se využívají zejména v lodním a leteckém průmyslu, ale i v mnoha dalších odvětvích díky své univerzálnosti. [3]



Obr. 15: PVC pěna [16]

- **Polystyren (PS)**

Polystyrenová pěna je nejlevnější, a proto je jednou z nejpoužívanějších pěn v sendvičových strukturách. Dle způsobu výroby můžeme PS rozdělit na expandovaný a extrudovaný. [34]

Expandovaný PS je levnější, ale obtížně tvarovatelný. Díky své otevřené struktuře nasákavý a nesmí přijít do kontaktu s dehty a určitými organickými rozpouštědly. Expandovaný polystyren je ve většině případů bílý. Naopak PS extrudovaný je dražší, ale má výrazně nižší nasákavost, je pevnější a samozhášivý. Nevýhodou je uvolňování styrenu a pentanu při výrobě. Extrudované polystyreny jsou barveny na zeleno, modro a mnoho dalších barev. Barvy se používají pro rozlišení výrobců. [3, 34, 35]

Polystyrenové pěny se používají v různých odvětvích. Nejčastěji využívají jako tepelné izolace staveb, domů a průmyslových objektů a jako zvukové izolace. Dále se využívají pro výrobu surfovacích prken. Jakmile je polystyren utěsněn epoxidovou pryskyřicí, surfovací prkna vydrží déle a vydávají méně toxických plynů. [3, 34]



Obr. 16: Extrudovaný polystyren [35]



Obr. 17: Řez surfovacím prknem s jádrem z expandovaného polystyrenu [36]

- **Polyuretan (PUR)**

Polyuretanová pěna je univerzální a může být uplatňována v mnoha odvětvích. Má uzavřenou strukturu, díky které je málo nasákavá. Její největší výhodou je flexibilita a odolnost materiálu. Polyuretanové pěny se nejčastěji využívají v kompozitních sendvičových strukturách. Uplatnění nachází především v automobilovém průmyslu, lodním průmyslu a jako tepelné izolace budov. [3]

V automobilovém průmyslu se PUR pěny využívají např. při výrobě sedadel. Díky polyuretanové pěně jsou sedadla měkkší, pohodlnější a odolná vůči nárazům. Sedadla se vyrábí pomocí zkapalněné směsi polyuretanu, která je vstříkována do formy. Po zaplnění formy se vytvoří měkká, ale pevná pěna. [37]



Obr. 18: Automobilové sedadlo z PUR pěny [37]



Obr. 19: Tepelná izolace z PUR pěny [38]

- **Polymetakrylimid (PMI)**

PMI pěna má uzavřenou strukturu a je poměrně drahá ve srovnání s jinými pěnovými jádry, ale její použití je výhodné vzhledem k jejím dobrým vlastnostem, jako jsou:

- dobré mechanické vlastnosti (tuhost, pevnost),
- odolnost vůči teplotám při zpracování až do 176 °C,
- rozměrová stabilita,
- vysoká únavová životnost. [3]

PMI pěna se používá hlavně ve špičkových sendvičových konstrukcích, například v kombinaci s prepregovými systémy. Nejčastěji se využívá v leteckém a kosmickém průmyslu. [3]



Obr. 20: Aplikace PMI pěny v leteckém průmyslu [39]

- **Kovové pěny**

Pro kovové pěny se nejčastěji využívá hliník a jeho slitiny, který je odlehčený plynovými bublinami, které mohou mít uzavřenou nebo otevřenou strukturu. Naplynění taveniny hliníku nebo jeho slitiny může probíhat různými způsoby:

- vháněním plynu do taveniny z externího zdroje plynu,
- roztavením přidaného tuhého polotovaru, které obsahuje zpěňovadlo,
- v důsledku tepelného rozkladu přimíchaného zpěňovadla. [40, 41]

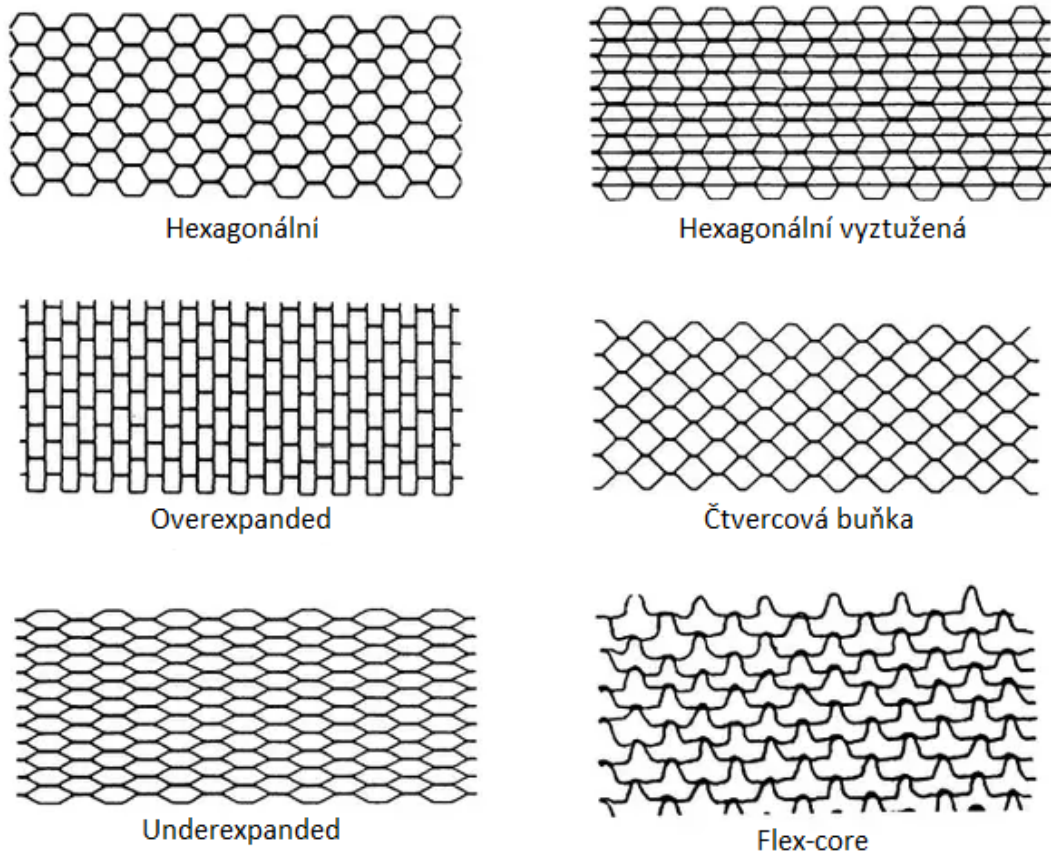
Kovové pěny se obvykle používají jako konstrukční materiál při stavbě strojů, dopravních prostředků, dopravníků, robotů apod.



Obr. 21: Hliníková pěna [41]

1.3.2 Voštiny

Název voština pochází ze struktury včelích medových plástů. Nejčastěji má tvar šestiúhelníku, ale pro výrobu voštin se využívají i jiné geometrie.



Obr. 22: Geometrie buněk [42]

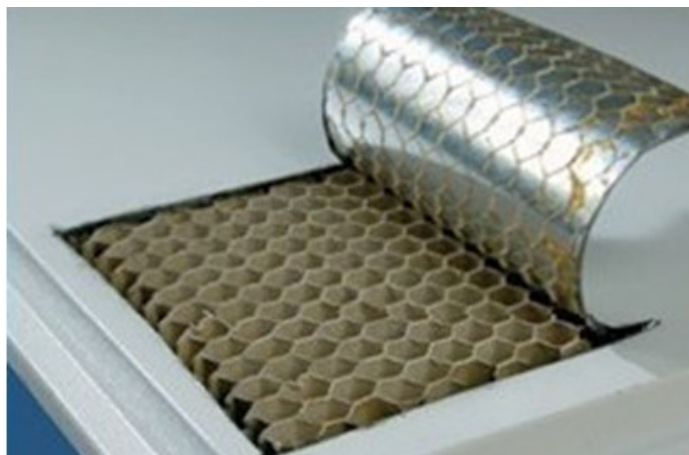
Voštiny jsou široce používány v aplikacích zahrnující ploché nebo mírně zakřivené plochy v důsledku vysoké specifické pevnosti. Jejich síla je primární důvod pro jejich rozsáhlé umístění v leteckém a automobilovém průmyslu, ale také v jiných odvětvích, včetně obalů, nábytku a sportovních potřeb. [45]

Pro výrobu voštinových jader se využívá nejrůznějších materiálů. Ty se pohybují od papíru a lepenky, plastu až po hliník, aramidová vlákna aj. [3]

- **Papírová voština**

Papírová voština se využívá nejčastěji jako obalový materiál, ale i pro výrobu nábytku, zejména interiérových dveří, stěn atd. Dále se používá jako forma pro izolační materiál podlah ve stavebnictví, pro rovnoměrné rozmístění izolačního granulátu v podlaze. [43]

Výhody použití papírové voštiny jsou nízké náklady, snadná manipulace, šetrnost k životnímu prostředí a dobrá pevnost v tlaku. [43]



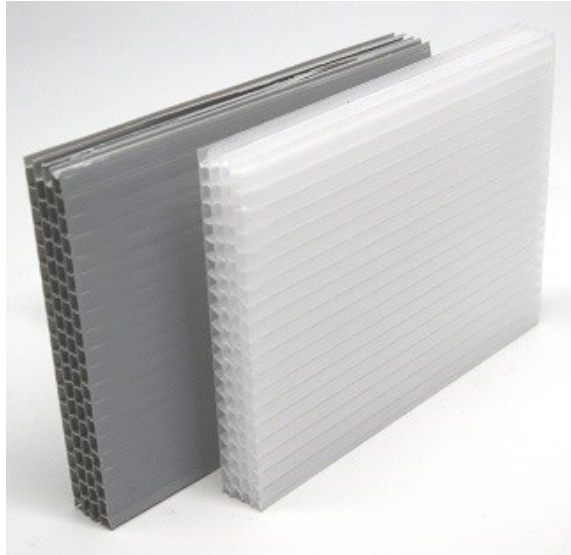
Obr. 23: Detail dveří z voštiny [43]

- **Plastová voština**

Plastové voštiny se vyrábí z různých druhů termoplastů, jako je polypropylen, polyetylén, polykarbonát aj. Termoplastické voštiny jsou vyráběny vytlačováním a rozřezáváním na určitou tloušťku. Jejich výhodou je snadná recyklace. Hlavní nevýhodou termoplastických voštin je obtížné vytvoření silné vazby mezi jádrem a vnějšími vrstvami. [45]

Voština z ABS nabízí pevnou strukturu, houževnatost, tvrdost povrchu, rozměrovou stabilitu a odolnost proti rázům. Polypropylen poskytuje výjimečnou chemickou stabilitu.

Polykarbonát nabízí UV stabilitu, dobrý přenos světla, tepelnou odolnost a samozhášecí vlastnosti. Polyetylén je levnější, a proto se využívá jako univerzální voštinové jádro. [45]



Obr. 24: Polypropylenová voština [46]

- **Hliníková voština**

Hliníková voština vyniká hlavně vysokým poměrem pevnosti/hmotnosti. Vlastnosti voštiny závisí na geometrii, tloušťce a velikosti buněk. Nevýhodou hliníkových voštin je náchylnost ke korozi, především pokud se používají v některých aplikacích, jako je lodní průmysl. [45]

Hliníkové voštiny se využívají především v leteckém a lodním průmyslu, ale nachází uplatnění i v řadě jiných oborů. [45]

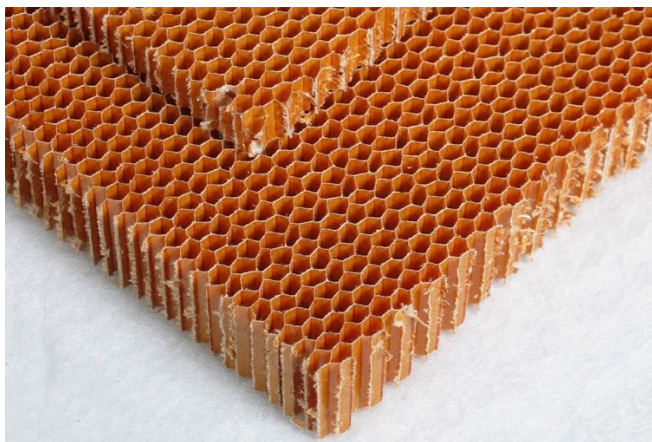


Obr. 25: Hliníková voština [45]

- **Aramidová voština**

Standardní aramidová voština je lehká a vysoce pevná. Jde o nekovový materiál s voštinovým jádrem vyrobeným z aramidových vláken, která jsou slepena fenolovou pryskyřicí, zvyšující pevnost a tepelné vlastnosti. [47]

Aramidové voštiny se stále častěji využívají ve vysoce výkonných aplikacích, především díky svým mechanickým vlastnostem, nízké hustotě a dlouhodobé stabilitě. Je ideální pro všechny konstrukce, které vyžadují odolnost proti korozi a tepelnou izolaci. [47]



Obr. 26: Aramidová voština [47]

1.3.3 Balsové dřevo

Balsové dřevo je jedním z nejpoužívanějších dřevěných jader. Aby bylo možné co nejlépe využít jeho vlastností, musí být přírodní vlákna orientována v kolmém směru vnější vrstvy, což se provádí lepením, otáčením a rozřezáváním dřeva do správné polohy. [16]

Největší výhodou použití balsového dřeva jsou nízké náklady na jeho pořízení a dobré mechanické vlastnosti. Nevýhodou je možné poškození vodou, která způsobí hnilobu dřeva. Tomu je možné předcházet řádnou aplikací jádra a jeho udržováním. Další nevýhodou jsou nákladné opravy ve srovnání s vláknovými kompozity plněnými skelnými vlákny, které se často používají jako alternativa balsového jádra v lodním průmyslu. [3, 16]

Balsové dřevo nachází největší uplatnění v lodním průmyslu, kde se běžně používá pro lodní trupy a paluby. [3]



Obr. 27: Balsové dřevo [16]



Obr. 28: Vodou poškozené balsové jádro lodní paluby [44]

2 TECHNOLOGIE VÝROBY

Technologie výroby sendvičových struktur je rozmanitá. Mezi nepoužívanější metody patří:

- ruční laminace,
- vakuová infuze,
- vytvrzování prepregu v autoklávu.

2.1 Ruční laminace

Ruční laminace je nejběžnější a nejlevnější metodou laminování, protože vyžaduje nejmenší množství zařízení. Nejprve se nanese gelcoat na vyčištěnou formu, který se nechá zpolymerizovat. Na vytvořený povlak se ručně umístí výztuž z vláken. Laminovací pryskyřice se nanáší litím, postříkem nebo použitím válečkového nátěru. Ke konsolidaci materiálu a odstranění zachyceného vzduchu se používají válečky nebo stěrky. Následně se pokládají další vrstvy výztuže z vláken nebo jádro. [53]

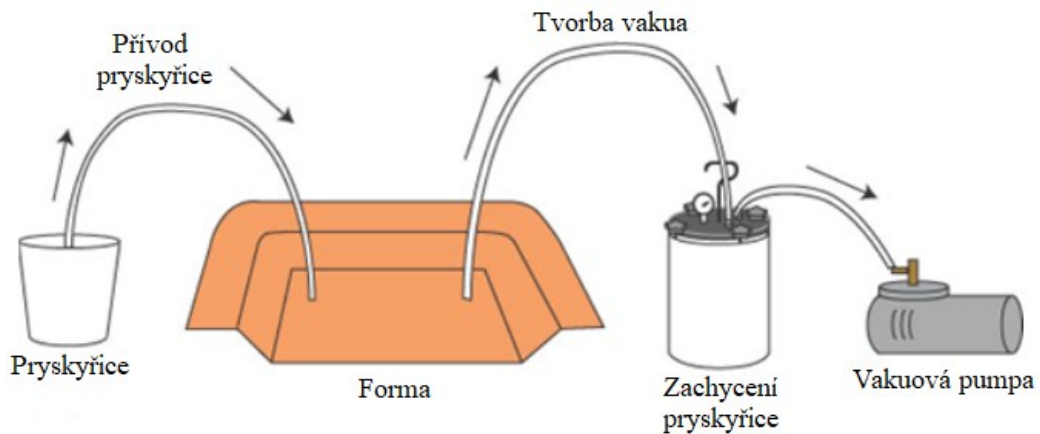
Metoda ruční laminace je vhodná pro výrobu širokého sortimentu kompozitních výrobků od velmi malých součástí až po velmi velké díly. Objem výroby je nízký, avšak produkce lze zvýšit za použití více forem. Výhodou je tvarová a rozměrová stabilita výrobku, jednoduchost laminování a nízké náklady na výroby. [53]

2.2 Vakuová infuze

Proces vakuové infuze využívá vakuum k zavedení pryskyřice do laminátu. Prvním krokem je zatížení vláknové tkaniny a jádra ve formě. Následně je suchý materiál uzavřen pomocí vakuového vaku nebo protilehlé formy. Vysoké vakuové čerpadlo odstraní veškerý vzduch v dutině a dojde ke konsolidaci vláknové tkaniny a jádra. Ještě pod tlakem se do dutiny formy vstříkne pryskyřice, která se nechá vytvrdit. Celý proces vakuové infuze je jednoduchý, nicméně vyžaduje detailní plánování a procesní zpracování tak, aby proběhl rychle a bez vytvoření suchých míst. [52]

