

Výzkum možnosti vyztužení sendvičových struktur pomocí polymerních žeber

Bc. Vít Chovančík

Diplomová práce
2016



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická
Ústav výrobního inženýrství
akademický rok: 2015/2016

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE (PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Vít Chovančík**
Osobní číslo: **T14532**
Studijní program: **N3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Výrobní inženýrství**
Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Výzkum možnosti vyztužení sendvičových struktur pomocí polymerních žeber**

Zásady pro vypracování:

1. Vypracujte literární rešerši o problematice kompozitních sendvičových struktur:
2. Základní definice, aplikace a význam jednotlivých částí sendvičových struktur
3. Popis používaných materiálů
4. Technologie výroby sendvičových struktur
5. Mechanické testování sendvičových struktur
6. Experimentální část
7. Volba vyztužných a jádrových materiálů
8. Úprava jádrových materiálů
9. Výroba sendvičových panelů, příprava zkušebních těles
10. Mechanické zkoušky připravených těles
11. Zhodnocení naměřených dat, závěry

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

Dle doporučení vedoucího diplomové práce

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Ladislav Fojtl

Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce:

8. ledna 2016

Termín odevzdání diplomové práce:

20. května 2016

Ve Zlíně dne 6. května 2016



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



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

Příjmení a jméno:

Obor:

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

.....

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 vynaložil, 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

Tato diplomová práce se zabývá možností vyztužení pěnového jádra sendvičových konstrukcí polymerními žebry. Součástí studie je teoretická část, která obsahuje rešerši o problematice sendvičových konstrukcí, jejich složení a používaných materiálech, popisuje výrobu a testování se zaměřením na testování v ohybu a tlaku. V této části jsou také zmíněny dostupné informace o možnosti vyztužení sendvičových konstrukcí. Praktická část popisuje použité materiály a zaměřuje se na samotnou výrobu sendvičových konstrukcí jak bez vyztužení, tak i s vyztuženými pěnovými jádry. Změny vlastností vyztužením pěnového jádra byly ověřeny pomocí ohybové zkoušky a tlakové zkoušky. Následně byly vlastnosti vyztužené sendvičové konstrukce porovnány se sendvičovou konstrukcí bez vyztužení s totožným materiálem pěnového jádra a získané výsledky jsou diskutovány v závěru práce.

Klíčová slova: sendvičová konstrukce, pěna, tříbodový ohyb, boční tlak, vyztužení, žebro

ABSTRACT

This thesis deals with possibility of reinforcing foam core sandwich structures with polymer ribs. The theoretical part contains a research about the issue of sandwich products, their structure, manufacturing and mechanical testing, focused on flexure test and edgewise compressive test. In this part, the possibility of sandwich structures reinforcing by various methods is also mentioned. In the practical part, the materials and manufacturing of the sandwich panels without reinforced foam core and the sandwich panels with reinforced foam core are described. The flexure test and the edgewise compressive test were conducted to evaluate the changes in the properties of sandwich panels. The properties of sandwich panel without reinforcing were compared with the properties of sandwich panel with reinforced foam core and results are discussed at the end of this thesis.

Keywords: Sandwich construction, foam, three-point bending, edgewise compression, reinforcement, rib

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Ladislavovi Fojtlovi za odborné vedení, poskytnutí cenných rad, velmi ochotný přístup a soustavnou pozornost, kterou mi věnoval při vypracování diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat Bc. Davidovi Rokosovi za spolupráci při tvorbě praktické části této diplomové práce. Velké díky patří také mým rodičům za podporu po celou dobu studia.

Tato diplomová práce byla spolufinancována z projektu Interní Grantové Agentury Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně číslo IGA/FT/2016/002.

„Tím větší budou tvé zásluhy, čím více lásky a nadšení vkládáš do každé práce.“

(Otto František Babler)

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

OBSAH

ÚVOD	10
I TEORETICKÁ ČÁST	11
1 SENDVIČOVÉ KONSTRUKCE	12
1.1 MATERIÁLY SENDVIČOVÝCH KONSTRUKCÍ.....	14
1.1.1 Materiál vnějších krycích vrstev sendvičových konstrukcí	14
1.1.2 Materiál jádra sendvičových konstrukcí	23
2 VÝROBA SENDVIČOVÝCH KONSTRUKCÍ	32
2.1 RUČNÍ KLADENÍ A STŘÍKÁNÍ	32
2.2 VYSOKOTLAKÉ VSTŘIKOVÁNÍ (RTM – RESIN TRANSFER MOULDING).....	33
2.3 LISOVÁNÍ VE VYHŘÍVANÉM LISU	35
2.4 VYTVRZOVÁNÍ V PECI ZA PŮSOBENÍ VAKUA	36
2.5 VAKUOVÁ INFUZE	37
2.5.1 Princip vakuové infuze.....	39
3 VYZTUŽOVÁNÍ POLYMERNÍCH STĚN ŽEBROVÁNÍM	41
3.1 VYZTUŽOVÁNÍ TENKÝCH POLYMERNÍCH STĚN	41
3.2 VYZTUŽOVÁNÍ JÁDRA SENDVIČOVÝCH KONSTRUKCÍ	43
3.2.1 Vyztužování sendvičové konstrukce polymerními kolíky	43
3.2.2 Vyztužování sendvičové konstrukce prošíáním jádra vlákny.....	44
3.2.3 Vyztužování sendvičové konstrukce prokládáním pásů jádra vyztužující tkaninou	45
4 TESTOVÁNÍ SENDVIČOVÝCH KONSTRUKCÍ	47
4.1 TESTOVÁNÍ MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ SENDVIČOVÉ KONSTRUKCE.....	47
4.1.1 Zkouška tahem naplocho.....	47
4.1.2 Smyková zkouška.....	48
4.1.3 Ohybová zkouška	49
4.1.4 Rázová zkouška.....	51
4.1.5 Tlaková zkouška při působení bočního tlaku.....	52
II PRAKTICKÁ ČÁST	54
5 CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE	55
6 NÁVRH SENDVIČOVÝCH PANELŮ	56
6.1 ROZVRŽENÍ POLYMERNÍCH ŽEBER	56
6.1.1 Návrh A (kosočtvercové rozložení)	56
6.1.2 Návrh B (čtvercové rozložení)	57
7 POPIS MATERIÁLOVÉHO SLOŽENÍ	59
7.1 VYZTUŽUJÍCÍ VLÁKNA	59
7.2 MATRICE.....	60
7.2.1 Biresin CR82 – pryskyřice pro ruční laminaci.....	60
7.2.2 Biresin CR80 – pryskyřice pro vakuovou infuzi.....	61
7.3 JÁDRA SENDVIČOVÝCH KONSTRUKCÍ	62
7.3.1 Airex T90.100	62
7.3.2 Airex C70.55	63

7.4	MODIFIKACE SENDVIČOVÝCH KONSTRUKCÍ	63
8	VÝROBA SENDVIČOVÉ KONSTRUKCE VYZTUŽENÉ POLYMERNÍMI ŽEBRY	65
8.1	PŘÍPRAVA PĚNOVÉHO JÁDRA	65
8.1.1	Příprava programu pro vrtání	65
8.1.2	Vrtání otvorů pro vyztužující žebra	66
8.1.3	Prošívání pěnového jádra vyztužujícími vlákny	67
8.2	VÝROBA VZORKŮ RUČNÍ LAMINACÍ.....	68
8.3	VÝROBA VZORKŮ VAKUOVOU INFUZÍ.....	69
8.3.1	Pomocné materiály pro vakuovou infuzi	69
8.3.2	Výroba testovacích vzorků.....	73
8.4	ŘEZÁNÍ VZORKŮ.....	77
8.5	VADY VZNIKLÉ NA ZKUŠEBNÍCH TĚLESECH.....	78
8.5.1	Uzavřený vzduch v místě polymerního žebra	78
8.5.2	Nedokonalé prosycení výztuže matricí	78
9	POPIS STATISTICKÝCH VELIČIN.....	79
10	TESTOVÁNÍ VLASTNOSTÍ VYZTUŽENÉ SENDVIČOVÉ KONSTRUKCE.....	80
10.1	TŘÍBODOVÁ OHYBOVÁ ZKOUŠKA	81
10.1.1	Tříbodová ohybová zkouška sendvičových konstrukcí s pěnovým jádre Airx T90.100/10 mm.....	82
10.1.2	Tříbodová ohybová zkouška sendvičových konstrukcí s pěnovým jádre Airx C70.55/10 mm.....	88
10.1.3	Tříbodová ohybová zkouška sendvičových konstrukcí s pěnovým jádre Airx C70.55/15 mm.....	94
10.2	TLAKOVÁ ZKOUŠKA PŘI PŮSOBENÍ BOČNÍHO TLAKU	101
10.2.1	Tlaková zkouška při působení bočního tlaku u sendvičových konstrukcí s pěnovým jádre Airx T90.100/10 mm	102
10.2.2	Tlaková zkouška při působení bočního tlaku u sendvičových konstrukcí s pěnovým jádre Airx C70.55/10 mm	106
10.2.3	Tlaková zkouška při působení bočního tlaku u sendvičových konstrukcí s pěnovým jádre Airx C70.55/15 mm	109
11	VÝSLEDKY A DISKUZE	113
11.1	EFEKT VYZTUŽENÍ PĚNOVÉHO JÁDRA POLYMERNÍMI ŽEBRY PŘI TŘÍBODOVÉM OHYBOVÉM ZATÍŽENÍ	113
11.2	EFEKT VYZTUŽENÍ PĚNOVÉHO JÁDRA U TLAKOVÉ ZKOUŠKY PŘI PŮSOBENÍ KOLMÉHO TLAKU.....	115
	ZÁVĚR	116
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	118
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	123
	SEZNAM OBRÁZKŮ	124
	SEZNAM TABULEK.....	129
	SEZNAM PŘÍLOH.....	131

ÚVOD

Posouvání lidských hranic vede inženýry a vědce k rozvoji nových, lepších a účinnějších konstrukčních materiálů. Kompozitní materiály mají dlouhou historii použití v průmyslu, zejména v automobilové, letecké a raketové technice a sportovních potřebách, ale jejich použití v poslední době expanduje na méně tradiční trhy, jako je lékařství, energetický průmysl nebo stavebnictví, kde nahrazují kovové a dřevěné výrobky nebo dokonce i beton.

Zvláštním druhem kompozitního materiálu jsou sendvičové konstrukce. Tento druh materiálu má velký potenciál a své uplatnění nalézá v aplikacích od sportovních potřeb až po kosmický průmysl. Sendvičový kompozitní materiál se skládá z vnějších krycích vrstev, které jsou tenké a tuhé a jádra, které má malou hustotu, tudíž výsledný díl má malou hmotnost. Použití sendvičového dílu přináší průmyslu řadu zajímavých benefitů, mezi které patří zejména zlepšení výkonu dílu, redukce hmotnosti a výdajů, zvýšení výrobní rychlosti a také prodloužení trvanlivosti dílu.

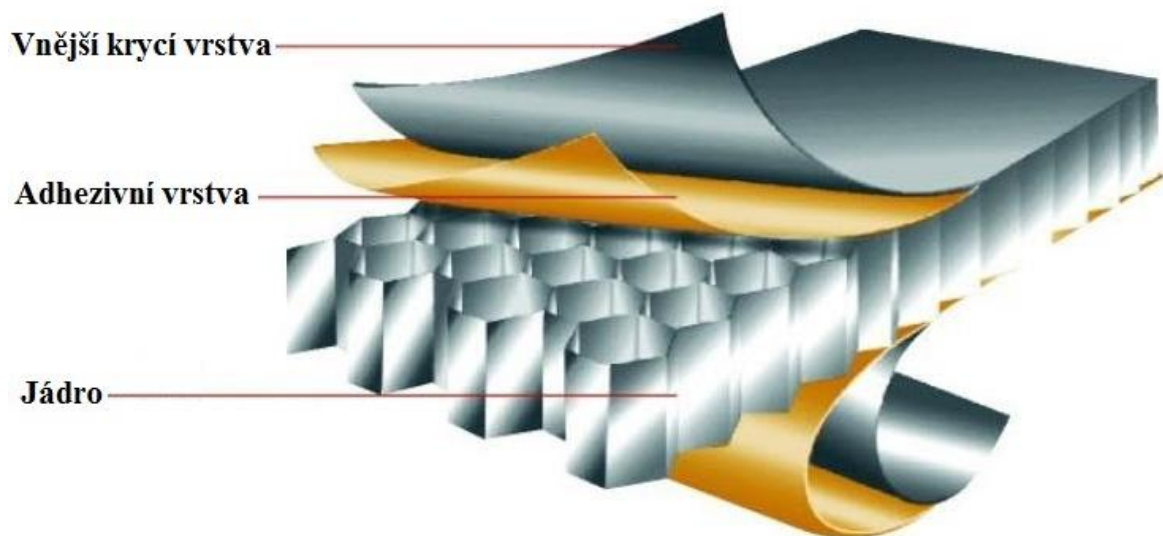
Tato diplomové práce je zaměřena na možnost vyztužení polymerního pěnového jádra. Pěnové jádro je vyztuženo polymerními žebry, které zároveň podporují soudružnost všech materiálů sendvičové konstrukce. Výsledné vlastnosti vyztužených sendvičových panelů jsou porovnány při ohybové zkoušce a tlakové zkoušce se sendvičovými panely bez vyztužení.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 SENDVIČOVÉ KONSTRUKCE

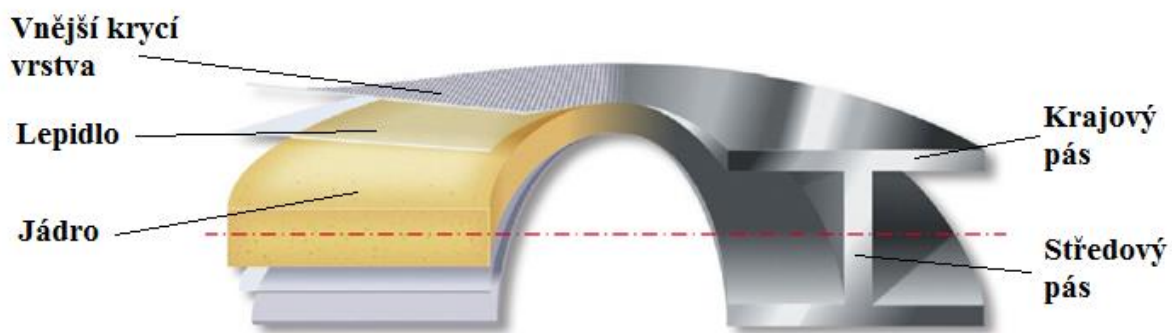
Sendvičové struktury jsou progresivní konstrukce, které jsou používány především pro svoji vysokou pevnost, tuhost a odolnost proti opotřebení při nízké hmotnosti. Uplatnění nacházejí ve vysoce technicky zaměřených průmyslových odvětvích, zejména v leteckém (prvky letadel a kosmických lodí) a dopravním průmyslu (interiérové a exteriérové dílce), ale i v ostatních průmyslových odvětvích. [1]