Pro výrobu sendvičových struktur vakuovou infuzí se mohou použít libovolné typy vláken. Pryskyřice musí mít nižší viskozitu, aby se zajistilo dokončení infuze před jejím vytvrzením. [52]

Výhodou vakuové infuze je vytvoření velmi kvalitního laminátu s poměrem vláken až 70 %, čímž se dosáhne vysoké tuhosti a pevnosti. Další výhodou je minimální vznik vzduchových bublin a kazů na povrchu dílu, rychlost procesu a nízké náklady. [52]



Obr. 29: Vakuová infuze [52]

2.3 Vytvrzování prepregu v autoklávu

Výrobní proces se používá pro výrobu velkorozměrných konstrukcí. Využívá přesně nařezaných prepregů, které se pokládají a vrství do formy. Následně jsou s dalšími pomocnými technickými fóliemi zabaleny do tzv. vakuového pytle. Vakuově stabilní celek se vloží do autoklávu, kde dochází k vytvrzování za pomoci působení tepla a vysokého tlaku. Výsledkem je velice pevná a lehká konstrukce. [54]

Technologie vytvrzování v autoklávu se nejčastěji využívá v automobilovém a leteckém průmyslu, motorsportu a zdravotnictví. [54]



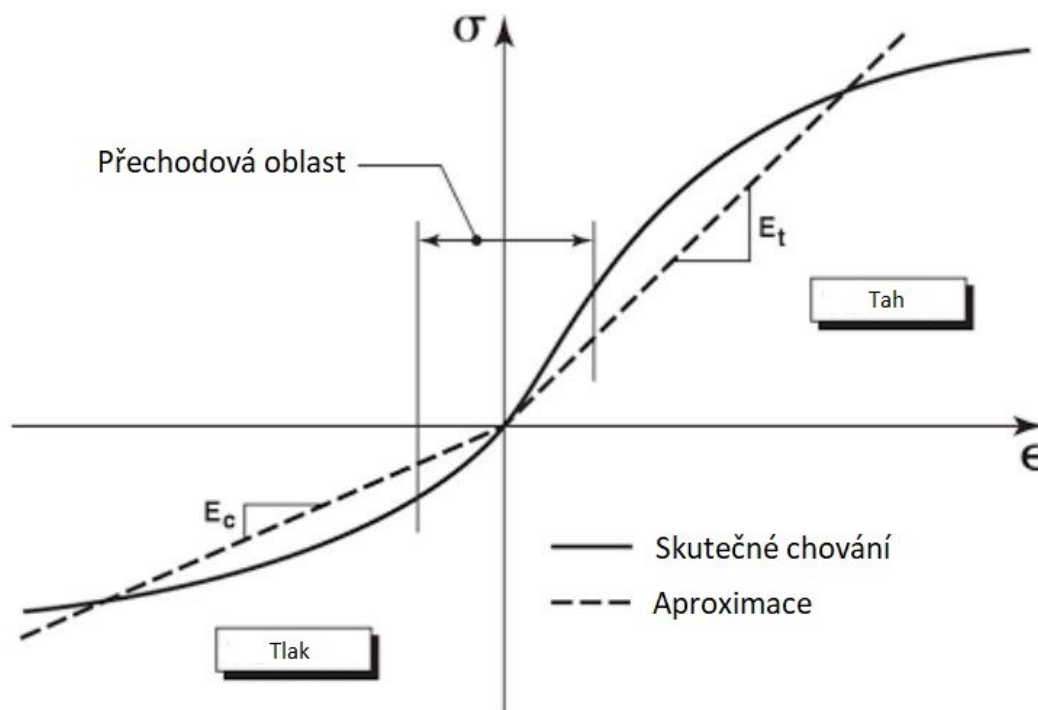
Obr. 30: Autokláv [54]

3 BIMODULARITA

V klasické teorii pružnosti předpokládáme, že mají materiály podobné elastické vlastnosti v tahu i tlaku. Studie však naznačují, že široká škála materiálů, jako je keramika, grafit, kompozitní materiály a dokonce i některé biologické struktury se chovají odlišně v tahu a tlaku, tj. vykazují výrazně rozdílné hodnoty modulu pružnosti v tahu a tlaku. Tyto materiály označujeme jako bimodulární materiály. [49]

Nelinearita křivky závislosti napětí na deformaci hraje důležitou roli při konstrukčních aplikacích kompozitních materiálů. Tyto materiály také vykazují různé úrovně rozdílného chování při zatížení v tahu než při zatížení v tlaku. Jakákoliv nelinearita se obvykle zvyšuje při zvýšených teplotách. U kompozitních materiálů s pryskyřičnou maticí má podobný účinek zvýšení vlhkosti. [50]

Pro modelování materiálových nelinearit a bimodulárních charakteristik pro vrstvené konstrukce a pevná tělesa je navržen jednotný základ za různých zatěžovacích a environmentálních podmínek. [50]



Obr. 31: Nelineární bimodulární chování v závislosti na napětí a deformaci [50]

Z obrázku můžeme vyčíst, že tahové moduly vykazují vyšší hodnoty než moduly v tlaku z důvodů založených na mikrostrukturních charakteristikách materiálu. Pro přiblížení se ke

skutečnému chování bylo dokončeno mnoho studií. Těmto pracím se věnoval např. Sergei Alexandr Ambartsumyan, Robert M. Jones a Charles W. Bert. [50]

V následující tabulce jsou vypsané některé materiály, které vykazují bimodularitu, společně s poměrem E_+/E_- . Tento poměr se u následujících materiálů pohybuje v rozsahu od 1,2 až do 294. [51]

Tab. 4: Poměr E_+/E_- pro vybrané materiály [51]

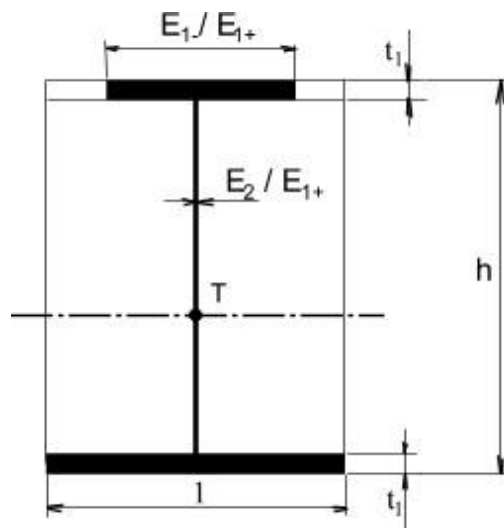
Materiál	E_+/E_-
Aramid/Polyester	1,15
Skleněné vlákno/Epoxidová pryskyřice	1,25
Bórové vlákno/Epoxidová pryskyřice	0,8
Grafit/Epoxidová pryskyřice	1,4
Uhlíkové vlákno/Uhlíková matrice	2-5
Tkanina/Pryž	2,6
Porézní nerezová ocel	10
Různé tkaniny/Pryž	2-14
Vlákna polyesteru/Pryž	59
Vlákna umělého hedvábí/Pryž	278
Vlákna aramidu/Pryž	294

4 OHYBOVÁ TUHOST SENDVIČOVÝCH STRUKTUR

Pro ohybovou tuhost kompozitního průřezu lze modifikací technické teorie ohybu položit

$$K_O = E_{1+} \cdot J_R \quad (1)$$

kde E_{1+} je modul pružnosti povrchové laminátové vrstvy v tahu a hodnota J_R představuje kvadratický moment redukované plochy průřezu vrstevnaté struktury k neutrální ose. Redukovaná plocha průřezu kompozitního prvku je dána redukcí šířek jednotlivých vrstev vzhledem ke zvolené vztažné hodnotě modulu pružnosti dané struktury, která je zpravidla největší. Při výpočtu ohybové tuhosti se počítá s bimodularitou vnějších vrstev, tedy s lišícími se hodnotami modulu pružnosti v tahu E_{1+} a tlaku E_{1-} . [48]



Obr. 32: Redukovaná plocha průřezu sendvičové struktury [48]

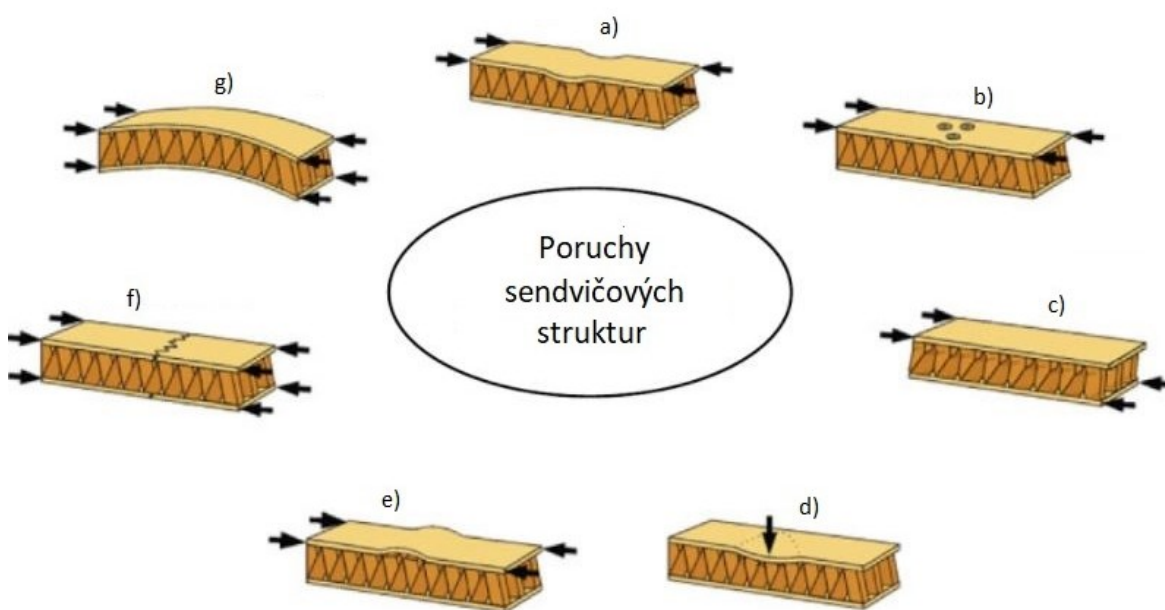
Pro případy praktického vyhodnocování výsledků je zaveden pojem efektivní modul pružnosti, který definujeme jako modul pružnosti myšleně homogenní stěny tloušťky shodné s tloušťkou sendviče, mající shodnou hodnotu ohybové tuhosti jako daná sendvičová struktura. Z této podmínky je podle (1)

$$E_{ef} = E_{1+} \frac{12J_R}{bh^3} \quad (2)$$

Hodnota „modulu pružnosti v ohybu“ plynoucí ze standardního ohybového testu je tak experimentálně určenou hodnotou efektivního modulu pružnosti sendvičové struktury. [48]

5 PORUCHY SENDVIČOVÝCH STRUKTUR

Poruchy sendvičových struktur nastávají nejčastěji na rozhraní vnější vrstvy a jádra. Tato oblast je nejslabším místem sendviče. Selhání sendvičové struktury může být způsobeno např. špatným výrobním postupem nebo špatnou úpravou povrchu jádra před laminací. Obecné způsoby porušení jsou v závislosti na konstrukci a materiálu jádra znázorněny na následujícím obrázku. [10, 11]



Obr. 33: Poruchy sendvičových struktur – a) zvlnění vnější vrstvy a zborcení jádra, b) intracelulární vzpěr, c) smykové porušení jádra, d) lokální stlačení, e) separace vnější vrstvy, f) lom vnější vrstvy, g) ztráta vzpěrné stability [9]

Zvlnění vnější vrstvy a zborcení jádra – porucha je typická především pro sendvičové struktury s tenkými vnějšími vrstvami a lehkým jádrem. Dochází k lokálnímu zvlnění vnější vrstvy, které zasahuje až do tloušťky jádra. V důsledku poruchy vykazují sendvičové struktury malou nebo žádnou schopnost přenášet zatížení, a proto může vést tato porucha až ke katastrofálním důsledkům. [13]

Intracelulární vzpěr – porucha je specifická pro voštinová jádra. Je způsobena příliš tenkými vnějšími vrstvami nebo příliš velkou velikostí buněk. Pokud se zmenší tloušťka vnějších vrstev, zatímco velikost a materiál jádra se nezmění, může dojít k propadu vrstev mezi stěnami buněk. [10, 12]

Smykové porušení jádra – při poruše dojde k překročení smykové pevnosti jádra. Pevnost jádra ve smyku roste s jeho hustotou. [6]

Lokální stlačení – porucha je způsobena nízkou pevností jádra v tlaku. Pevnost jádra v tlaku musí být dostatečná, aby odolala lokálnímu zatížení na povrchu sendvičové struktury. [10, 14]

Separace vnější vrstvy – k separaci vnější vrstvy dojde v důsledku vytvoření lokální vlny ve směru od potahu. Následkem poruchy je odlepení vnější vrstvy od jádra, a tím i ztráta schopnosti sendviče přenášet zatížení. [15]

Lom vnější vrstvy – lom je nejčastěji způsoben nedostatečnou tloušťkou vnější vrstvy nebo její nízkou pevností. [10]

Ztráta vzpěrné stability – obecný vzpěr sendvičové struktury se může objevit, jestliže je nedostatečná tloušťka sendviče nebo je nízká pevnost jádra. [10]

6 SHRUTÍ TEORETICKÉ STUDIE

Nejdelsí část teoretické studie se věnuje sendvičovým strukturám. Jsou zde popsány nejčastější materiály, které se používají pro výrobu vnějších vrstev i jader. Uvedeny jsou i vybrané technologie výroby sendvičů. Dále se teoretická část zaměřuje na bimodularitu sendvičových struktur a jejich ohybovou tuhost. Závěr teoretické části je věnován poruchám sendvičových struktur.

II. PRAKTICKÁ ČÁST

7 STANOVENÍ CÍLŮ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Cílem diplomové práce je stanovit ohybovou tuhost sendvičových struktur na základě analytických výpočtů a konečněprvkových modelů. Dále připravit tlakovou a čtyřbodovou ohybovou zkoušku, pomocí kterých budou experimentálně vyšetřeny hodnoty ohybové tuhosti s vyloučením vlivu indentace v místech podpor a vlivu smykové poddajnosti jádra. Následně budou získané hodnoty ohybových tuhostí srovnány a vyhodnoceny.

8 VZORKY PRO EXPERIMENTÁLNÍ ZKOUŠKY

Pro diplomovou práci byly využity vzorky z fenolického prepregu a pěnového jádra. Tyto vzorky byly mechanicky testovány pomocí tlakových a čtyřbodových ohybových zkoušek.

Vzorky se skládají z jedné, dvou nebo tří lamin na každé straně sendviče. Modul pružnosti v tahu E_+ byl zadán výrobcem. Jeho hodnota je 22 000 MPa.

Tab. 5: Označení vzorků

Vzorek	Počet vrstev lamin
V1	1
V2	2
V3	3

Na následujícím obrázku je testovaný vzorek V3.



Obr. 34: Vzorek V3

9 EXPERIMENTÁLNÍ ZAŘÍZENÍ

Pro mechanické zkoušky vzorků byly použity následující experimentální zařízení:

- ZWICK ROELL1456,
- Promi PC 3000,
- Olympus i-Speed 2.

9.1 ZWICK ROELL 1456

ZWICK ROELL 1456 je univerzální testovací stroj určený pro statické a dynamické zkoušky, který je ovládán pomocí počítače. Je určen ke zkoušení polymerů a kompozitních materiálů na polymerní bázi. Pro potřeby této diplomové práce byl využit ke zkoušení vzorků v tlaku.



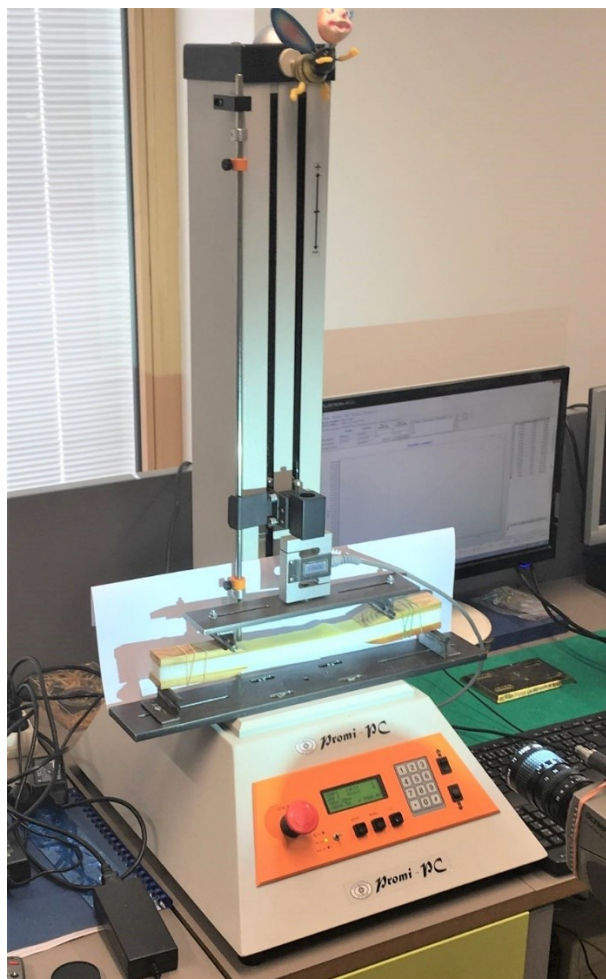
Obr. 35: ZWICK ROELL 1456

9.2 Příklad Promi PC 3000

Příklad Promi-PC je univerzální zkušební zařízení. Systém je stanoven na maximální zatížení 3 kN. V případě zkoušení vzorků byl využit pro zkoušku čtyřbodovým ohybem.