Sendvičové materiály se řadí do vrstevnatých konstrukcí. Složení základní struktury je vždy shodné. Strukturu sendvičové konstrukce tvoří dvě vnější krycí vrstvy a jádro. Vnější krycí vrstvy (potahy) jsou poměrně tenké, mají vysokou pevnost i tuhost, naopak jádro se vyznačuje nízkou hmotností, ale i nižšími mechanickými vlastnostmi v porovnání s potahy. Pomocí adhezivní vrstvy se pak pevně spojí všechny komponenty sendvičové konstrukce (vnější krycí vrstvy a jádro) do jednoho celku, jak je tomu na Obr. 1. [2]



Obr. 1 Ukázka sendvičové struktury [3]

Sendvičovou konstrukci lze přirovnat k nosníku, který má tvar I (Obr. 2). Vnější krycí vrstvy mohou být přirovnány ke krajovým pásům I-nosníku, jelikož při ohybovém namáhání přenášejí tahové, respektive tlakové napětí, zatímco jádro odpovídá středovému pásu I-nosníku, neboť odolává smykovému zatížení, přenáší normálové napětí z jednoho potahu na druhý a drží vnější krycí vrstvy v konstantní vzdálenosti. [4]



Obr. 2 Srovnání sendvičové konstrukce s I-nosníkem [4]

Výhodné vlastnosti:

- Vysoká nosnost při nízké hmotnosti,
- rázová odolnost,
- ohybová tuhost a pevnost,
- tepelná a akustická izolace,
- voděodolná a parotěsná zábrana,
- vzduchotěsnost,
- povrchové úpravy krycích vrstev,
- odolnost proti únavě, šíření trhlin,
- rychlá montáž,
- snadná oprava nebo výměna v případě poškození,

- dlouhá životnost. [5]

Nevýhodné vlastnosti:

- Hořlavost plastového nebo pěnového jádra sendvičové konstrukce,
- deformace při vystavení jedné strany tepelnému zatížení,
- creepová deformace,
- obtížná kontrola konstrukce. [5]



a)



b)

Obr. 3 Příklad použití sendvičové konstrukce [6]

a) použití v dopravním průmyslu, b) použití při stavbě hal

1.1 Materiály sendvičových konstrukcí

Kombinací různých materiálů (vnějších krycích vrstev i jádra) lze vytvořit velmi rozsáhlou škálu sendvičových konstrukcí. Tato možnost kombinace materiálů umožňuje vytvořit sendvičový panel s optimálními vlastnostmi pro danou aplikaci. Dalším parametrem pro volbu vhodné sendvičové konstrukce je volba rozměrů jednotlivých vrstev. Volba materiálu zohledňuje také další požadavky, jako jsou např. způsob výroby, povrchová úprava, zdravotní nezávadnost, cena a odolnost proti opotřebení.[8]

1.1.1 Materiál vnějších krycích vrstev sendvičových konstrukcí

Pro vnější krycí vrstvy jsou obvykle používány relativně tenké, vysoce pevné materiály. Obvyčejně se materiál vnějších krycích vrstev rozděluje do dvou skupin, a to kovové a nekovové materiály. Do skupiny kovových materiálů patří především ocelové a hliníkové plechy, případně další speciální slitiny, například titanové. Do skupiny nekovových materiálů se pak řadí dřevěná překližka, dýha, prepreg materiály a vláknové kompozity. [8]

Od vnějších krycích vrstev se očekávají tyto vlastnosti:

- Vysoká pevnost a tuhost v ohybu,
- vysoká pevnost v tahu a tlaku,
- odolnost proti nárazu, opotřebení, teplotě, chemikáliím
- možnost povrchové úpravy,
- odolnost proti vlhkosti,
- nízká cena a vzhled. [8]

❖ *Ocelové a hliníkové plechy*

Tyto materiály se nejčastěji používají ve formě tenkých plechů, vyráběných válcováním za studena s ochranou proti korozi. Jako ochrana proti korozi se používá žárové zinkování nebo přímo zinkové hliníkové plechy. [7, 8]

U vnějších krycích vrstev vyrobených z ocelového nebo hliníkového plechu se řadí mezi výhody vysoká tuhost a pevnost, nízká cena, dobrý povrch a dobrá odolnost proti opotřebení. Mezi nevýhody patří vysoká hustota materiálu, z níž pramení velká hmotnost výsledné konstrukce, a obtížná výroba panelu se složitým tvarem (nutné předtvarování plechu). [7, 8]

❖ *Vláknové kompozity*

Laminát vyztužený vláknovou výztuží je materiál, který se skládá z nejméně jedné vrstvy (většinou se skládá z více vrstev) vláknové výztuže prosycené pryskyřicí a vytvrzených do jednoho plošného útvaru. Lamináty se vyznačují nízkou měrnou hmotností, vysokou pevností a vynikající odolností vůči působení korozivního prostředí. Nejčastěji se na sendvičové konstrukce používají lamináty vyztužené skleněnými nebo uhlíkovými vlákny. [9]

➤ **Výztuž**

Mezi hlavní funkce výztuže v kompozitu patří zejména zajištění tuhosti, pevnosti, tepelné stability a dalších strukturálních vlastností kompozitu. Vlákná přenáší 70-90% celkového zatížení kompozitu. Výztuž zajišťuje elektrickou vodivost nebo izolaci v závislosti na typu použitého vlákna. Největší účinek mají dlouhá (spojitá) vlákna. Menší účinek pak mají vlákna (nespojité) krátká (např. u vstřikovaných polotovarů). [10]

▪ **Forma vláknové výztuže**

Formy vláknových výztuží jsou pro většinu materiálových typů vláken stejné a odpovídají potřebám kompozitních výrobků. Pramenec tvoří svazek mající běžně okolo 200-400 vláken. Pro jednosměrně namáhané výrobky se většinou využívá jednosměrného prepregu. Pokud jsou na kompozitní výrobky kladeny požadavky týkající se namáhání ve více než jednom směru, jsou používány především rouna, tkaniny, pleteniny a rohože. Dalším důvodem používání takového typu výztuží je rychlejší růst tloušťky stěny výrobku, snadnější manipulace a zvýšení odolnosti proti šíření křehkých lomů. [10]

• **Roving**

Jako roving je označována forma výztuže ve tvaru nekonečných vláken bez krutu. Jejich společným znakem je pramenec tvořený individuálními vlákny navinutý na cívku. Rovingy se používají pro výrobu stříkaných laminátů, desek, trub, rovingových tkanin a rohoží, tažených profilů apod. [10]



Obr. 4 Roving [11]

- **Vyztužující rohož**

Jedná se o netkanou výztuž, která se vyrábí z nasekaných rovingů (krátká a středně dlouhá vlákna), jejich slabým naimpregnováním pryskyřicí nebo termoplastem a tepelným slisováním do ploché kontinuální rohože. Obsah organického pojiva se podle použití pohybuje v rozmezí 5 až 30 hmotnostních %. Vyrábí se v různých plošných hmotnostech. [10]

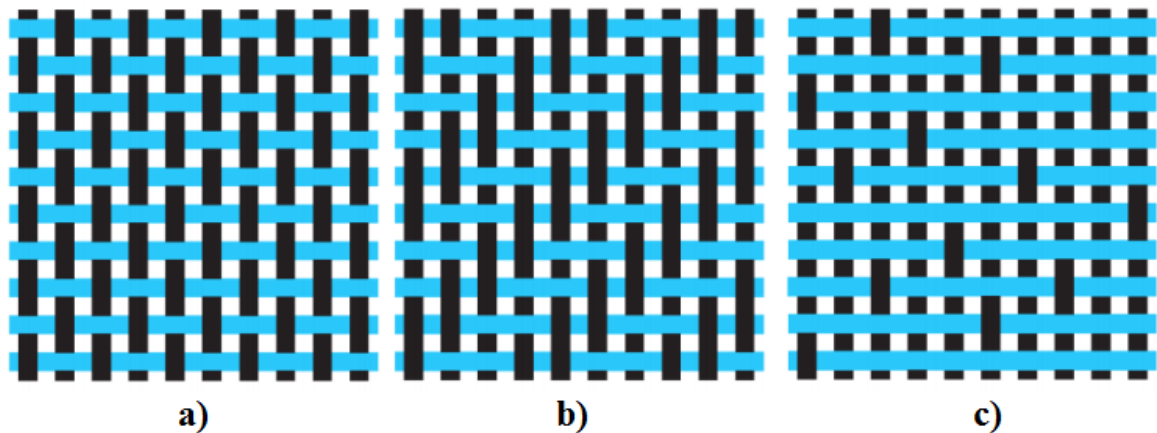


Obr. 5 Vyztužující rohož [12]

- **Tkanina**

Tkanina se vyrábí z rovingů stejným způsobem jako běžné textilie. Výrobky mají různou plošnou hmotnost a jsou tkány různými způsoby vazeb. Nejpevnější je vazba plátnová (Obr. 6a), ale zároveň je nejméně poddajná při tvarování (kopírování tvarů formy).

Kombinací dobré pevnosti, snadného tvarování a ohebnosti je vazba keprová (Obr. 6b). Za nejméně pevnou textilní vazbu je považována vazba atlasová (Obr. 6c), která však umožňuje vysoký objemový podíl vláken ve vrstvě kompozitu a zaručuje jejich minimální zvlnění. [10]



Obr. 6 Druhy vazeb tkaniny [13]

a) plátnová vazba, b) keprová vazba, c) atlasová vazba

Výhodou ve srovnání s netkanou výztuží je větší obsah vláken, a tedy vyšší tuhost a pevnost výsledného kompozitu. Tkaniny jsou určeny např. pro výrobu vrstvených laminátů.

- **Pvrchová rohož**

Na rozdíl od tkaniny má velmi jemnou strukturu a nízkou plošnou hmotnost. Velmi často je vyrobena z polyesteru. Má především estetické účely, protože je možno ji dezénovat, což umožňuje kontinuální výrobu kompozitů s předem upraveným povrchem. Často je tento typ rohoží používán pro omezení textury povrchu, která by jinak vznikla v důsledku vláknového charakteru výztuže. Pvrchové rohože se používají i pro zvýšení odolnosti proti chemickým vlivům a působení UV záření. [10]

Ve výrobcích lze různé typy výztuží (roving, rohož, tkanina) nebo druhy vláken (skelné vlákno, uhlíkové vlákno atd.) kombinovat a vyrábět tak hybridní kompozit.

▪ Druhy vláken

V kompozitech se používají nejrůznější druhy vláken. V zásadě je můžeme rozdělit na následující skupiny: přírodní vlákna, skleněná vlákna, uhlíková vlákna, kevlarová vlákna, keramická vlákna a kovová vlákna.

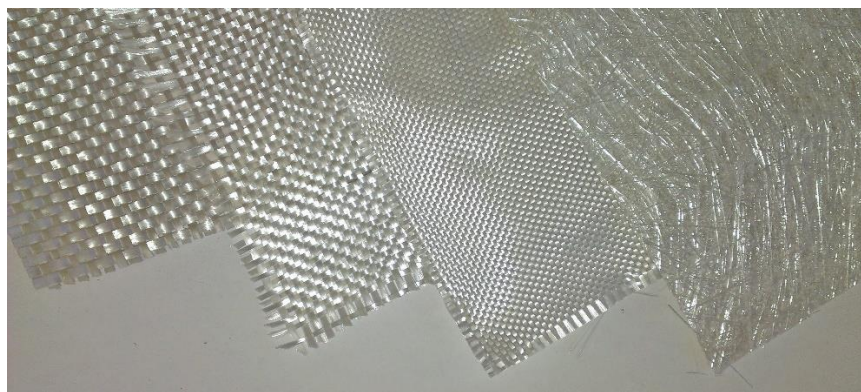
• Přírodní vlákna

Přírodní vlákna jsou získána z přírodních zdrojů, konkrétně z rostlin, či jejich plodů. Základem všech těchto vláken je celulóza. Mezi tyto materiály patří vlákna lněná, bavlněná, jutová, konopná, kokosová atd. Mezi hlavní přednosti přírodních vláken patří nízká hustota, malá abraze při mechanickém opracování a bio-rozložitelnost. Mezi nevýhody těchto vláken se řadí závislost růstu vláken na vlastnostech, citlivost na působení vlhkosti a omezená délka vláken. [8]

• Skleněná vlákna

Jedná se o nejpoužívanější vyztužující vlákna, nejčastěji impregnovaná reaktoplastickou matricí. Skleněná vlákna se vyrábějí o průměru 5-25 μm . Hustota skleněného vlákna se pohybuje okolo 2,5 g/cm^3 . Tepelná vodivost skleněných vláken je o polovinu nižší než u oceli. Obvykle se pro kompozitní materiály vyztužené skleněnými vlákny využívá takzvané E-sklo. Skleněná vlákna jsou nejlevnější, vykazují vysokou pevnost, nehořlavost a malou tepelnou roztažnost. Mezi nevýhody skleněných vláken patří křehkost a nízký modul pružnosti. [10, 14]

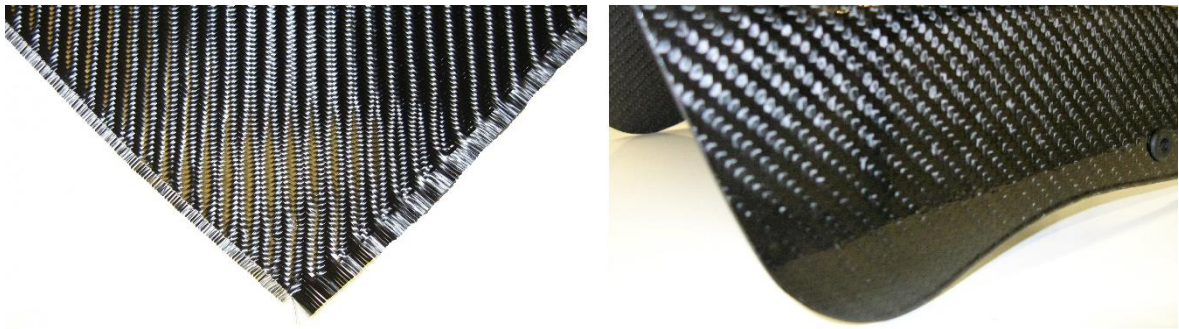
Skleněná vlákna se dělí na A, C, D, E, S podle aplikace, na kterou se používají. Skleněné vlákno typu A a C se používá, kde je potřeba odolnosti proti chemikáliím. Skleněné vlákno typu D se používá pro elektronické aplikace. Skleněné vlákno typu E se používá pro elektrickou izolaci. Skleněné vlákno typu S se vyznačuje vysokou pevností. [10]