Tab. 6: Parametry přístroje Promi PC 3000

Rok výroby:	2005
Síť:	230V ~ 50Hz
Příkon:	250VA



Obr. 36: Promi-PC

9.3 Kamera Olympus i-Speed 2

Kamera Olympus i-Speed 2 umožňuje snímat a vyhodnocovat vysokorychlostní děje. Kamera byla použita pro záznam zkoušky čtyřbodovým ohybem. Na kameře je umístěno světlo, které umožňuje lepší osvětlení měřeného vzorku.

Tab. 7: Parametry kamery Olympus i-Speed 2

Rozlišení	800 x 600 @ 1000 fps
Max. Rychlost snímání	33000 snímků/s
Použitá rychlost snímání	500 snímků/s



Obr. 37: Kamera Olympus i-Speed 2

10 VÝPOČET OHYBOVÉ TUHOSTI POMOCÍ PROGRAMU

Pro výpočet ohybové tuhosti sendvičových struktur byl vytvořen program v tabulkovém procesoru Microsoft Excel 2016, který je založený na technické teorii ohybu. Program vypočítá nejen ohybovou tuhost, ale také stupeň bimodularity sendvičové struktury. Ohybová tuhost bude vyjádřena pomocí efektivního modulu pružnosti.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1									
2	OHYBOVÁ TUHOST SENDVIČE - BIMODULARITA								
3									
4	Vstupní parametry:			SANDWICH					
5	E_+	22 000	MPa						
6	E_3	70	MPa						
7	E_-	15 000	MPa						
8	h	20	mm						
9	t_1	0,23	mm						
10	t_2	19,54	mm						
11									
12	e	8,388826	mm						
13	J_R	39	mm ⁴						
14	E_{ef}	1 274,18	MPa						
15	M	1 000	Nmm						
16	σ_+	217	MPa						
17	σ_-	205	MPa						
18	Ω	147	N/mm ³						
19									
20	i - vrstva	a redukovaná	h_i výška	l_e souradnice	obsah Vrstev	U_i	J_t	$S_i y_i^2$	
21	1	1	0,23	0,115	0,23	0,02645	0,001	0,003	
22	2	0,003182	19,54	10	0,062173	0,621727	1,978	6,217	
23	3	0,681818	0,23	19,885	0,156818	3,11833	0,001	62,008	
24	Σ	x	x	x	0,448991	3,766507	70,208		
25									

Obr. 38: Program v tabulkovém procesoru Microsoft Excel 2016

V rámci výpočtu jsou zadávány následující hodnoty:

- výška jádra: t_2 [ks]
- výška laminy: t_1 [mm]
- výška sendviče: h [mm]
- modul pružnosti v tahu: E_+ [MPa]
- modul pružnosti v tlaku: E_- [MPa]
- modul pružnosti jádra: E_3 [MPa]
- šířka vzorku: b [mm]

Počet lamin je stanoven vzorky, tedy v rozmezí 1 – 3 laminy na každé straně sendviče. Modul pružnosti v tahu je dán výrobcem (viz. kapitola 8). Pro modul pružnosti v tlaku je zadána hodnota 15 000 MPa. Výška jedné laminy, výška jádra a modul pružnosti jádra jsou zvoleny jako konstantní hodnoty.

10.1 Stanovené hodnoty

Pro všechny výpočty ohybové tuhosti byly nastaveny následující jednotné parametry:

- výška laminy: 0,23 [mm]
- výška sendviče: 20 [mm]
- modul pružnosti v tahu: 22 000 [MPa]
- modul pružnosti v tlaku: 15 000 [MPa]
- modul pružnosti jádra: 70 [MPa]

10.2 Vypočtené hodnoty ohybové tuhosti

V následující tabulce jsou uvedeny hodnoty ohybové tuhosti a stupně bimodularity, které byly pomocí vytvořeného programu vypočítány. Ohybová tuhost je vyjádřena pomocí efektivního modulu pružnosti E_{ef} .

Tab. 8: Vypočtené hodnoty ohybové tuhosti pomocí programu

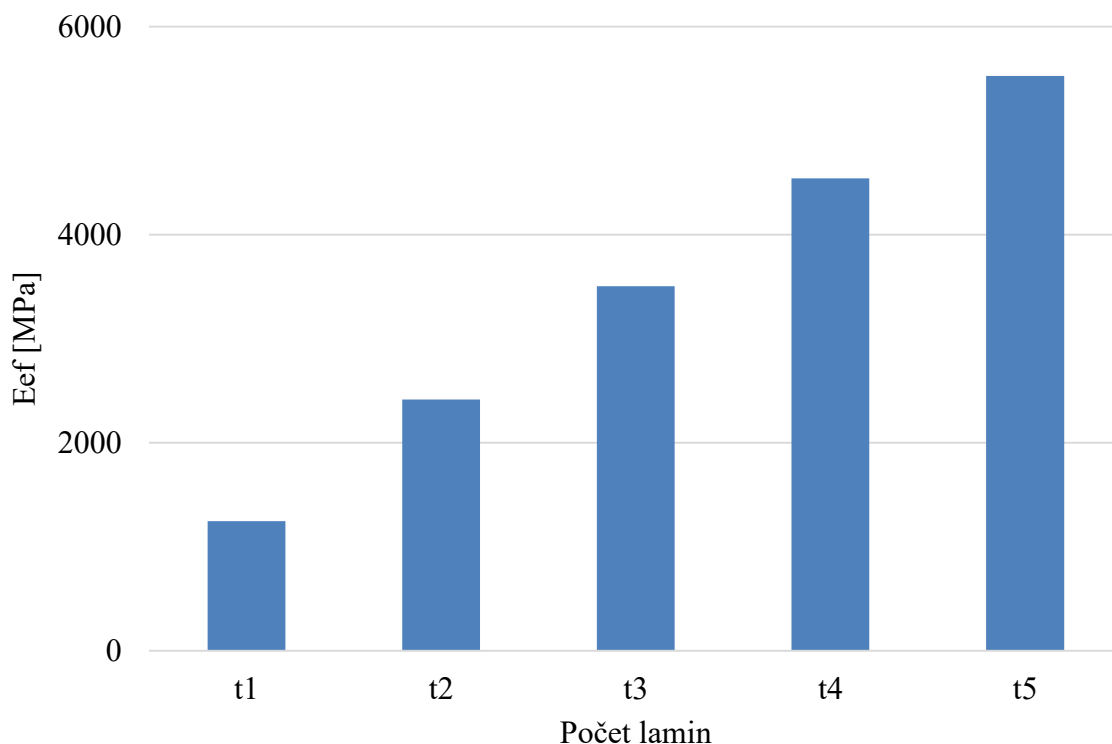
Vzorek	t_1 [mm]	E_{ef} [MPa]	E_-/E_+
V1	0,23	2 225	0,68
V2	0,46	4 107	0,68
V3	0,69	5 910	0,68

11 STANOVENÍ ZÁVISLOSTI POČTU LAMIN NA TUHOSTI

Za pomoci programu vytvořeného v tabulkovém procesoru Microsoft Excel 2016 byla stanovena závislost počtu lamin na tuhosti sendvičové struktury, která je vyjádřena pomocí efektivního modulu pružnosti.

Pro všechny výpočty ohybové tuhosti byly nastaveny následující jednotné parametry:

- výška laminy: 0,23 [mm]
- výška sendviče: 20 [mm]
- modul pružnosti v tahu: 22 000 [MPa]
- modul pružnosti v tlaku: 15 000 [MPa]
- modul pružnosti jádra: 70 [MPa]



Graf 1: Závislost počtu lamin na ohybové tuhosti sendvičové struktury

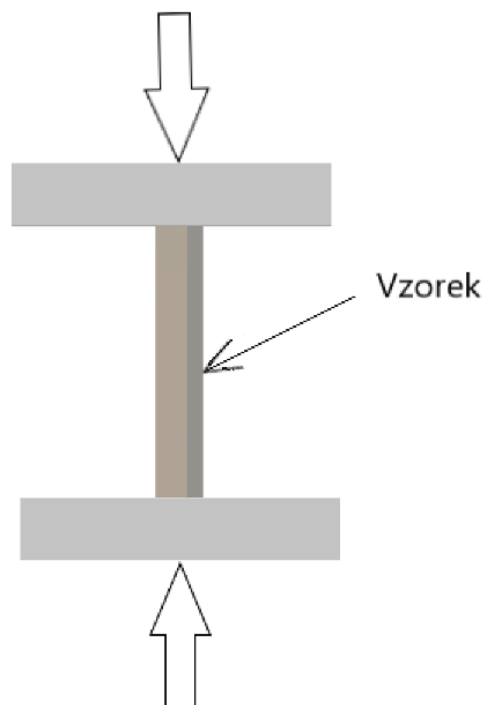
Z grafu č. 1 můžeme vyčíst, že s přibývajícím počtem lamin roste ohybová tuhost sendvičové struktury. Tato tuhost ovšem neroste lineárně. V případě pěti lamin na každé straně sendviče by byla ohybová tuhost více než čtyřnásobná, oproti sendviči s jednou laminou na každé straně sendvičové struktury.

12 ZKOUŠKA TLAKEM

Zkouška tlakem patří mezi základní mechanické zkoušky. Cílem je určit chování nebo odezvu materiálu, která nastane v průběhu zatížení vzorku.

Při zkoušce tlakem jsou zkušební vzorky zatíženy dvěma stejně velkými silami, které působí tlakem v podélné ose vzorku. Na základě provedené zkoušky se v případě této práce stanoví:

- modul pružnosti v tlaku,
- mez pevnosti v tlaku,
- deformace na mezi pevnosti.



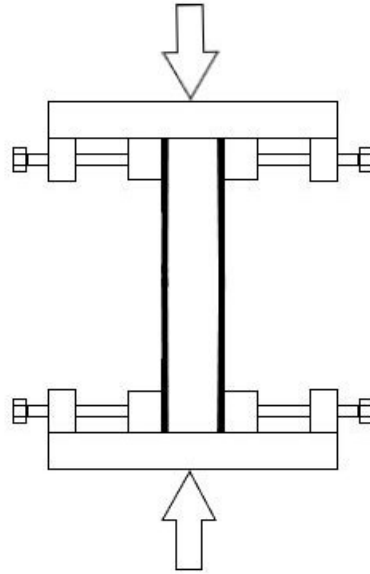
Obr. 39: Schéma tlakové zkoušky

Při zkoušení vzorků sendvičových struktur může dojít k celé řadě poruch, které jsou blíže popsány v kapitole 5.

Pro zkoušku tlakem byl použit stroj ZWICK ROELL 1456.

12.1 Přípravek

Aby se při zkoušení vzorků zabránilo vybočení vzorku z kolmé roviny, bylo využito jednoduchého přípravku. Sendvič je upnutý do zkušebního úchytu na obou koncích a vystaven tlakové síle rovnoběžné s rovinou sendviče. Schéma použitého přípravku i přípravek použitý v praxi jsou na následujících obrázcích.



Obr. 40: Schéma přípravku



Obr. 41: Použitý přípravek pro měření tlakové zkoušky

12.2 Stanovené parametry pro zkoušky tlakem

Pro všechny vzorky byly nastaveny jednotné parametry:

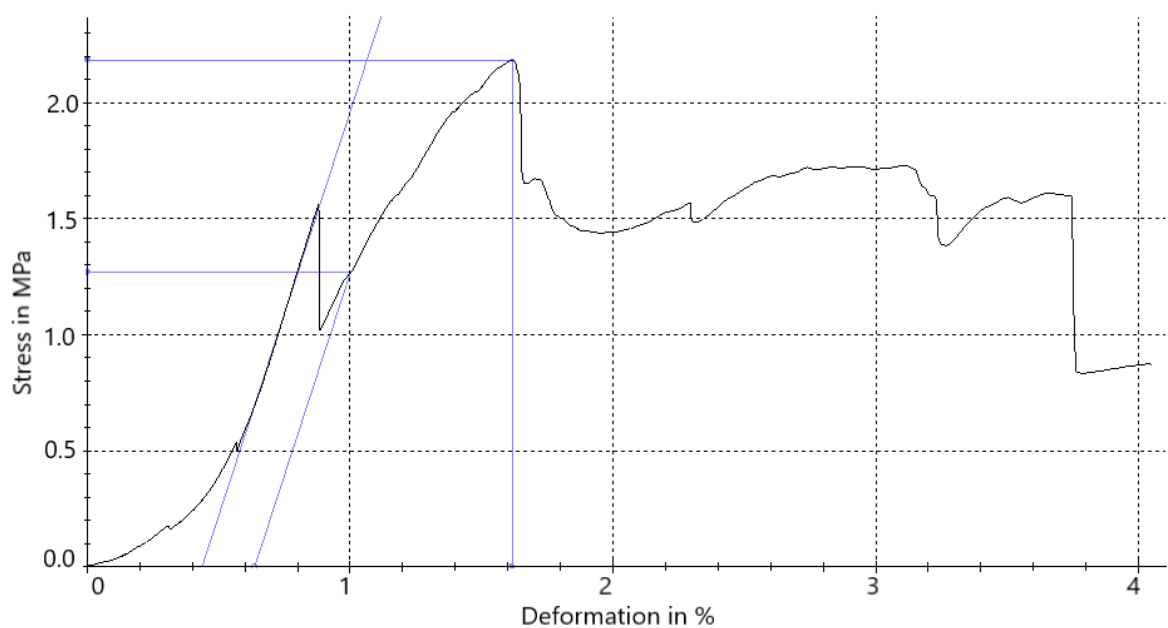
- rychlost: 1 mm/min
- předzatižení: 2 [N]
- rychlost při měření modulu pružnosti: 1 mm/min
- výška, šířka vzorku: a, b [mm]
- délka vzorku: 130 mm

12.3 Výsledky měření – vzorek V1

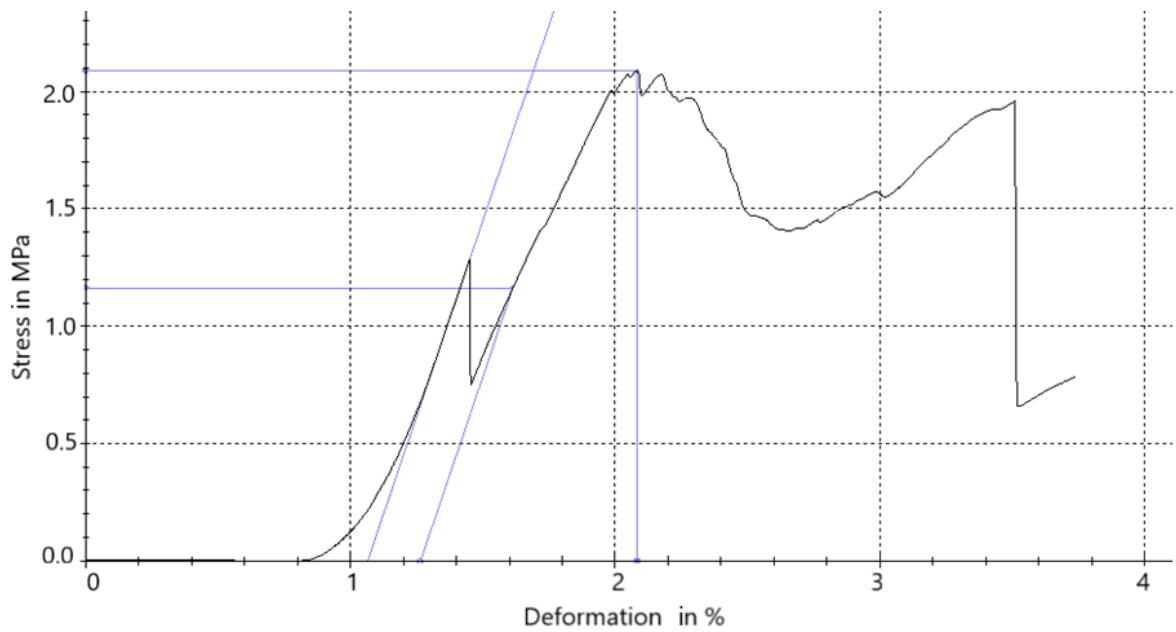
Naměřené výsledky vzorků V1 jsou uvedeny v Tab. 9.