Obr. 7 Příklad skleněných vláken

- **Uhlíková vlákna**

Uhlíková vlákna mají řadu předností, mezi které patří především nízká hustota, vynikající mechanické vlastnosti, dobrá elektrická vodivost, dobrá odolnost proti korozi a chemikáliím, odolnost proti vysokým teplotám, vysoká odolnost proti opotřebení. Uhlíková vlákna disponují asi desetinásobnou tuhostí při poloviční hustotě proti skleněným vláknům. Hustota se pohybuje od 1,8 až 2 g/cm³ a obsahují 90-95% čistého uhlíku. Uhlíková vlákna jsou do 1000 °C tepelně stabilní a chemicky inertní. Mezi nevýhody patří křehkost a vysoká cena. [10, 14]



Obr. 8 Uhlíkové vlákno

- **Aramidová (Kevlarová) vlákna**

Kevlarová vlákna patří mezi plastová vlákna. Vyznačují se velmi nízkou hustotou 1,45 g/cm³ a pevností okolo 2,8 GPa. Kevlarová vlákna mají poměrně vysokou tahovou pevnost a odolnost rázovému namáhání. Vlákna jsou chemicky odolná, napadána jen silnými kyselinami a louhy. Kevlarová vlákna degradují účinkem UV záření za přítomnosti kyslíku. Mezi nevýhody kevlarových vláken patří pohlcování vlhkosti a nízká pevnost v tlaku. [10]

- **Keramická vlákna**

Keramická vlákna mají velkou teplotní odolnost, stabilitu a malou teplotní roztažnost. Používají se zejména v kompozitech s kovovou a keramickou maticí pro aplikace za vysokých teplot. Vyznačují se vysokou tuhostí. Jejich hustota je nižší než u kovů a vyšší než u plastových nebo uhlíkových vláken. Většinou mají jen velmi malou štíhlost. [10]

- **Kovová vlákna**

Kovová vlákna patří k nejlevnější používané výztuži. Jsou poměrně těžká. Používají se ke zpevnění hliníkových slitin. Na zpevnění žáruvzdorných materiálů se používají wolframová vlákna. V tradičních vláknových kompozitech se téměř nepoužívá. [10]

- **Matrice**

Pro vláknové polymerní kompozity se používají matrice na bázi pryskyřic, které se dělí na termoplasty a reaktoplasty.

- **Matrice na bázi termoplastů**

Termoplasty jsou tuhé látky, které měknou a tečou při překročení určité teploty, která je rozdílná pro každý typ polymeru. Po ochlazení pod tuto teplotu opět přejdou do pevného skupenství. Jednotlivé makromolekuly termoplastických polymerů nejsou vázané chemickými vazbami. Vyskytují se zejména v kompozitech vyztuženými částicovým plnivem. Mezi nejčastěji používané termoplastické matrice patří především Polystyren (PS), Polyethylen (PE), Polykarbonát (PC), Polyethylentereftalát (PET), Polyamid (PA), Polyfenylsulfid (PPS), Polyethylenimin (PEI). [15]

- **Matrice na bázi reaktoplastů**

Reaktoplasty (dříve nazývané jako termosety) jsou obvykle ve formě viskózních tekutin, které jsou vytvrzeny chemickou reakcí po dodání katalyzátoru a iniciátoru. Vytvrzení probíhá buď za pokojové teploty, nebo za zvýšených teplot. Při vytvrzování dochází ke vzniku chemických vazeb mezi jednotlivými malými molekulami. Tento fakt způsobuje, že vytvrzený materiál zůstává v tuhé fázi i po zahřátí, což zvyšuje jeho odolnost proti creepu (tečení pod konstantním napětím) a vysokým teplotám. Termosetické matrice se používají především pro kompozity vyztužené vláknovou výztuží. [15]

Mezi nejpoužívanější typy reaktoplastických pryskyřic patří nenasyčené polyesterové pryskyřice (UP-R), vinylesterové pryskyřice (VE-R), epoxidové pryskyřice (EP-R), fenolytické pryskyřice (PF-R) a metakrylátové pryskyřice (MA-R). [15]

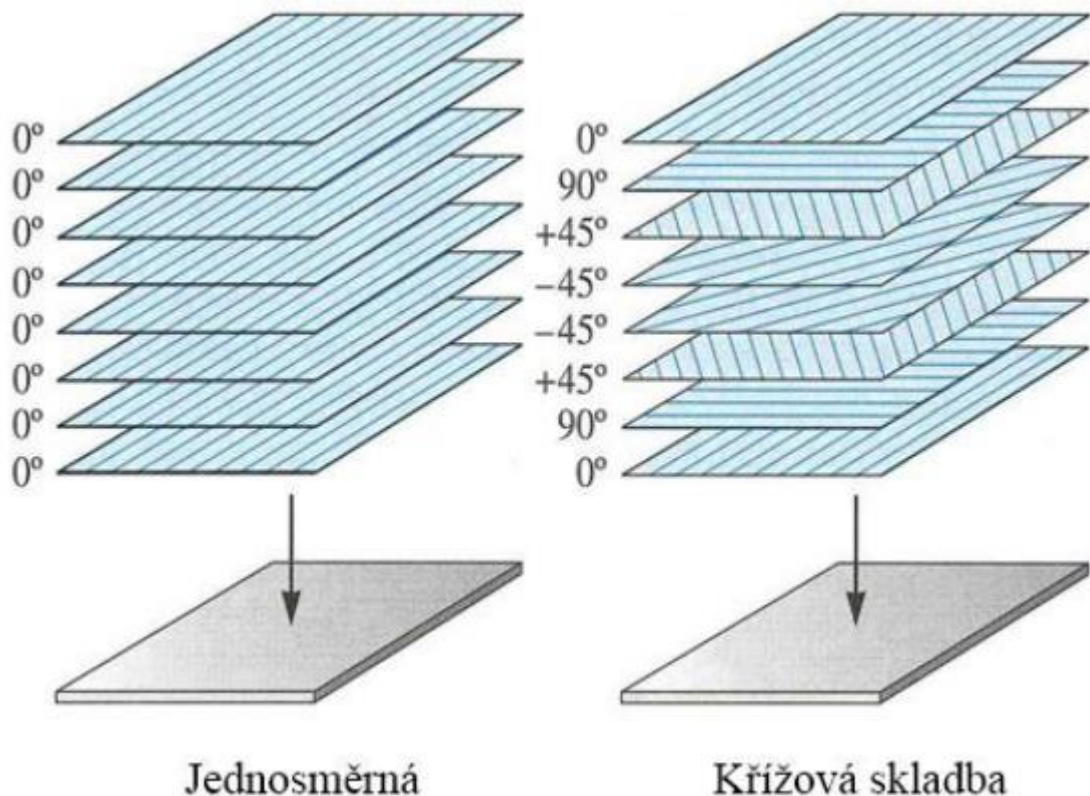
- **Epoxidová pryskyřice**

Epoxidové pryskyřice se v původním (kapalném) stavu nepoužívají. Výhodných vlastností epoxidových pryskyřic se využívá až ve vytvrzeném stavu. Vytvrzování epoxidových pryskyřic se uskutečňuje formou chemické reakce, jejíž podstatou je exotermická reakce

epoxidových skupin pryskyřice s přídatným tužidlem. Epoxidové pryskyřice mají vynikající mechanické a elektrické vlastnosti a jsou běžně používány jako matrice ve vláknových kompozitech. Epoxidové pryskyřice mají také značnou odolnost proti vlhkosti a velmi dobrou chemickou odolnost. Díky své vynikající adhezi ke kovu se také používají jako lepidlo na kov. [10, 16]

➤ Kladení vrstev

Pro dosažení dobrých vlastností laminátu, vyrobeného z vrstev s jednosměrně orientovanými vlákny, je nutno jednosměrné vrstvy při kladení různě orientovat. Orientace vrstev se zapisuje kódem, v němž úhel pootočení vláken vůči zvolenému hlavnímu směru laminátu je označen příslušným znaménkem a číslem udávajícím počet stupňů úhlu. Většinou jsou vyráběny lamináty symetrické vůči střední rovině. Na Obr. 9 je znázorněn symetrický laminát s označením $[0/90/+45/-45]_s$. [10]



Obr. 9 Příklad skladby symetrického laminátu [17]

❖ Prepreg (předimpregnovaný materiál)

Prepreg je obecné označení pro výztužnou tkaninu, která byla předem impregnována částečně vytvrzenou pryskyřicí. Tato pryskyřice již obsahuje správné tužidlo. V důsledku

toho je prepreg připraven na vložení do formy bez přidavku další pryskyřice a za působení tepla a tlaku se formuje do požadovaného tvaru. Na výztuže se používají zejména skelná, uhlíková a aramidová vlákna, a to v různých vazbách (plátňová, keprová, atlasová atd.). Dále se vyrábí i jednosměrný prepreg. K impregnaci prepregů se nejčastěji používají epoxidové, fenolické, nenasyčené polyesterové a vinylové pryskyřice. Hlavní výhody prepregů po vytvrzení jsou nízká hmotnost, vysoká tuhost a pevnost, předně definovaný podíl matrice, kvalitní povrch a malý odpad. Mezi nevýhody patří vysoká cena a krátká doba skladovatelnosti. [18]



Obr. 10 Ukázka prepregu [19]

❖ *Dřevěná překližka*

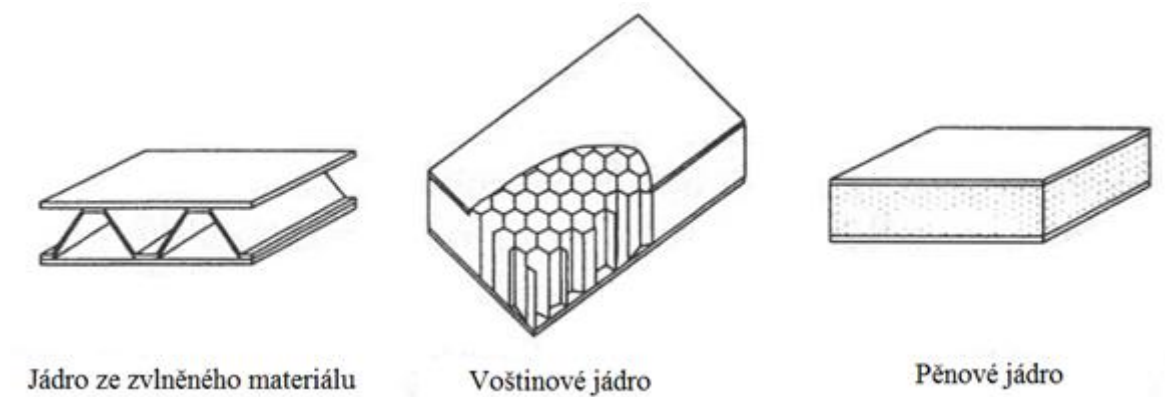
Překližkové desky jsou slepeny z lichého počtu vrstev. Nejpoužívanější je překližka, jejíž jednotlivé vrstvy jsou složeny z loupaných nebo krájených dýh. Jednotlivé vrstvy obvykle svírají úhel 90°. Oproti rostlému dřevu mají lepší rozměrovou a tvarovou stálost. Dřevěná překližka je levný materiál, má však nízkou tuhost i pevnost, značnou hořlavost a je nevhodná pro použití ve vlhkém prostředí. Nejčastěji se používá dřevo bukové, dubové, břízové, smrkové a borovicové. [20]



Obr. 11 Dřevěná překližka

1.1.2 Materiál jádra sendvičových konstrukcí

Význam sendvičové struktury spočívá v tom, že mezi vnějšími vrstvami přenášejícími tahová a tlaková zatížení je jádro, které přenáší hlavně smykové zatížení. Sendvičová jádra jsou vyráběna z různých materiálů a různých typů konstrukcí. Vždy záleží na tom, jaké jsou požadované vlastnosti sendvičové konstrukce a dle toho je volen materiál, typ konstrukce jádra, tloušťka. Jak znázorňuje Obr. 12, materiál sendvičového jádra se dělí do 3 hlavních skupin: tvarové jádro, voštinová jádra, pěnové jádro.



Obr. 12 Typy tvaru jádra sendvičové konstrukce [7]

Při volbě materiálu jádra sendvičové konstrukce se přihlíží na tyto vlastnosti:

- Nízká hustota materiálu,
- vysoká smyková pevnost a tuhost,
- dobrá pevnost v tlaku,
- tepelné a akustické vlastnosti,
- hořlavost, nasákavost.

❖ *Balsa*

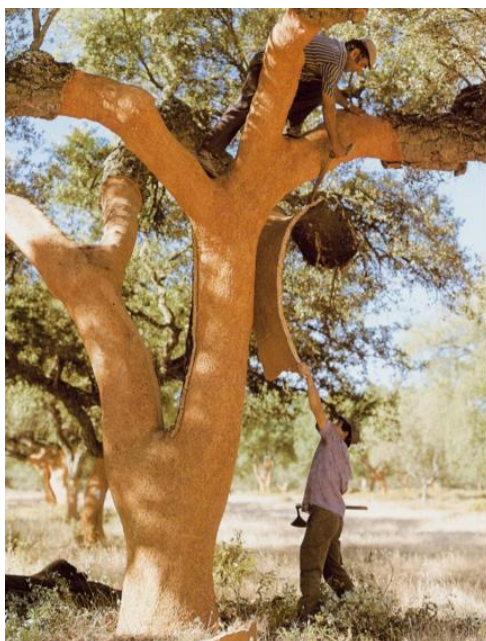
Balsa byl první materiál, který byl použit na jádro sendvičových konstrukcí. Balsové dřevo je materiál pocházející z rychle rostoucího balsového stromu. Balsové dřevo existuje v různých kvalitativních třídách s hustotou od 40 do 340 Kg/m³ (obvykle 160 kg/m³). Balsa je velmi citlivá na vlhkost, její vlastnosti rapidně klesají se zvyšujícím se obsahem vody. Balsové dřevo nehoří, jen pomalu doutná. Oproti polymerním pěnám teplem neměkne a vyznačuje se i menší tepelnou vodivostí. Balsa se používá na jádro v lehkých sendvičových konstrukcích s kovovou vnější krycí vrstvou. Dále je možné tento materiál nalézt jako vrstvený materiál na podlahy a přepážky v letadlech, modelářské potřeby a dekorativní výrobky. [21]