Tab. 9: Naměřené výsledky vzorků V1

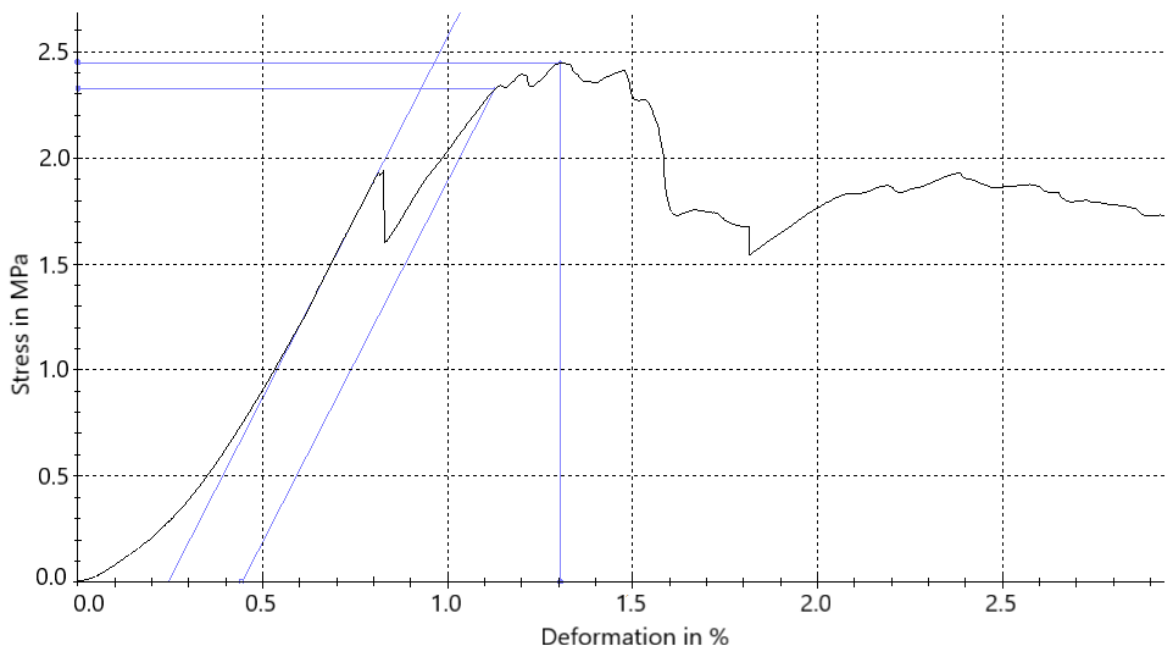
Nr	a [mm]	b [mm]	E. [MPa]	σ . [MPa]	Δl_M [mm]
1	20	30	348	2,18	2,1
2	20	30	333	2,09	2,7
3	20	30	340	2,45	1,7



Obr. 42: Graf měření V1 – 1



Obr. 43: Graf měření V1 – 2



Obr. 44: Graf měření V1 – 3

Tab. 10: Statistické výsledky měření vzorků V1

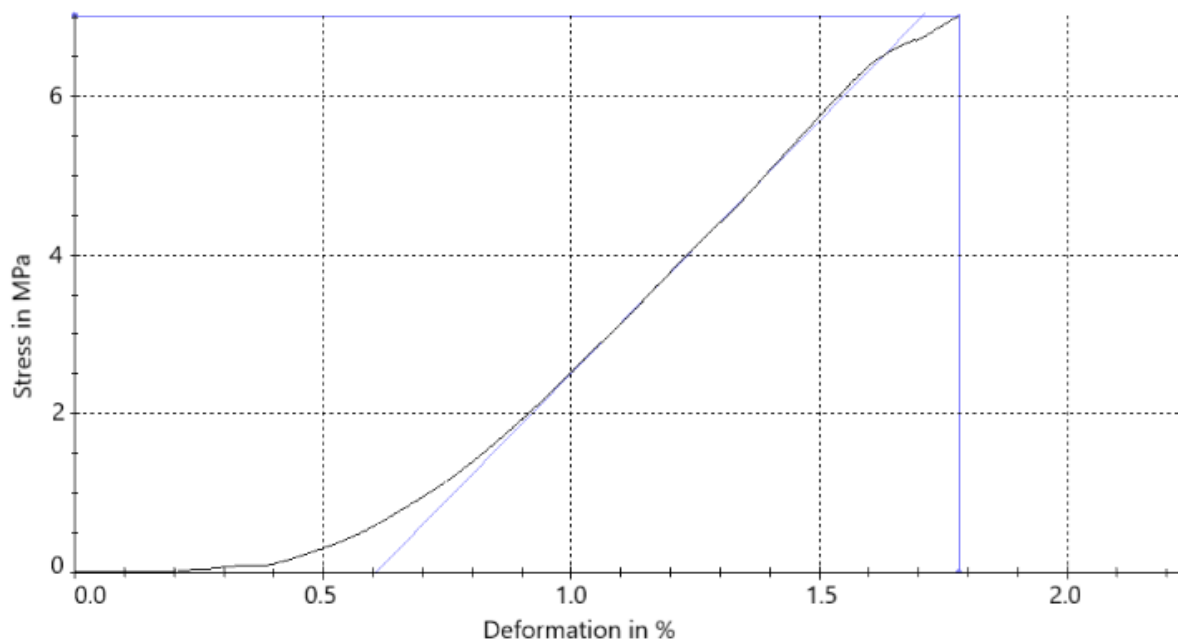
$n = 3$	a [mm]	b [mm]	E [MPa]	σ [MPa]	Δl_M [mm]
\bar{x}	20	30	340	2,24	2,2
s	0	0	7,62	0,188	0,5
v	0	0	2,24	8,40	23,49

12.4 Výsledky měření – vzorek V2

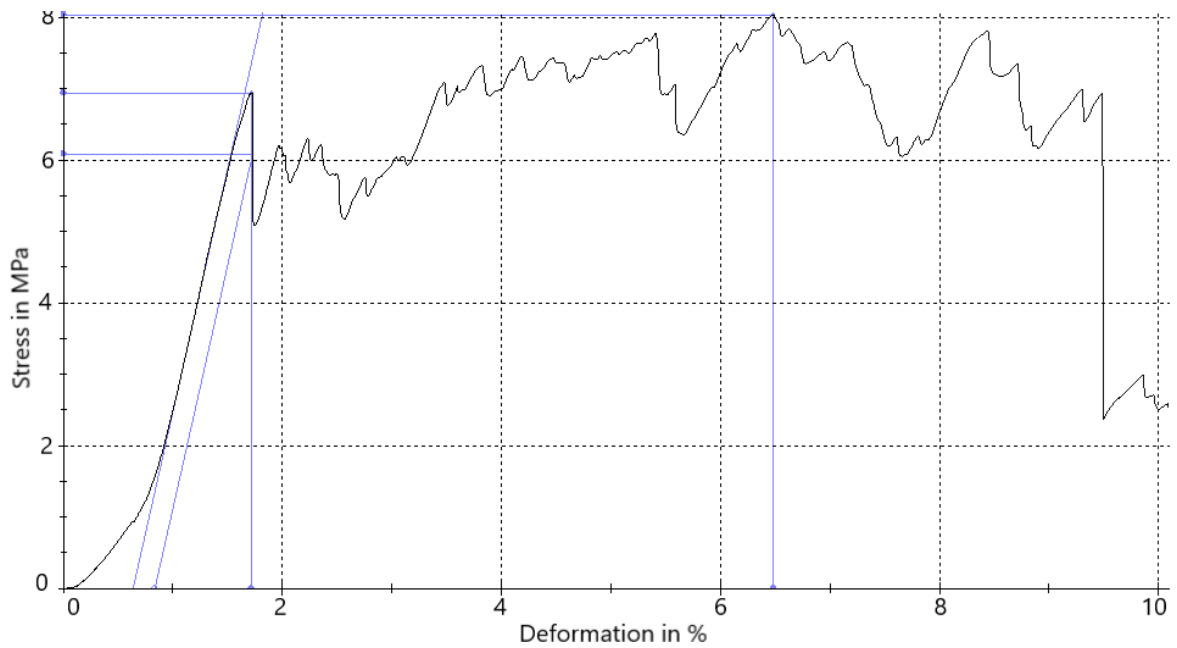
Naměřené výsledky vzorků V2 jsou uvedeny v Tab. 11.

Tab. 11: Naměřené výsledky vzorků V2

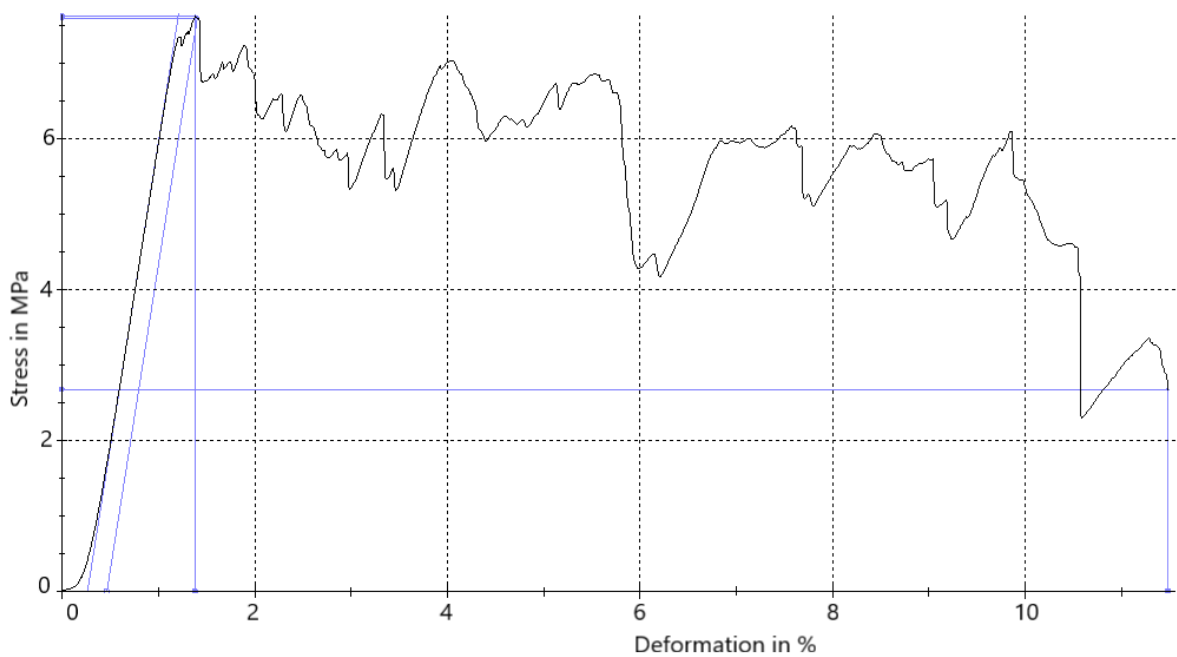
Nr	a [mm]	b [mm]	E. [MPa]	σ . [MPa]	Δl_M [mm]
1	20,5	30	636	7,01	2,3
2	20,5	30	681	8,04	8,4
3	20,5	30	807	7,61	1,8



Obr. 45: Graf měření V2 – 1



Obr. 46: Graf měření V2 – 2



Obr. 47: Graf měření V2 – 3

Tab. 12: Statistické výsledky měření vzorků V2

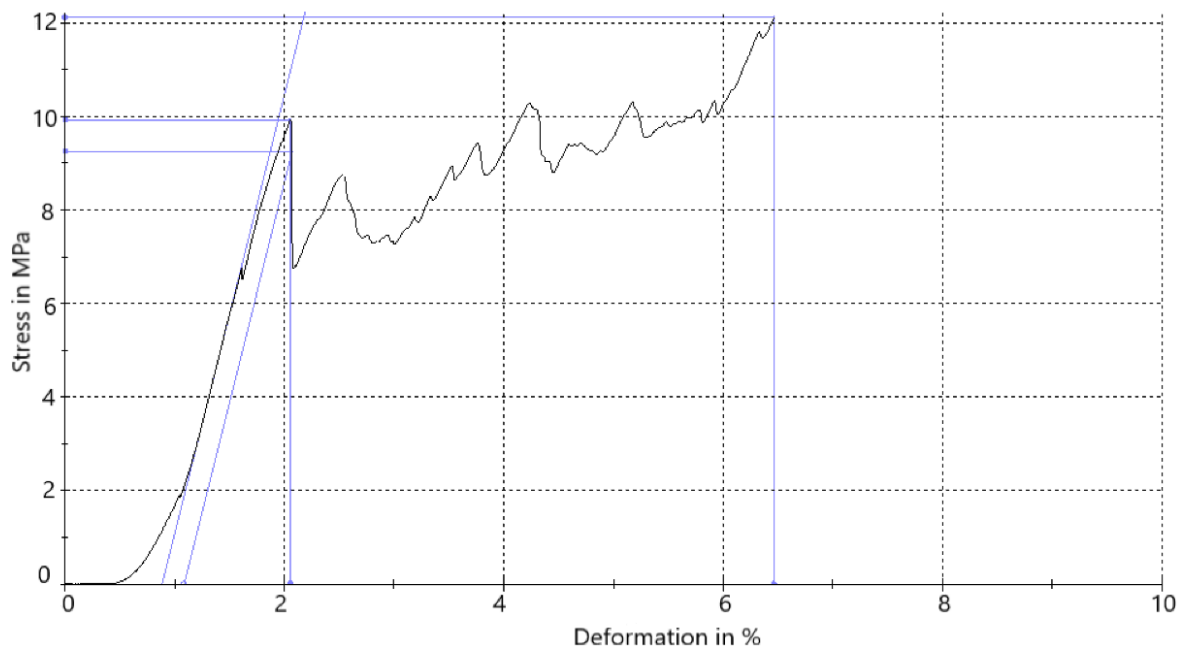
n = 3	a [mm]	b [mm]	E. [MPa]	σ . [MPa]	Δl_M [mm]
\bar{x}	20,5	30	708	7,55	4,2
s	0	0	88,5	0,517	3,7
v	0	0	12,50	6,85	88,19

12.5 Výsledky měření – vzorek V3

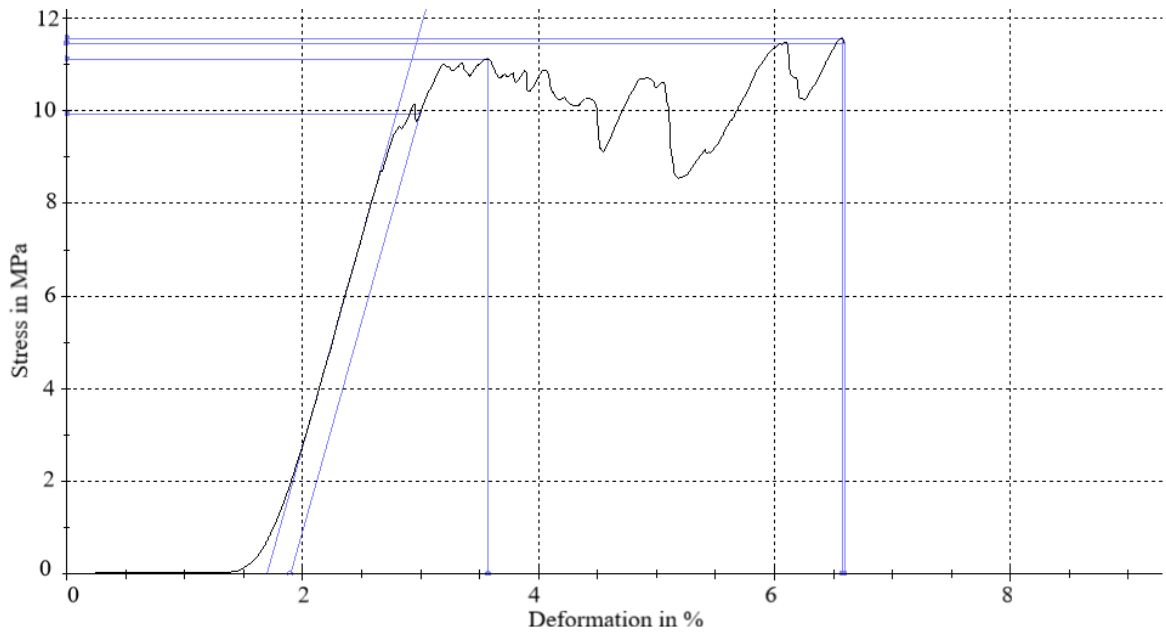
Naměřené výsledky vzorků V3 jsou uvedeny v Tab. 13.

Tab. 13: Naměřené výsledky vzorků V3

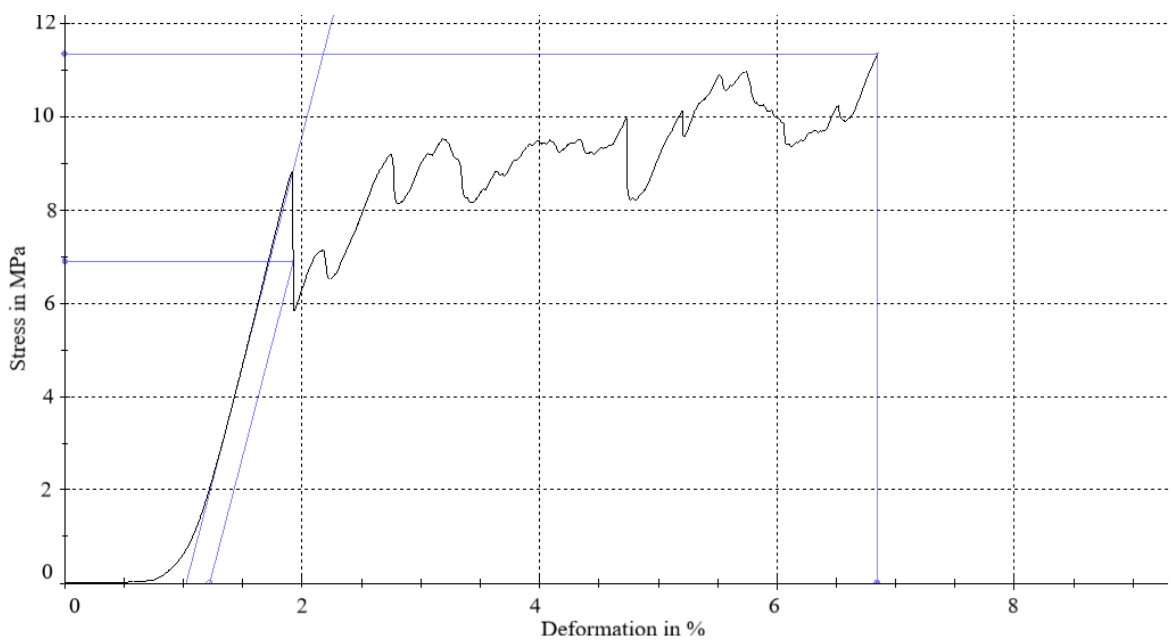
Nr	a [mm]	b [mm]	E. [MPa]	σ . [MPa]	Δl_M [mm]
1	21,2	30	939	12,1	8,4
2	21,2	30	904	11,6	8,5
3	21,2	30	983	11,3	8,9



Obr. 48: Graf měření V3 – 1



Obr. 49: Graf měření V3 – 2



Obr. 50: Graf měření V3 – 3

Tab. 14: Statistické výsledky měření vzorků V3

n = 3	a [mm]	b [mm]	E- [MPa]	σ . [MPa]	Δl_M [mm]
\bar{x}	21,2	30	942	11,7	8,6
s	0	0	39,4	0,390	0,3
v	0	0	4,18	3,34	2,96

12.6 Souhrn výsledků tlakových zkoušek

Shrnutí výsledků vybraných průměrných hodnot pro vzorky V1, V2 a V3.

Tab. 15: Shrnutí výsledků tlakové zkoušky

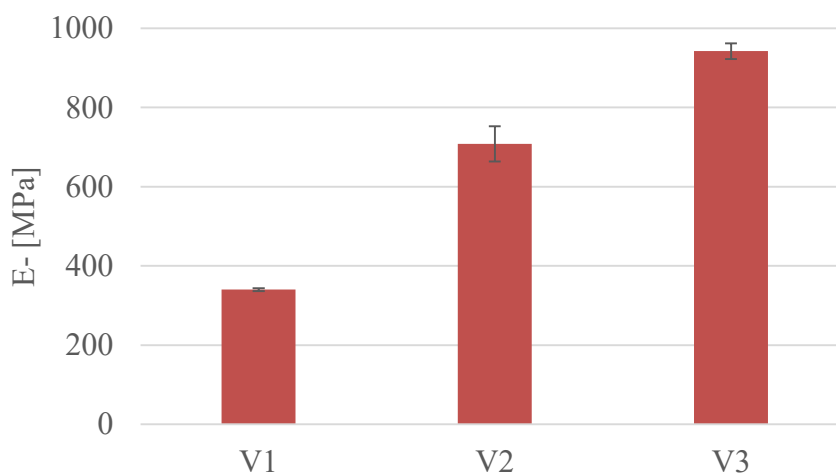
Vzorek	E. [MPa]	σ . [MPa]	Δl_M [mm]
V1	340	2,24	2,2
V2	708	7,55	4,2
V3	942	11,7	8,6

12.6.1 Modul pružnosti v tlaku

Moduly pružnosti v tlaku všech vzorků byly graficky vyhodnoceny. Do grafického znázornění byla zahrnuta i směrodatná odchylka každého vzorku.

Tab. 16: Vyhodnocení modulu pružnosti v tlaku

Vzorek	E. [MPa]	s
V1	340	7,62
V2	708	88,5
V3	942	39,4



Graf 2: Vyhodnocení tlakové zkoušky – modul pružnosti v tlaku

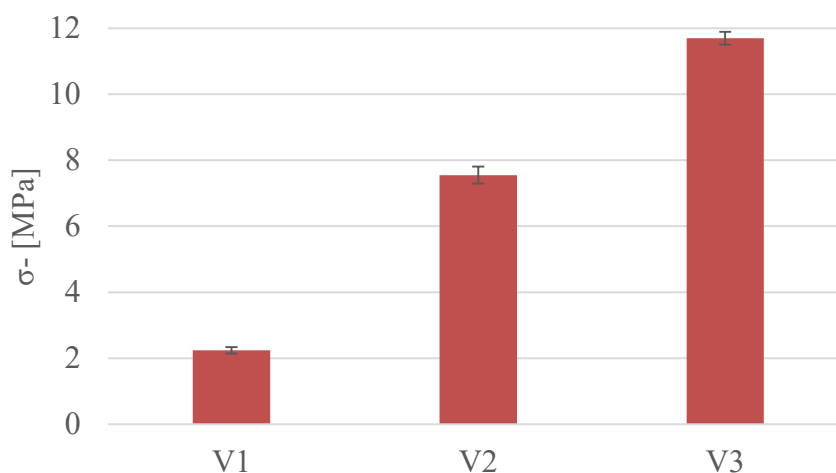
Hodnota E roste s počtem lamin dané sendvičové struktury. Vzorky V2 mají dvojnásobný modul pružnosti v tlaku než vzorky V1. Mezi vzorky V2 a V3 je rozdíl v hodnotě E méně výrazný. Nejvyšších hodnot modulu pružnosti v tahu dosahují vzorky V3, tj. vzorky se třemi laminy na každé straně sendviče. Směrodatná odchylka je nejnižší u vzorků V1, nejvyšší u vzorků V2.

12.6.2 Mez pevnosti v tlaku

Mez pevnosti v tlaku všech vzorků byla graficky vyhodnocena. Do grafického znázornění byla zahrnuta i směrodatná odchylka každého vzorku.

Tab. 17: Vyhodnocení meze pevnosti v tlaku

Vzorek	σ [MPa]	s
V1	2,24	0,188
V2	7,55	0,517
V3	11,7	0,390



Graf 3: Vyhodnocení tlakové zkoušky – mez pevnosti v tlaku

Mez pevnosti v tlaku také roste s počtem lamin dané sendvičové struktury. Vzorky V2 mají více než trojnásobnou mez pevnosti v tlaku oproti vzorkům V1. Nejvyšší hodnotu meze pevnosti v tlaku mají vzorky V3, a to o více než 4 MPa než mají vzorky V2. Směrodatná odchylka se u všech vzorků výrazně neliší.

12.7 Skutečný modul pružnosti v tlaku

Naměřený modul pružnosti v tlaku sendvičové struktury za použití stroje ZWICK ROELL 1456 není správný, jelikož bere sendvičovou strukturu jako homogenní materiál. Jak již bylo zmíněno v kapitole 4, pro případ praktického vyhodnocování výsledků je zaveden pojem efektivní modul pružnosti E_{ef} .

Pro výpočet skutečného modulu pružnosti v tlaku (modul jádra je zanedbán) využijeme rovnosti:

$$E_{ef} \cdot S_0 = E_- \cdot S_t, \quad (4)$$

kde S_t představuje obsah lamin v dané sendvičové struktuře. Po úpravě:

$$E_- = \frac{E_{ef} \cdot S_0}{S_t}. \quad (5)$$

V Tab. 18 jsou uvedeny vypočtené skutečné moduly pružnosti v tlaku, které vychází z naměřených hodnot tlakových zkoušek.

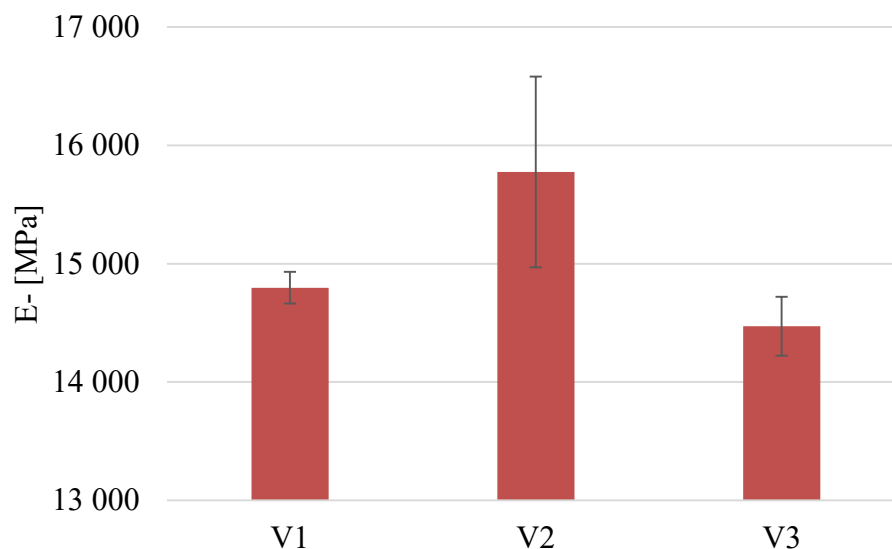
Tab. 18: Vypočtené skutečné hodnoty modulu pružnosti v tlaku

Vzorek	Nr	E_{ef} [MPa]	S_0 [mm ²]	S_t [mm ²]	E_- [MPa]
V1	1	348	600	13,8	15 130
	2	333	600	13,8	14 478
	3	340	600	13,8	14 783
V2	1	636	615	27,6	14 172
	2	681	615	27,6	15 174
	3	807	615	27,6	17 982
V3	1	939	636	41,4	14 425
	2	904	636	41,4	13 888
	3	983	636	41,4	15 101

Pro grafické vyhodnocení výsledků je využito průměrů jednotlivých E. společně s jejich směrodatnou odchylkou.

Tab. 19: Průměrné vypočtené hodnoty E.

Vzorek	\bar{x} [MPa]	s
V1	14 797	266,4
V2	15 776	1 612,6
V3	14 471	496,3

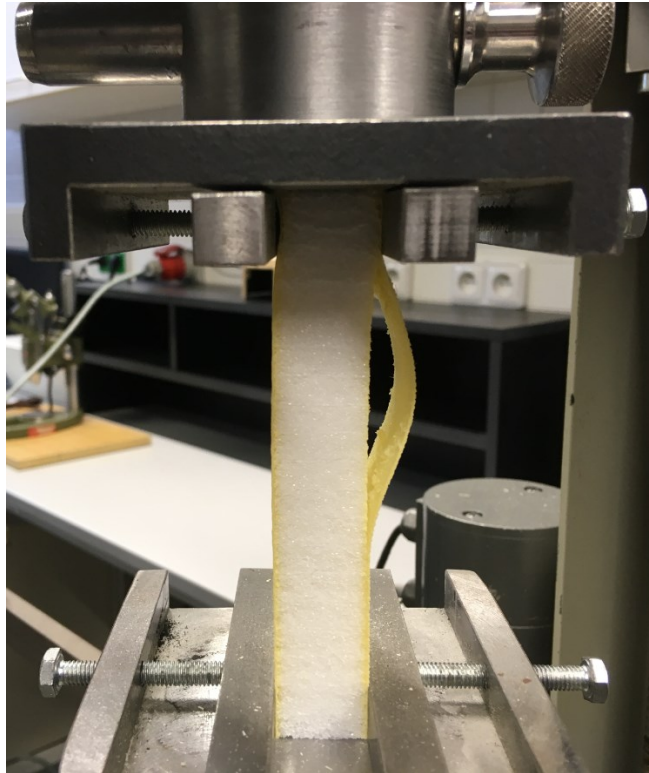


Graf 4: Vyhodnocení skutečného modulu pružnosti v tlaku

Z grafu můžeme vyčíst, že nejvyšších hodnot modulu pružnosti v tlaku dosahují vzorky V2, zároveň však mají největší hodnotu směrodatné odchylky. Tato odchylka značí, že rozpětí vypočítaných skutečných modulů pružnosti v tlaku se výrazně liší. Vysoká hodnota směrodatné odchylky může být způsobena například kolísavou kvalitou měřených vzorků.

I když mají vzorky V3 podle výsledků měření na stroji ZWICK ROELL 1456 největší hodnotu modulu pružnosti v tlaku, po přepočítání skutečného modulu pružnosti v tlaku dosahují nejnižších hodnot.

Z následujícího obrázku je patrné, že mezi jádrem sendviče a laminy je nedostatečná adheze.



Obr. 51: Nedostatečná adheze u použitých vzorků pro měření

12.8 Výpočet ohybové tuhosti ze získaných hodnot tlakových zkoušek

Ohybová tuhost ze získaných hodnot tlakových zkoušek byla vypočítána pomocí vytvořeného programu a bude vyjádřena pomocí efektivního modulu pružnosti.

Pro všechny výpočty ohybové tuhosti byly nastaveny následující jednotné parametry:

- výška laminy: 0,23 [mm]
- modul pružnosti v tahu: 22 000 [MPa]
- modul pružnosti jádra: 70 [MPa]

Hodnoty modulu pružnosti v tlaku jsou dány výsledky tlakových zkoušek.

Ohybová tuhost ze získaných hodnot tlakových zkoušek je vztažena na 1 mm šířky.

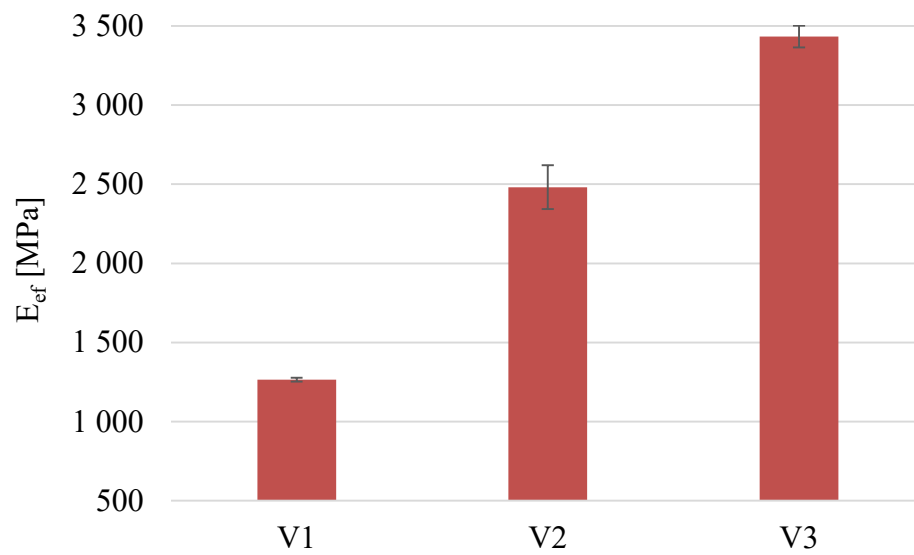
Tab. 20: Vypočtené hodnoty ohybové tuhosti ze získaných hodnot tlakových zkoušek

Vzorek	Nr	E ₋ [MPa]	J _R [mm ⁴]	E _{ef} [MPa]	E ₋ /E ₊
V1	1	15 130	39	1280	0,69
	2	14 478	38	1250	0,66
	3	14 783	38	1264	0,67
V2	1	14 172	75	2340	0,64
	2	15 174	78	2433	0,69
	3	17 982	85	2670	0,82
V3	1	14 425	117	3428	0,66
	2	13 888	115	3352	0,63
	3	15 101	120	3519	0,69

Pro grafické vyhodnocení výsledků je využito průměrů jednotlivých E_{ef} společně s jejich směrodatnou odchylkou.

Tab. 21: Průměrné vypočtené hodnoty E_{ef}

Vzorek	\bar{x} [MPa]	s
V1	1 265	12,3
V2	2 481	138,9
V3	3 433	68,3



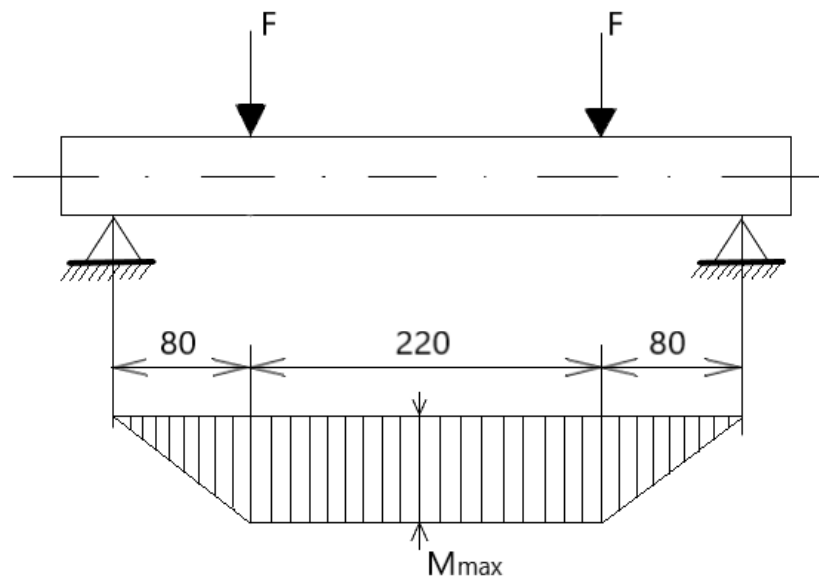
Graf 5: Vyhodnocení ohybové tuhosti z tlakových zkoušek

Z grafu je patrné, že nejvyšší tuhosti dosahují sendvičové struktury se třemi vrstvami laminátu na každé straně sendvičové struktury. Směrodatná odchylka u všech vzorků je nízká, tudíž rozdíly v ohybové tuhosti nejsou výrazné.