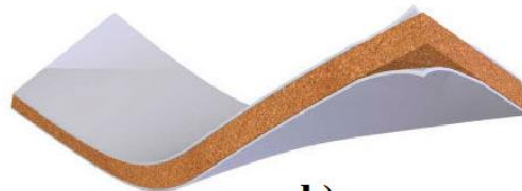
Obr. 13 Příklad sendvičové konstrukce s balsovým jádrem [22]

❖ Korek

Korek se skládá z odumřelých buněk, které se hromadí na vnějším povrchu dubu korkového (Obr. 14a). Tloušťka korkové kůry se dosahuje několika centimetrů a její hustota se pohybuje v rozmezí 480-520 kg/m³. Korek se vyznačuje velmi dobrou tepelnou a zvukovou izolací, má dobrou tepelnou odolnost a při spalování neuvolňuje žádné toxické zplodiny. Korek se používá pro celou řadu aplikací, z nichž mezi nejznámější patří zátky, podlahy, izolační desky a jádro sendvičové konstrukce (Obr. 14b). [23]



a)



b)



c)

Obr. 14 Korek [23]

a) výroba korku, b) korkové jádro, c) struktura korku

❖ Voština

Termín voština se používá pro pole z různých tvarových buněk, které jsou vytvořené z tenkých folií či desek. Voštiny mohou být vyrobeny ze široké škály materiálů, mezi které nejčastěji patří polymery, kovy, keramika a papír.

Voštinové materiály se vyrábějí v různých tvarech buněk. Nejpoužívanější tvary buněk jsou například čtverec, obdélník, trojúhelník nebo ve tvaru vlnek (Flex-core). V průmyslu nejčastěji používaný je šestiúhelníkový tvar buňky. Vlastnosti voštin se rozdělují do tří hlavních směrů směrů: šířka W (Z angl. Width), délka L (Z angl. Length) a příčný směr T (Z angl. Transverse direction). Na Obr. 15 je znázorněn příklad sendvičové konstrukce s nomexovým voštinovým jádrem. [8]

V praxi je důležité, aby voština pro různé aplikace splňovala požadované vlastnosti. Pro správnou volbu voštiny se přihlíží na poměr cena/výkon, hustotu, pevnost (smyková pevnost, únavová pevnost, rázová pevnost), tloušťku stěny buňky, odolnost proti vlhkosti, tepelnou a elektrickou vodivost, odolnost proti chemikáliím, odolnost proti otěru, tlumicí schopnosti a obrobiteľnost. [24]



Obr. 15 Ukázka sendvičové konstrukce s voštinovým jádrem [15]

Zadaný typ voštiny musí obsahovat informace o materiálu, ze kterého bude daná voština vyrobena, dále informace o tvaru a velikosti buněk a hustotě.[24]

➤ **Typy šestiúhelníkových buněk voštinového jádra:**

▪ **Šestihránná voština**

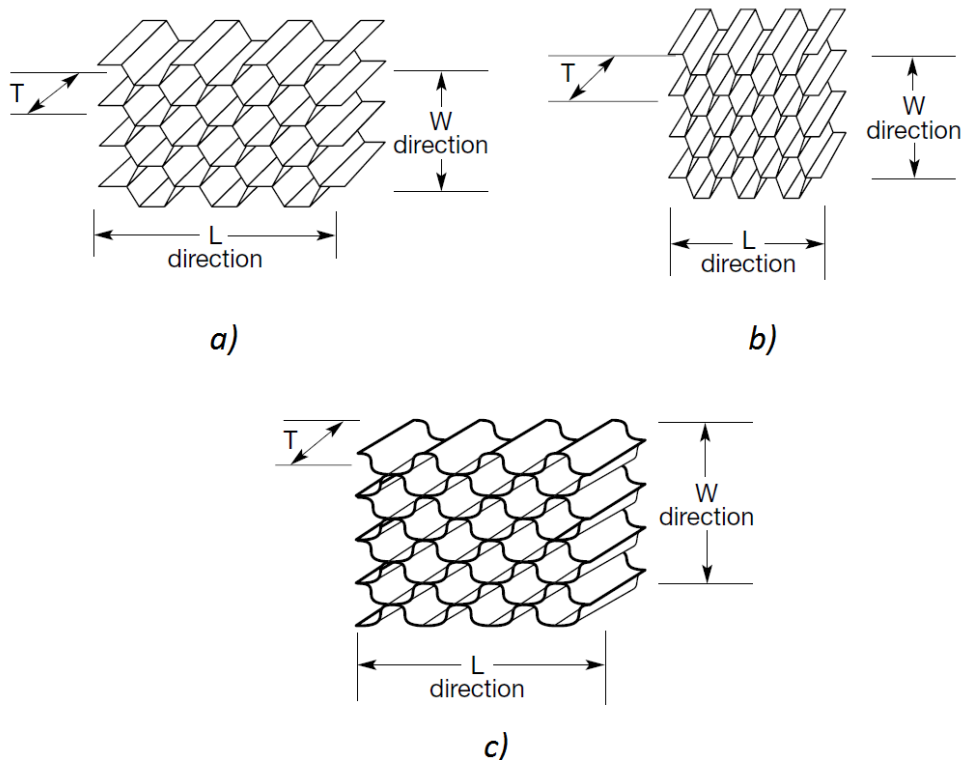
Standardní šestihránná voština (Obr. 16a) je základní a nejčastěji používaná. Je běžně k dispozici z kovových i nekovových materiálů. [24]

▪ **OX-Core (Z angl. Over Expanded)**

Konfigurace voštiny OX-Core (Obr.16b) je šestihránná, která je ve směru W prodloužena a v tomto směru poskytuje obdélníkovou konfiguraci, která umožňuje zakřivení nebo formování ve směru L. Tento typ plástve zvyšuje smykové vlastnosti ve směru W a snižuje ve směru L v porovnání s šestihránným typem voštiny. [24]