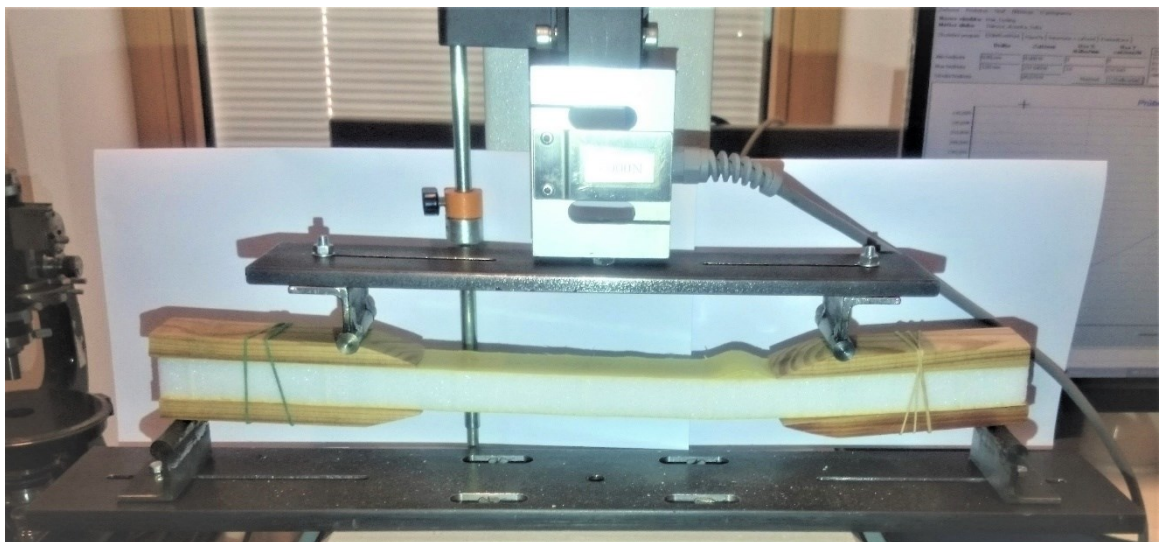
13 ZKOUŠKA OHYBEM

Zkoušení vzorků proběhlo pomocí čtyřbodové zkoušky ohybem. Při probíhající zkoušce je vzorek uložen na dvou podporách a zatěžován současně dvěma silami.

Pomocí zkoušky se zjišťuje pevnost v ohybu a průhyb vzorku až do okamžiku, kdy se přelomí nebo trvale prohne.



Obr. 52: Schéma čtyřbodové ohybové zkoušky



Obr. 53: Čtyřbodová ohybová zkouška

Zkušební vzorky jsou v místě podpor podepřeny dřívky, které jsou ke vzorku připevněny pomocí gumiček. Toto řešení připevnění nezvyšuje tuhost sendviče.

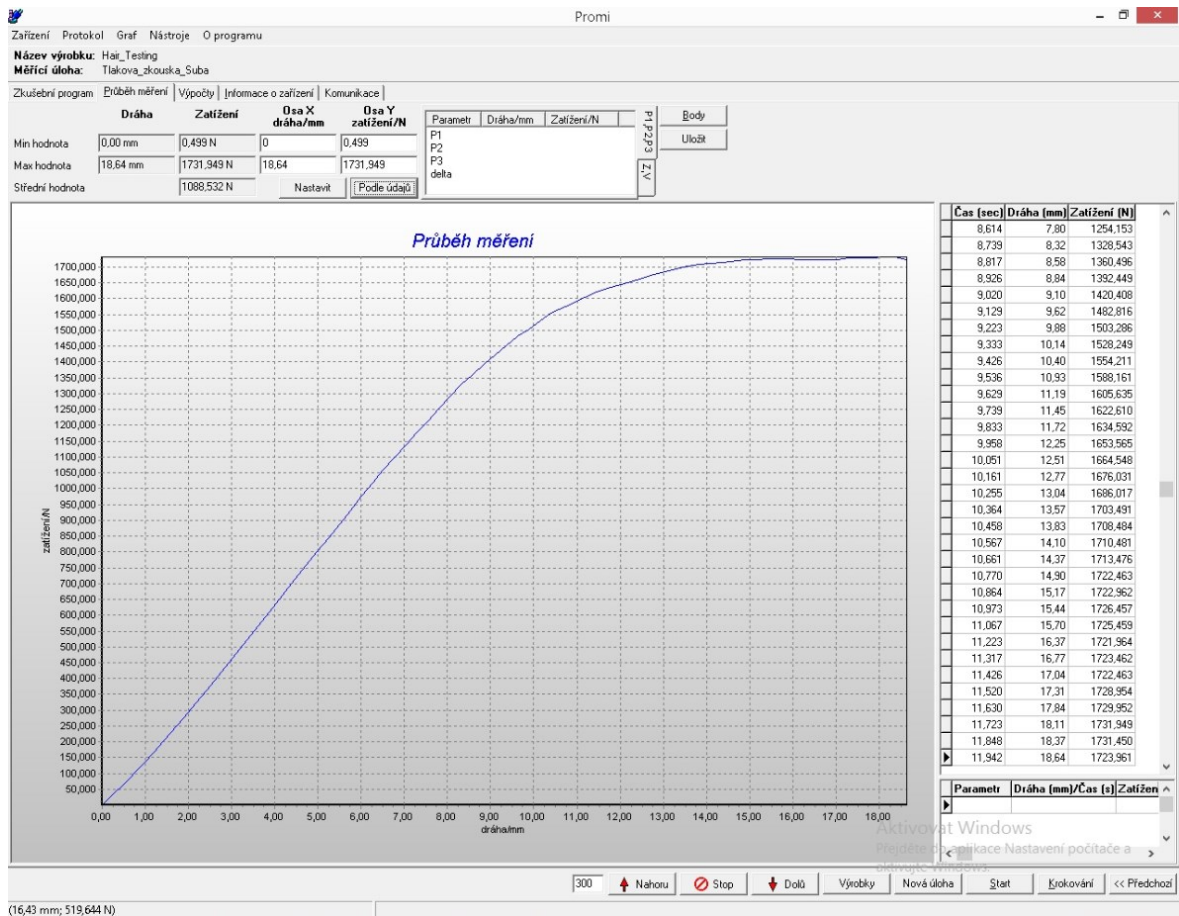
Pro vykonání čtyřbodové zkoušky ohybem byl použit přístroj Promi-PC, který byl napojen na stolní počítač. Díky připojenému stolnímu počítači mohlo dojít k zaznamenání dat z jednotlivých ohybových zkoušek.

Všechny výsledky měření vzorků jsou zaznamenávány pomocí nadstavbového softwaru Promi-PC. Software vyhodnotí průběh měření do grafu, kde je závislá dráha [mm] na zatížení [N]. Dále software Promi-PC zaznamená maximální hodnotu zatížení společně se střední hodnotou, délku posuvu beranu a čas, který umožní určit přesnou dobu okamžiku při daném zatížení a délce posuvu. Rychlost posuvu beranu byla nastavena na 200 mm/min.

Pro zachycení jednotlivých průhybů sendvičových struktur byla využita kamera Olympus i-Speed 2. Po nasnímání měření lze uložený záznam okamžitě prohlížet a analyzovat s využitím programu i-SPEED Control Software. Snímání kamery bylo nastaveno na 500 fps.



Obr. 54: Pracoviště pro čtyřbodovou ohybovou zkoušku



Obr. 55: Zaznamenaná data ohybové zkoušky pomocí softwaru Promi-PC

13.1 Stanovení průhybu

Pro výpočet ohybové tuhosti je nutné znát průhyb, který nastane na ohýbaném vzorku. Vzhledem k tomu, že software Promi-PC zaznamenává pouze dráhu beranu, nikoliv průhyb, bylo třeba průhyb odměřit s využitím softwaru i-SPEED Control Software.

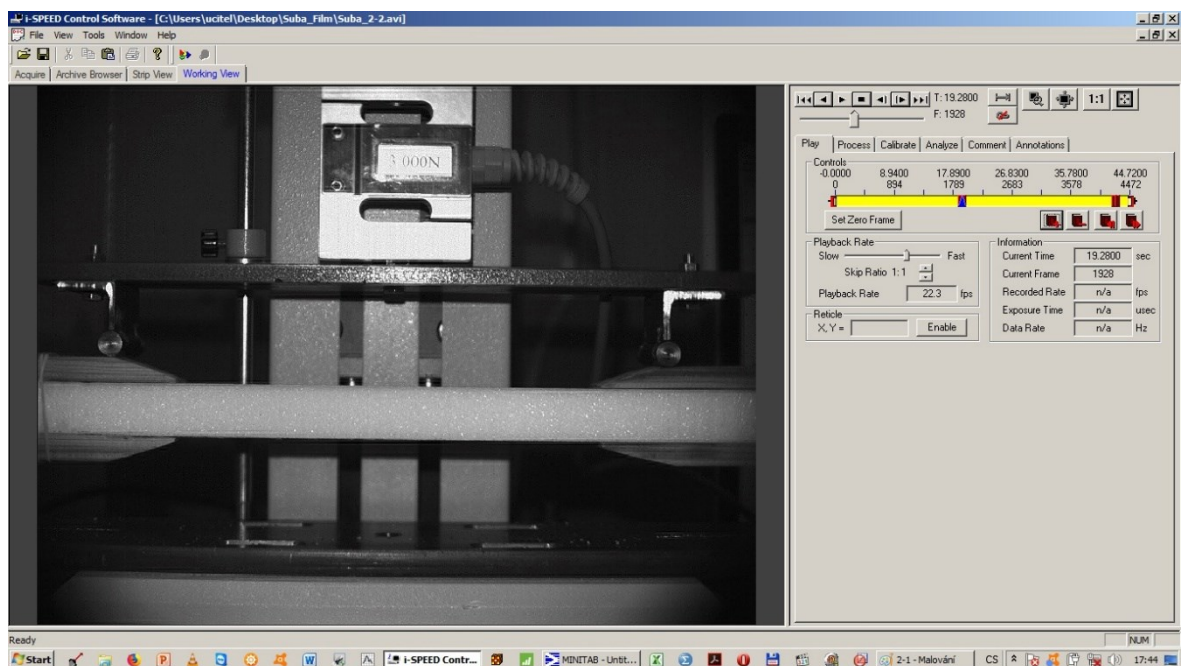
Oba využívané softwary nejsou synchronizovány, proto bylo nutné nejprve jednotlivé záznamy sjednotit tak, aby doba počátku kamerového záznamu odpovídala počátku měření. Dalším krokem bylo sjednotit čas měření s časem kamerového záznamu. Jelikož byla kamera Olympus i-Speed 2 nastavena na 500 fps, doba záznamu se prodloužila, protože snímky byly ukládány v delších intervalech (oproti 1000 fps).

Prvním krokem pro stanovení průhybu ohýbaného vzorku bylo otevření programu i-SPEED Control Software a vybrání příslušného záznamu.



Obr. 56: I-SPEED Control Software – otevření záznamu

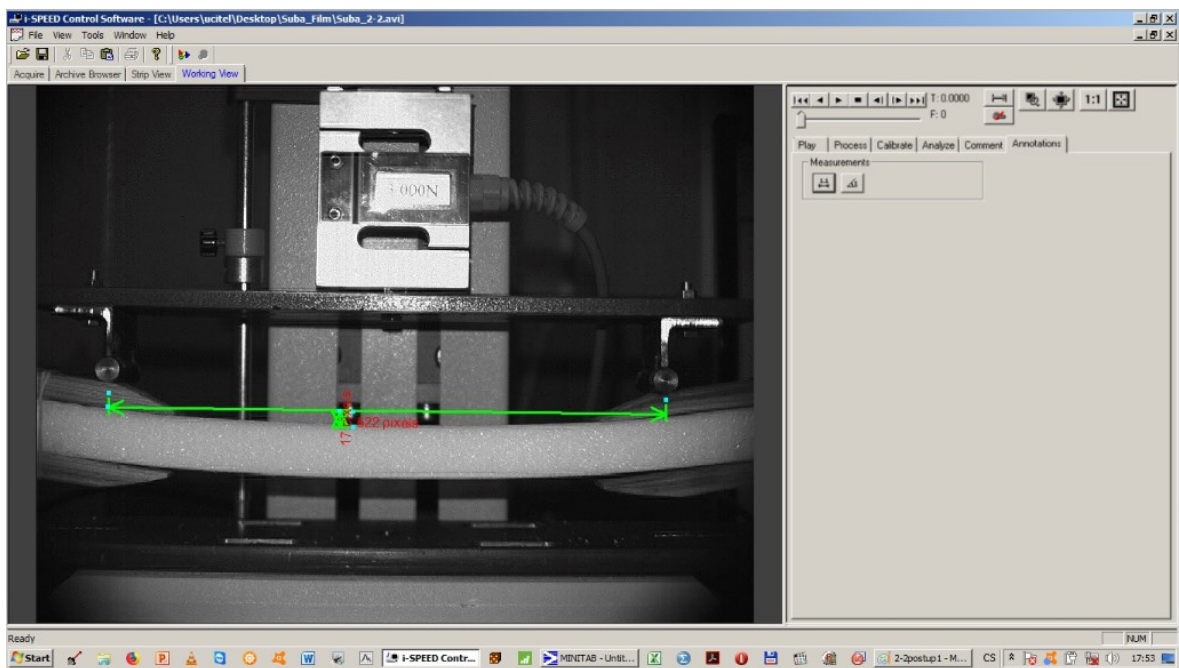
Po otevření příslušného záznamu se v levé části programu zobrazí kamerový záznam, v pravé části programu ovládací panel. V záložce play se pomocí posuvníku nastaví počátek a konec měření. Tyto body se zachytí pomocí přidávané záložky.



Obr. 57: I-SPEED Control Software – ohraničení času měření

U každé záložky je odpovídající číslo snímku, stanoví se Frame start – Frame stop. Vypočtený rozdíl nám udává počet snímků, které zachycují příslušné měření. Sjednocení obou časů měření docílíme pomocí roznásobení celkového počtu snímků měření s dobou trvání jednoho snímku (0,002 s).

Abychom stanovili lineární závislost zatížení na průhybu, změříme průhyb každého vzorku v různých časových intervalech (framech) ohybové zkoušky. Měření uskutečníme v záložce Annotations. Naměřená vzdálenost se uvádí v pixels, proto je třeba ji přepočítat na mm. Přepočet provedeme pomocí známé velikosti, tj. vzdálenosti mezi silami, která činí 220 mm. Získané hodnoty vyneseme do grafu. Ve vzniklé lineární oblasti vybereme hodnotu průhybu společně s odpovídajícím zatížením a tyto hodnoty využijeme při výpočtu ohybové tuhosti daného vzorku.



Obr. 58: I-SPEED Control Software – měření průhybu

Měření průhybu pomocí programu i-SPEED Control Software nemusí být zcela přesné, jelikož při odměřování může docházet k drobným odchylkám. Tyto odchylky mohou být způsobeny např. špatnou viditelností měřených bodů. V případě další studie by bylo lepší zvolit pro měření průhybu přesnější metodu.

V následující tabulce jsou uvedeny naměřené hodnoty průhybu společně s odpovídající zatěžující silou. Hodnota průhybu vzorku V2 – 3 nemohla být stanovena, jelikož se nepodařilo správně zaznamenat výsledky měření.

Tab. 22: Hodnoty průhybu z ohybových zkoušek

Vzorek	Nr	2F [N]	y_1 [mm]
V1	1	59	4,35
	2	517	5,12
	3	580	6,78
V2	1	1 334	6,03
	2	1 430	6,01
V3	1	1 603	5,16
	2	1 643	5,10
	3	1 588	5,40

13.2 Výpočet ohybové tuhosti ze získaných hodnot ohybových zkoušek

Ohybová tuhost bude vyjádřena pomocí efektivního modulu pružnosti. Efektivní modul pružnosti se u čtyřbodové ohybové zkoušky se vypočte:

$$E_{ef} = \frac{F \cdot l^2 \cdot c}{8 \cdot y_1 \cdot J}, \quad (6)$$

kde l je vzdálenost mezi silami a c je vzdálenost mezi silou a podpěrou.

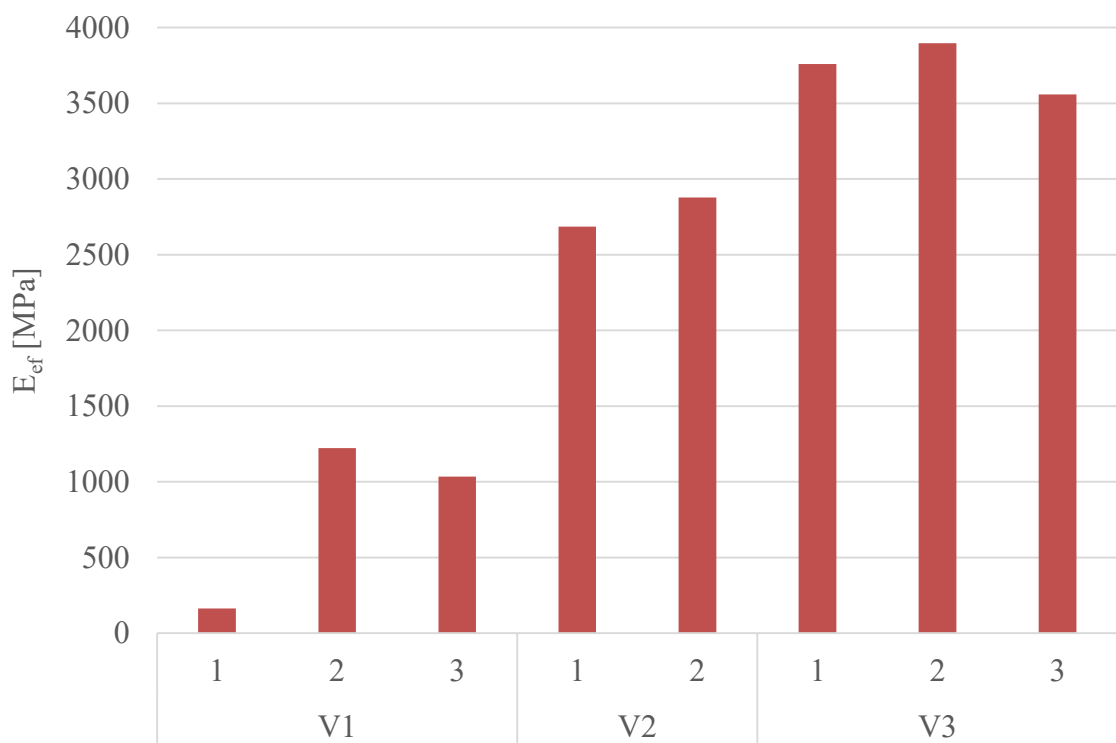
Pro všechny výpočty ohybové tuhosti bylo počítáno s hodnotami:

- vzdálenost mezi silami: 220 [mm]
- vzdálenost mezi silou a podpěrou: 80 [mm]

Tab. 23: Vypočtené hodnoty ohybové tuhosti z ohybových zkoušek

Vzorek	Nr	2F [N]	y_1 [mm]	E_{ef} [MPa]
V1	1	59	4,35	164
	2	517	5,12	1 222
	3	580	6,78	1 035
V2	1	1 334	6,03	2 686
	2	1 430	6,01	2 879
V3	1	1 603	5,16	3 759
	2	1 643	5,10	3 897
	3	1 588	5,40	3 559

V následujícím grafu jsou srovnány jednotlivé hodnoty efektivního modulu pružnosti, které byly vypočteny ze získaných hodnot ohybových zkoušek.



Graf 6: Srovnání hodnot ohybové tuhosti z ohybových zkoušek

Z grafu je patrné, že jednotlivé hodnoty efektivního modulu pružnosti (tuhosti) jsou si v rámci jednotlivých vzorků poměrně blízké. Jedinou výjimku tvoří první vzorek V1, který vykazuje výrazně nižší hodnotu efektivního modulu pružnosti. Tato skutečnost může být způsobena špatnou kvalitou měřeného vzorku. Na Obr. 59 vidíme, že k porušení vzorku došlo separací vrstev. Tyto vrstvy vykazovaly nedostatečnou adhezi.



Obr. 59: Výsledné porušení vzorku V1 – 1 čtyřbodovou ohybovou zkouškou

Výsledné porušení vzorku V3 – 1 bylo mnohem větší oproti vzorku V1 – 1. Došlo k porušení jádra a následnému šíření trhliny směrem k vnějším vrstvám.

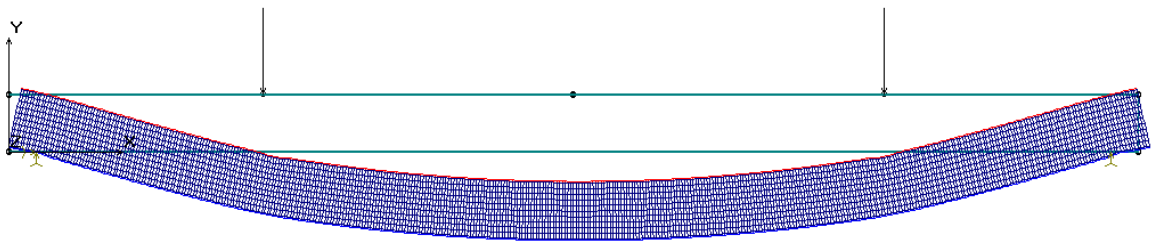


Obr. 60: Výsledné porušení vzorku V3 – 1 čtyřbodovou ohybovou zkouškou

14 FEM MODEL

FEM (Finite Element Method) je anglická zkratka pro metodu konečných prvků, která nám umožňuje vypočítat nejen deformace a rozložení napětíového pole namodelované součásti, ale i mnoho dalších parametrů, které umožní ověřit vlastnosti výrobku bez vyrobení prototypu.

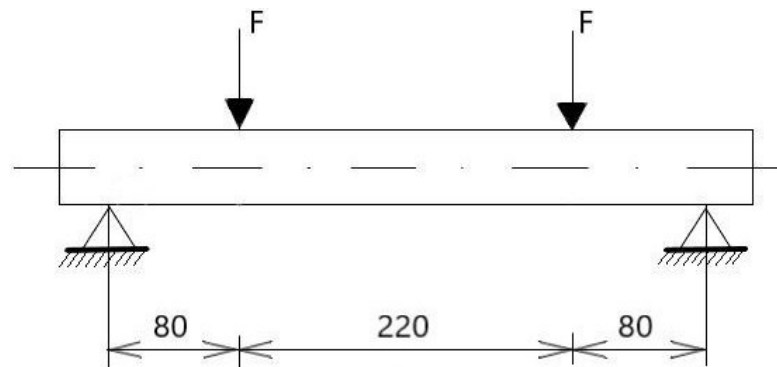
Pro vytvoření FEM modelu bylo využito programu COSMOS/M GeoStar.



Obr. 61: FEM model

14.1 Stanovené hodnoty

Pro vytvoření FEM modelu byly stanoveny stejné rozměry, které byly použity u čtyřbodové zkoušky ohybem.



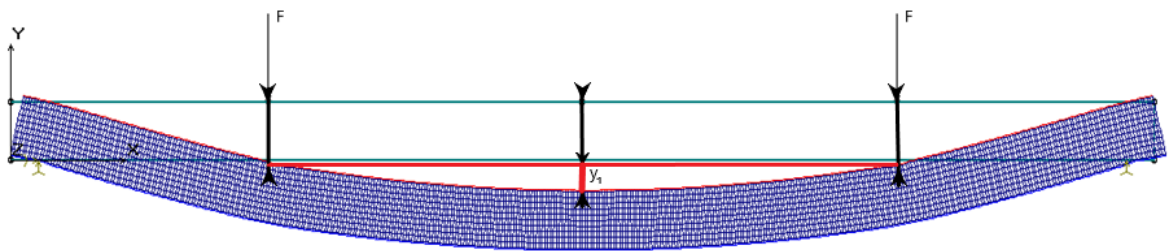
Obr. 62: Rozměry FEM modelu

Dále bylo stanoveno:

- zatížení: 1 000 [N]
- modul pružnosti v tahu: 22 000 [MPa]
- modul pružnosti v tlaku: 15 000 [MPa]
- modul pružnosti jádra: 70 [MPa]
- výška, šířka vzorku: a, b [mm]

14.2 Stanovení průhybu

Pro stanovení průhybu je potřeba nejprve zjistit posunutí namodelované sendvičové struktury v jejím středu. Další posunutí se zjišťuje pod zatěžující silou. Toto posunutí si je pod oběma silami rovno. Rozdíl těchto posunutí se rovná stanovenému průhybu y_1 .



Obr. 63: FEM model – stanovení průhybu

V následující tabulce jsou uvedeny zjištěné posunutí z jednotlivých FEM modelů a jejich vypočtené průhyby.

Tab. 24: Stanovení průhybu z FEM modelu

Vzorek	p_1 [mm]	p_2 [mm]	y_1 [mm]
V1	50,41	33,70	16,71
V2	31,20	22,31	8,71
V3	22,07	16,37	5,7

14.3 Výpočet ohybové tuhosti pomocí FEM modelu

Ohybová tuhost bude opět vyjádřena pomocí efektivního modulu pružnosti. Efektivní modul se vypočte stejným způsobem jako u čtyřbodové ohybové zkoušky, tedy dle (6).

Tab. 25: Vypočtené hodnoty ohybové tuhosti z FEM modelu

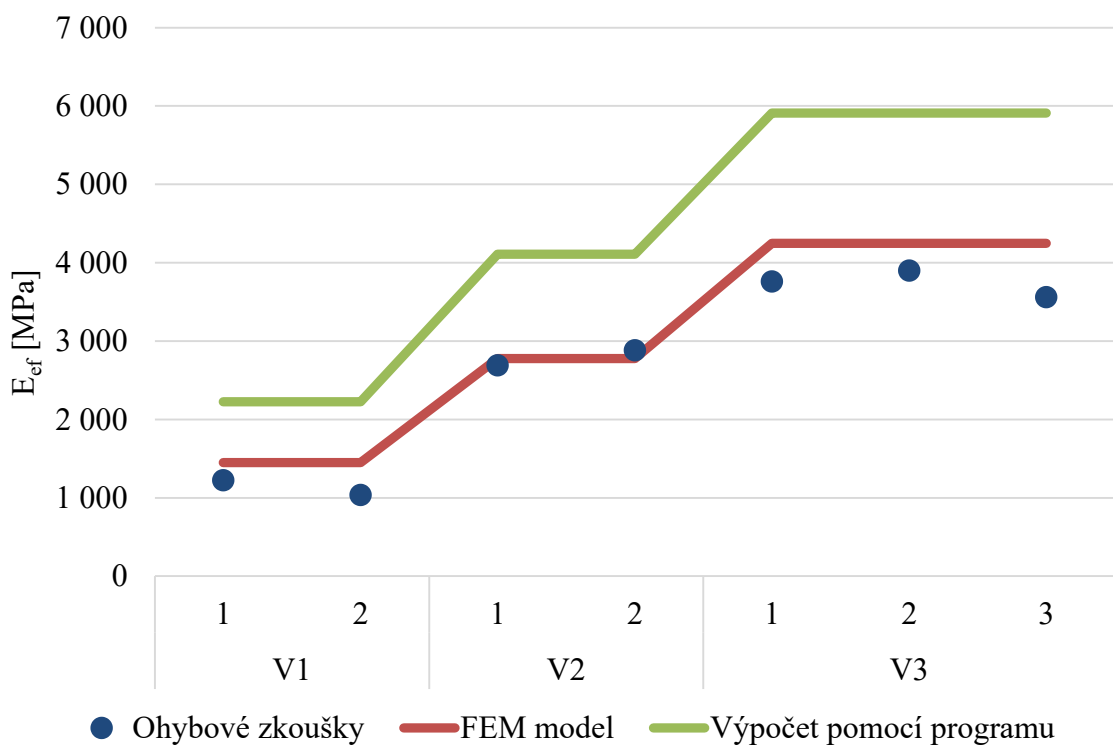
Vzorek	F [N]	y_1 [mm]	E_{ef} [MPa]
1	1 000	16,71	1 448
2	1 000	8,71	2 778
3	1 000	5,70	4 246

15 SROVNÁNÍ TEORETICKÝCH A EXPERIMENTÁLNÍCH HODNOT OHYBOVÉ TUHOSTI

Pro porovnání teoretických a experimentálních hodnot budeme vycházet ze získaných výsledků.

Do srovnání jsou zahrnuty vypočtené hodnoty ohybové tuhosti pomocí programu, které jsou založeny na technické teorii ohybu. Dále hodnoty ohybové tuhosti, které byly získány pomocí vytvořeného FEM modelu. V neposlední řadě jsou do srovnání zahrnuty výsledky z ohybových zkoušek.

Vzorek V1 – 1 z ohybové zkoušky do srovnání nebude zahrnut, jelikož dosahoval výrazně nižší hodnoty ohybové tuhosti, která byla pravděpodobně způsobena špatnou kvalitou vzorku.



Graf 7: Srovnání teoretických a experimentálních hodnot ohybové tuhosti

16 DISKUZE VÝSLEDKŮ

Cílem diplomové práce bylo vypočítat teoretickou ohybovou tuhost sendvičových struktur s vlivem bimodularity, stanovit ohybovou tuhost pomocí konečněprvkových modelů a připravit tlakovou a čtyřbodovou ohybovou zkoušku, ze kterých byly vyhodnoceny experimentální hodnoty ohybové tuhosti. Veškeré hodnoty ohybové tuhosti byly v práci vyjádřeny pomocí efektivního modulu pružnosti.

V rámci práce byly vypočteny teoretické hodnoty ohybové tuhosti pomocí programu, které jsou založeny na technické teorii ohybu. Tyto vypočtené výsledky ohybové tuhosti dosahují ve srovnání s FEM modely a výsledky čtyřbodových ohybových zkoušek nejvyšších hodnot, tzn. že experimentálně vyšetřené výsledky ohybové tuhosti nepřesahují vypočtenou teoretickou ohybovou tuhost.

Výsledné hodnoty ohybové tuhosti dosažené pomocí FEM modelů byly nižší než hodnoty, které byly vypočteny analyticky. Tyto hodnoty se sobě ovšem nemohou rovnat, jelikož vypočtená ohybová tuhost pomocí technické teorie ohybu, která je založena na Bernoulliho hypotéze, platí pro případy kompozitních, a tedy i sendvičových struktur jen přibližně.

Experimentálně vyšetřené hodnoty ohybové tuhosti ze čtyřbodových ohybových zkoušek byly nižší než hodnoty teoretické. Jedinou výjimku tvoří vzorek V2 – 2, u kterého byla naměřena vyšší hodnota ohybové tuhosti, než hodnota teoretická, která byla určena pomocí FEM modelu. Tuto skutečnost můžeme přisuzovat špatnému odměření průhybu pomocí programu í-SPEED Control Software.

Vzhledem k obtížnému odměřování průhybu pomocí programu í-SPEED Control Software mohlo docházet k drobným odchylkám při měření průhybu na měřených vzorcích. V případě další studie by bylo vhodné zvolit lepší metodu odměřování průhybu při čtyřbodových ohybových zkouškách.

Výsledné hodnoty ohybové tuhosti ze čtyřbodových ohybových zkoušek se v některých případech více rozcházely. Během měření byla také pozorována separace vnějších vrstev od jádra. Na základě těchto výsledků i pozorování můžeme konstatovat, že kvalita měřených vzorků výrazně kolísala. V případě další studie by měly být pro měření použity vzorky odpovídající kvality.

ZÁVĚR

V první části diplomové práce byla vypracována teoretická studie týkající se sendvičových struktur a vybraných technologií výroby sendvičů. Dále se teoretická část zaměřuje na bimodularitu sendvičových struktur a jejich ohybovou tuhost, která je předmětem celé studie diplomové práce.

V praktické části práce byla řešena ohybová tuhost sendvičových struktur, která se stanovila teoreticky, modelově i experimentálně. U teoretického stanovení ohybové tuhosti bylo využito programu založeného na technické teorii ohybu. Modelově byla ohybová tuhost určena pomocí vytvořených FEM modelů. Experimentální hodnoty ohybových tuhostí byly získány pomocí provedených tlakových a ohybových zkoušek.

Dosažené výsledky byly srovnány a následně vyhodnoceny.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] LI, Tiantian a Lifeng WANG. Bending behavior of sandwich composite structures with tunable 3D-printed core materials. *Composite Structures*. 2017, 175, 46-57. DOI: 10.1016/j.compstruct.2017.05.001. ISSN 02638223. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0263822317306682>
- [2] *Aviation maintenance technician handbook. FAA-H-8083-30*. Newcastle, Wash: Aviation Supplies, 2012. ISBN 978-156-0279-563.
- [3] SANDWICH STRUCTURES. In: *Enlighten* [online]. 2016 [cit. 2017-11-10]. Dostupné z: <http://altairenlighten.com/in-depth/sandwich-structures/>
- [4] Plasty pro stavebnictví a architekturu 5 – Polymerní sendvičové panely. In: *IMateriály* [online]. 2008 [cit. 2017-11-10]. Dostupné z: https://imaterialy.dumabyt.cz/rubriky/materialy/plasty-pro-stavebnictvi-a-architekturu-5-polymerni-sendvicove-panely_41285.html
- [5] Understanding Honeycomb Panels. In: *Plascore* [online]. [cit. 2017-11-10]. Dostupné z: <https://www.plascore.com/honeycomb/honeycomb-panels/>
- [6] Sendvičové konstrukce. In: *MM Průmyslové spektrum* [online]. [cit. 2017-11-10]. Dostupné z: <http://m.mmspektrum.com/clanek/sendvicove-konstrukce>
- [7] Mechanická konstrukce akumulátoru FSE.04x. In: *Eforce* [online]. 2016 [cit. 2017-11-10]. Dostupné z: https://eforce.cvut.cz/cs/article/2016_fse04x_accupack_mech
- [8] Solid Metal Versus Sandwich Panels. In: *Stressebook* [online]. 2015 [cit. 2017-11-10]. Dostupné z: <http://www.stressebook.com/solid-metal-versus-sandwich-panels/>
- [9] ABRATE, Serge. *Dynamic failure of composite and sandwich structures*. New York: Springer, 2012. ISBN 978-940-0753-280.
- [10] RATWANI, M. *Composite Materials and Sandwich Structures A Primer*. 2010.
- [11] ZÁRUBA, Petr. *Návrh a analýza deformačního prvku sendvičové konstrukce pro vůz Formula Student*. Praha, 2016. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze. Fakulta strojní.
- [12] Intracell Dimpling. In: *HyperSizer* [online]. 2014 [cit. 2017-11-16]. Dostupné z: http://hypersizer.com/help_7.0/Content/Failure/sandwich-dimpling.php

- [13] Facesheet Wrinkling. In: *HyperSizer* [online]. 2014 [cit. 2017-11-16]. Dostupné z: http://hypersizer.com/help_7.0/index.php#Failure/sandwich-wrinkling.php%3FTocPath%3DFailure%2520Analysis%7CSandwich%2520Panels%7C_____2
- [14] Sandwich Structures. In: *Usna* [online]. 2003 [cit. 2017-11-16]. Dostupné z: https://www.usna.edu/Users/mecheng/pjoyce/composites/Short_Course_2003/13_PAX_Short_Course_Sandwich-Constructions.pdf
- [15] LÖFFELMANN, František. *Zodiac Aerospace Chellange: Teoretické poznámky k sendvičům. 2016.*
- [16] DIAB GROUP. *DIAB guide to core and sandwich. 2012.*
- [17] Honeycomb Panel. In: *LMC Products* [online]. 2015 [cit. 2017-11-18]. Dostupné z: http://www.lmcproducts.co.uk/HONEYCOMB_PANEL/aluminiumHoneycombPanel.html
- [18] FIBER REINFORCED COMPOSITES. In: *Enlighten* [online]. 2016 [cit. 2017-11-18]. Dostupné z: <http://altairenligheten.com/in-depth/fiber-reinforced-composites/>
- [19] BAUMRUK, Martin. *Kompozitové materiály v leteckém průmyslu v ČR. 2006.*
- [20] Developing of Nanostructured Polymer Composites. In: *BMe Research Grant* [online]. [cit. 2017-11-18]. Dostupné z: http://doktori.bme.hu/bme_palyazat/2016/honlap/Turcsan_Tamas_gpk_en.html
- [21] HYRŠL, Jan a Jiří MAŠEK. *EPOXIDOVÉ FR KOMPOZITY*. In: *Spolchemie* [online]. 2017 [cit. 2017-11-18].
- [22] EHRENSTEIN, Gottfried W. *Polymerní kompozitní materiály*. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [23] INTRODUCTION Glass Fiber: E-glass. In: *Vectorply* [online]. [cit. 2017-11-18]. Dostupné z: <http://www.vectorply.com/reinforcement-fibers/>
- [24] What Is Carbon Fiber. In: *ThoughtCo.* [online]. 2017 [cit. 2017-11-18]. Dostupné z: <https://www.thoughtco.com/what-is-carbon-fiber-820397>
- [25] KOMPOZITOVÉ MATERIÁLY. In: *Opravy hokejek* [online]. 2015 [cit. 2017-11-18]. Dostupné z: http://www.opravyhokejek.cz/clanky/kompozitove-materialy_5.html

- [26] Metal-faced Sandwich Panels. In: *Product Center Polyurethanes* [online]. 2016 [cit. 2017-11-18]. Dostupné z: <https://www.polyurethanes.covestro.com/en/Applications/Construction/Metal-faced-Sandwich-Panels>
- [27] Adhesive bonding of composites. In: *CompositesUK* [online]. [cit. 2017-11-19]. Dostupné z: https://compositesuk.co.uk/system/files/documents/Adhesive%20bonding%20of%20composites_0.pdf
- [28] Reaktoplasty. In: *POLYMERY* [online]. [cit. 2017-11-19]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/21.html>
- [29] FOLIOVÉ EPOXIDOVÉ PRYSKYŘICE. In: *5M* [online]. [cit. 2017-11-19]. Dostupné z: <https://www.5m.cz/produkty/epoxidove-pryskyrice/foliove-epoxidove-pryskyrice>
- [30] The Amazing Carbon Fiber Loom Toyota Didn't Want You To See. In: *Jalopnik* [online]. 2011 [cit. 2018-01-08]. Dostupné z: <https://jalopnik.com/5737631/the-amazing-carbon-fiber-loom-toyota-didnt-want-you-to-see>
- [31] What Are Prepregs. In: *ThoughtCo.* [online]. 2017 [cit. 2018-01-08]. Dostupné z: <https://www.thoughtco.com/what-are-prepregs-820462>
- [32] Innovative Adhesive Systems for Sandwich Production. In: *Kleiberit* [online]. 2017 [cit. 2017-11-21]. Dostupné z: https://holzmoebel.kleiberit.com/fileadmin/Content/Documents/EN/Info_Sheets/FASTteam_Sandwich_Prospekt_GB_US.pdf
- [33] PVC Foam. In: *NetComposites* [online]. [cit. 2017-11-22]. Dostupné z: <https://netcomposites.com/guide-tools/guide/core-materials/pvc-foam/>
- [34] POLYSTYREN. In: *Izolace-info* [online]. [cit. 2017-11-24]. Dostupné z: <https://www.izolace-info.cz/katalog/polystyren/>
- [35] Extrudovaný polystyren. In: *Extrudovanypolystyren* [online]. 2017 [cit. 2017-11-24]. Dostupné z: <http://www.extrudovanypolystyren.cz/>
- [36] Anatomy of an Epoxy Sandwich board. In: *BoardLady* [online]. [cit. 2017-11-24]. Dostupné z: <http://www.boardlady.com/anatomy.htm>
- [37] The Application of Polyurethane Foam in the Automotive Industry. In: *Uratex* [online]. 2015 [cit. 2017-11-24]. Dostupné z: <http://www.uratex.com.ph/industrial-institutional/blog/application-polyurethane-foam-automotive-industry>

- [38] Sprayed-Foam Polyurethane Insulation. In: *EggEnergySystems* [online]. [cit. 2017-11-24]. Dostupné z: <http://eggenergysystems.com/sprayed-foam-polyurethane-insulation/>
- [39] SEIBERT, Hermann F. Applications for PMI foams in aerospace sandwich structures. *Reinforced Plastics*. 2006, 50(1), 44-48. DOI: 10.1016/S0034-3617(06)70873-6. ISSN 00343617. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0034361706708736>
- [40] Výrobky z hliníkové pěny. In: *MM Průmyslové spektrum* [online]. [cit. 2017-11-24]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/vyrobky-z-hlinikove-peny.html>
- [41] Sandwich structures. In: *Admatis* [online]. 2015 [cit. 2017-11-24]. Dostupné z: http://www.admatis.com/eng/competencies_material_science_sandwich.html
- [42] How do I use COMSOL for Honeycomb? In: *Quora* [online]. [cit. 2017-11-24]. Dostupné z: <https://www.quora.com/How-do-I-use-COMSOL-for-Honeycomb>
- [43] Papírová voština. In: *Výrobky z papírové voštiny* [online]. [cit. 2017-11-24]. Dostupné z: <http://www.vostina.cz/vyroba-papirove-vostiny/strana-20.html>
- [44] Can you ever dry wet balsa core? In: *EricsonYachts* [online]. 2016 [cit. 2017-11-26]. Dostupné z: <http://www.ericsonyachts.org/infoexchange/entry.php?384-Can-you-ever-dry-wet-balsa-core>
- [45] Honeycombs and Honeycomb Materials Information. In: *Engineering 360* [online]. [cit. 2017-11-26]. Dostupné z: http://www.globalspec.com/learnmore/materials_chemicals_adhesives/composites_textiles_reinforcements/honeycombs_honeycomb_materials
- [46] Quadro-Vent, Honeycomb Wall Top Vent, Box/200, SPECIFY COLOR. In: *BestMaterials* [online]. [cit. 2017-11-26]. Dostupné z: <http://www.bestmaterials.com/detail.aspx?ID=22195>
- [47] Standard Cell Aramid Honeycomb. In: *ACPcomposites* [online]. [cit. 2017-11-27]. Dostupné z: <https://store.acpsales.com/products/3455/standard-cell-aramid-honeycomb>

- [48] ŠUBA, Oldřich, Soňa RUSNÁKOVÁ, I. BONDREA, C. SIMION a M. INȚĂ. Effects of Core Softness and Bimodularity of Fibreglass Layers on Flexural Stiffness of Polymer Sandwich Structures. *MATEC Web of Conferences*. 2017, 121, 03022-. DOI: 10.1051/mateconf/201712103022. ISSN 2261-236x. Dostupné také z: <http://www.matec-conferences.org/10.1051/mateconf/201712103022>
- [49] VANDERSON, Deon, Marco A. ARGENTA, Ana P. G. O. FRANCO a Mildred B. HECKE. *ANALYSIS OF THE MECHANICAL BEHAVIOUR OF BIOCOMPATIBLE DENTAL CEMENTS*. 2010.
- [50] JONES, Robert M. *Deformation theory of plasticity*. Blacksburg, Va.: Bull Ridge Pub., c2009. ISBN 978-0-9787223-1-9.
- [51] CONNERS, T.E. a P.J. MEDVECZ. *Wood as a Bimodular Material*. The Institute of Paper Science and Technology, 1992.
- [52] Vacuum Infusion Process (VIP) Guide. In: *Performancecomposites* [online]. [cit. 2017-12-13]. Dostupné z: <http://www.performancecomposites.com/about-composites-technical-info/125-resin-vacuum-infusion.html>
- [53] Hand Lay-Up. In: *Compositeslab* [online]. 2016 [cit. 2017-12-13]. Dostupné z: <http://compositeslab.com/composites-manufacturing-processes/open-molding/hand-lay-up/>
- [54] AUTOKLÁV. In: *Plastic* [online]. 2017 [cit. 2018-01-05]. Dostupné z: <http://www.plastic.cz/technologie-autoklav>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

\bar{x}	Aritmetický průměr	-
b	Šířka vzorku	mm
c	Vzdálenost mezi silou a podpěrou	mm
e	Vzdálenost od neutrální osy	mm
E_+ , E_{1+}	Modul pružnosti v tahu	MPa
E_- , E_{1-}	Modul pružnosti v tlaku	MPa
E_3	Modul pružnosti jádra	MPa
E_{ef}	Efektivní modul pružnosti	MPa
F	Síla	N
FEM	Finite Element Metod	-
fps	Snímková frekvence	-
h	Výška (tloušťka)	mm
HM	Vysokomodulová vlákna	-
HS	Vysokopevnostní vlákna	-
Hz	Hertz	-
J	Kvadratický moment	mm ⁴
J_r	Redukovaný kvadratický moment	mm ⁴
K_0	Ohybová tuhost	-
l	Vzdálenost mezi silami	mm
n	Počet	ks
Nr.	Počet vzorků	ks
p_1	Průhyb pod silou	mm
p_2	Průhyb ve středu vzorku	mm
PAN	Polyakrylonitrid	-

PMI	Polymetakrylimid	-
PS	Polystyren	-
PUR	Polyuretan	-
PVC	Polyvinylchlorid	-
s	Směrodatná odchylka	-
S_0	Obsah vzorku	mm^2
S_t	Obsah vrstvy	mm^2
t_1	Výška laminy	mm
y_1	Průhyb	mm
Δl_M	Deformace na mezi pevnosti	mm
ν	Poissonovo číslo	-
σ	Mez pevnosti v tlaku	-

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1: Schéma sendvičové struktury [5]	12
Obr. 2: Srovnání sendvičové struktury a I profilu [16].....	12
Obr. 3: Znázornění tlakové, tahové a smykové síly [5].....	13
Obr. 4: Závislost tuhosti, pevnosti a hmotnosti na tloušťce jádra [8].....	13
Obr. 5: Vliv tuhosti a hmotnosti sendvičové struktury na zvyšující se tloušťku jádra [16]	14
Obr. 6: Sendvičová struktura tvořena kovovým potahem a polyuretanovým jádrem [26]	15
Obr. 7: Sendvičová struktura tvořena hliníkovými potahy a hliníkovou voštinou [17]	15
Obr. 8: Struktura kompozitního materiálu vyztuženého dlouhými vlákny v případě jednosměrné (a), vícesměrné (b) a nahodilé (c) orientace vláken [20]	16
Obr. 9: Skelná vlákna (E-sklo) [23].....	16
Obr. 10: Uhlíková vlákna [30].....	17
Obr. 11: Aramidová vlákna [23].....	18
Obr. 12: Prepreg z uhlíkových vláken [24].....	19
Obr. 13: Epoxidová pryskyřice ve formě fólie [29].....	20
Obr. 14: Příklady sendvičových jader [32]	21
Obr. 15: PVC pěna [16]	22
Obr. 16: Extrudovaný polystyren [35]	23
Obr. 17: Řez surfovacím prknem s jádrem z expandovaného polystyrenu [36].....	23
Obr. 18: Automobilové sedadlo z PUR pěny [37].....	24
Obr. 19: Tepelná izolace z PUR pěny [38]	24
Obr. 20: Aplikace PMI pěny v leteckém průmyslu [39].....	25
Obr. 21: Hliníková pěna [41]	26
Obr. 22: Geometrie buněk [42].....	26
Obr. 23: Detail dveří z voštiny [43]	27
Obr. 24: Polypropylenová voština [46].....	28
Obr. 25: Hliníková voština [45]	28
Obr. 26: Aramidová voština [47]	29
Obr. 27: Balsové dřevo [16]	30
Obr. 28: Vodou poškozené balsové jádro lodní paluby [44]	30

Obr. 29: Vakuová infuze [52]	32
Obr. 30: Autokláv [54].....	32
Obr. 31: Nelineární bimodulární chování v závislosti na napětí a deformaci [50].....	33
Obr. 32: Redukovaná plocha průřezu sendvičové struktury [48]	35
Obr. 33: Poruchy sendvičových struktur – a) zvlnění vnější vrstvy a zborcení jádra, b) intracelulární vzpěr, c) smykové porušení jádra, d) lokální stlačení, e) separace vnější vrstvy, f) lom vnější vrstvy, g) ztráta vzpěrné stability [9].....	36
Obr. 34: Vzorek V3	41
Obr. 35: ZWICK ROELL 1456	42
Obr. 36: Promi-PC	43
Obr. 37: Kamera Olympus i-Speed 2.....	44
Obr. 38: Program v tabulkovém procesoru Microsoft Excel 2016.....	45
Obr. 39: Schéma tlakové zkoušky	48
Obr. 40: Schéma přípravku.....	49
Obr. 41: Použitý přípravek pro měření tlakové zkoušky	49
Obr. 42: Graf měření V1 – 1	50
Obr. 43: Graf měření V1 – 2.....	51
Obr. 44: Graf měření V1 – 3	51
Obr. 45: Graf měření V2 – 1	52
Obr. 46: Graf měření V2 – 2.....	53
Obr. 47: Graf měření V2 – 3	53
Obr. 48: Graf měření V3 – 1	54
Obr. 49: Graf měření V3 – 2.....	55
Obr. 50: Graf měření V3 – 3	55
Obr. 51: Nedostatečná adheze u použitých vzorků pro měření	60
Obr. 52: Schéma čtyřbodové ohybové zkoušky	63
Obr. 53: Čtyřbodová ohybová zkouška	63
Obr. 54: Pracoviště pro čtyřbodovou ohybovou zkoušku.....	64
Obr. 55: Zaznamenaná data ohybové zkoušky pomocí softwaru Promi-PC	65
Obr. 56: I-SPEED Control Software – otevření záznamu	66
Obr. 57: I-SPEED Control Software – ohraničení času měření	66
Obr. 58: I-SPEED Control Software – měření průhybu	67
Obr. 59: Výsledné porušení vzorku V1 – 1 čtyřbodovou ohybovou zkouškou.....	70

Obr. 60: Výsledné porušení vzorku V3 – 1 čtyřbodovou ohybovou zkouškou.....	70
Obr. 61: FEM model.....	71
Obr. 62: Rozměry FEM modelu	71
Obr. 63: FEM model – stanovení průhybu	72

SEZNAM TABULEK

Tab. 1: Vybrané vlastnosti sklených vláken (E-sklo) [19]	16
Tab. 2: Vybrané vlastnosti uhlíkových vláken [19].....	17
Tab. 3: Vybrané vlastnosti aramidových vláken [19].....	18
Tab. 4: Poměr E_+/E_- pro vybrané materiály [51]	34
Tab. 5: Označení vzorků.....	41
Tab. 6: Parametry přístroje Promi PC 3000.....	43
Tab. 7: Parametry kamery Olympus i-Speed 2.....	44
Tab. 8: Vypočtené hodnoty ohybové tuhosti pomocí programu	46
Tab. 9: Naměřené výsledky vzorků V1	50
Tab. 10: Statistické výsledky měření vzorků V1	51
Tab. 11: Naměřené výsledky vzorků V2	52
Tab. 12: Statistické výsledky měření vzorků V2.....	53
Tab. 13: Naměřené výsledky vzorků V3	54
Tab. 14: Statistické výsledky měření vzorků V3	55
Tab. 15: Shrnutí výsledků tlakové zkoušky.....	56
Tab. 16: Vyhodnocení modulu pružnosti v tlaku	56
Tab. 17: Vyhodnocení meze pevnosti v tlaku.....	57
Tab. 18: Vypočtené skutečné hodnoty modulu pružnosti v tlaku.....	58
Tab. 19: Průměrné vypočtené hodnoty E	59
Tab. 20: Vypočtené hodnoty ohybové tuhosti ze získaných hodnot tlakových zkoušek.....	61
Tab. 21: Průměrné vypočtené hodnoty E_{ef}	61
Tab. 22: Hodnoty průhybu z ohybových zkoušek	68
Tab. 23: Vypočtené hodnoty ohybové tuhosti z ohybových zkoušek	69
Tab. 24: Stanovení průhybu z FEM modelu.....	72
Tab. 25: Vypočtené hodnoty ohybové tuhosti z FEM modelu.....	72

SEZNAM GRAFŮ

Graf 1: Závislost počtu lamin na ohybové tuhosti sendvičové struktury	47
Graf 2: Vyhodnocení tlakové zkoušky – modul pružnosti v tlaku	56
Graf 3: Vyhodnocení tlakové zkoušky – mez pevnosti v tlaku	57
Graf 4: Vyhodnocení skutečného modulu pružnosti v tlaku	59
Graf 5: Vyhodnocení ohybové tuhosti z tlakových zkoušek	62
Graf 6: Srovnání hodnot ohybové tuhosti z ohybových zkoušek	69
Graf 7: Srovnání teoretických a experimentálních hodnot ohybové tuhosti	73