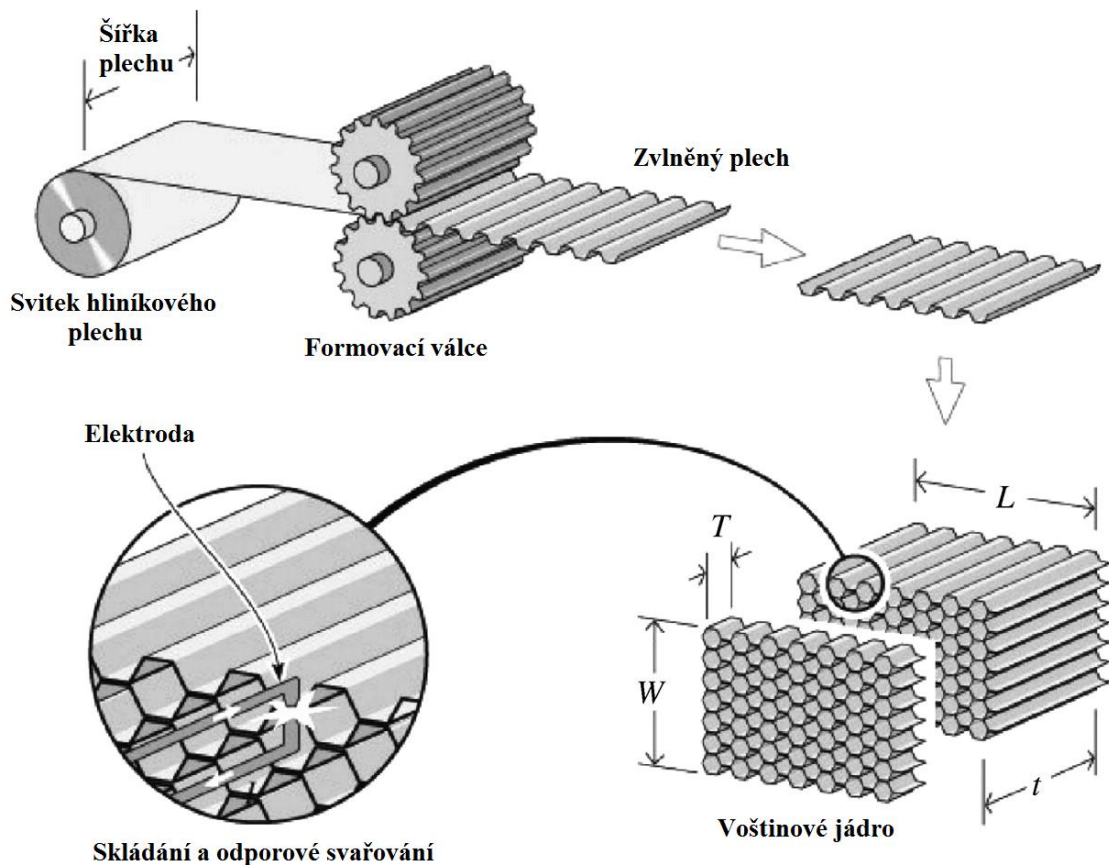
▪ **Flex-Core**

Flex-core buňka (Obr. 16c) poskytuje vyšší pevnost ve smyku než srovnatelné hexagonální jádro stejné hustoty. [24]



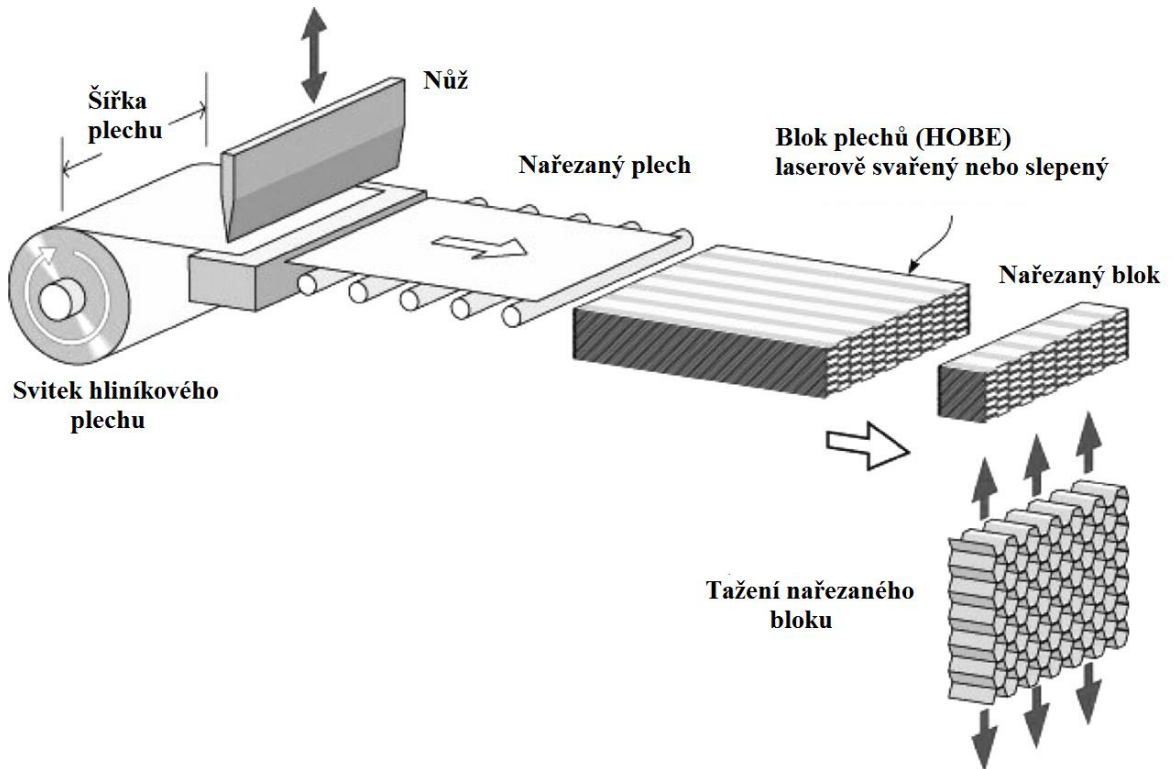
Obr. 16 Vybrané tvary buněk voštinových materiálů [24]
a) šestihránná buňka, b) buňka OX-core, c) buňka Flex-core

Voštinové materiály se vyrábí nejčastěji pomocí dvou metod. První metodou je tvarování, kdy materiál ve formě tenkého plechu či fólie prochází přes tvarové válce, které dávají plechu výsledný tvar. Poté je plech skládán na sebe, kde dochází ke spojení plechů. Spojení plechů se vykoná svařením či lepením a výsledný blok se nařeže na požadovanou tloušťku. [26]



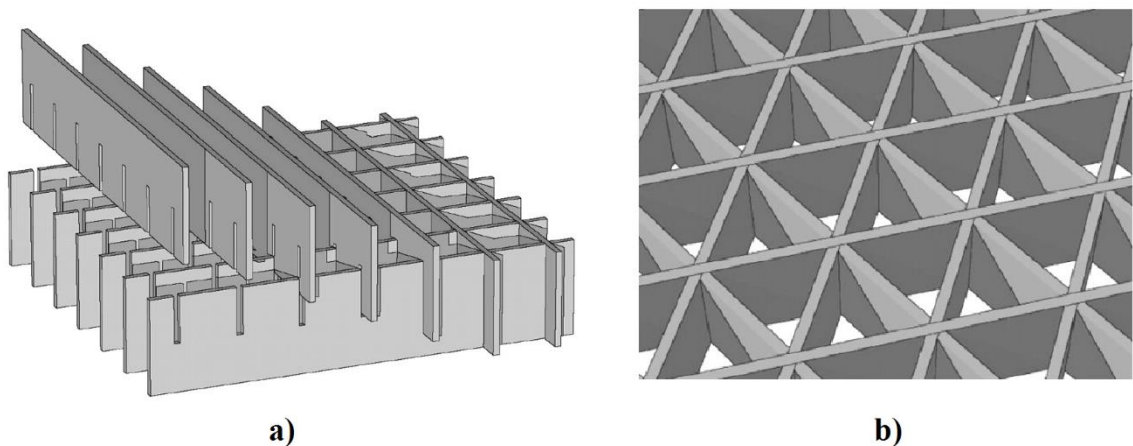
Obr. 17 Výroba voštin tvarováním [27]

Druhou technologií je tzv. HOBE (Z angl. Honeycomb Before Expansion). Při této technologii jsou tenké kovové plechy nejdříve stříhány a skládány na sebe. Potom se po délce pájí v určitých rozestupech. Takto spojené plochy se řežou na požadovanou hloubku, kolmo na rovinu, ve které leží spoje. V tomto směru jsou následně tažené, čímž vznikne hexagonální struktura buněk. Plechy se spojují lepením, laserovým svařením nebo difuzním procesem. [26]



Obr. 18 Výroba voštin metodou HOBE [27]

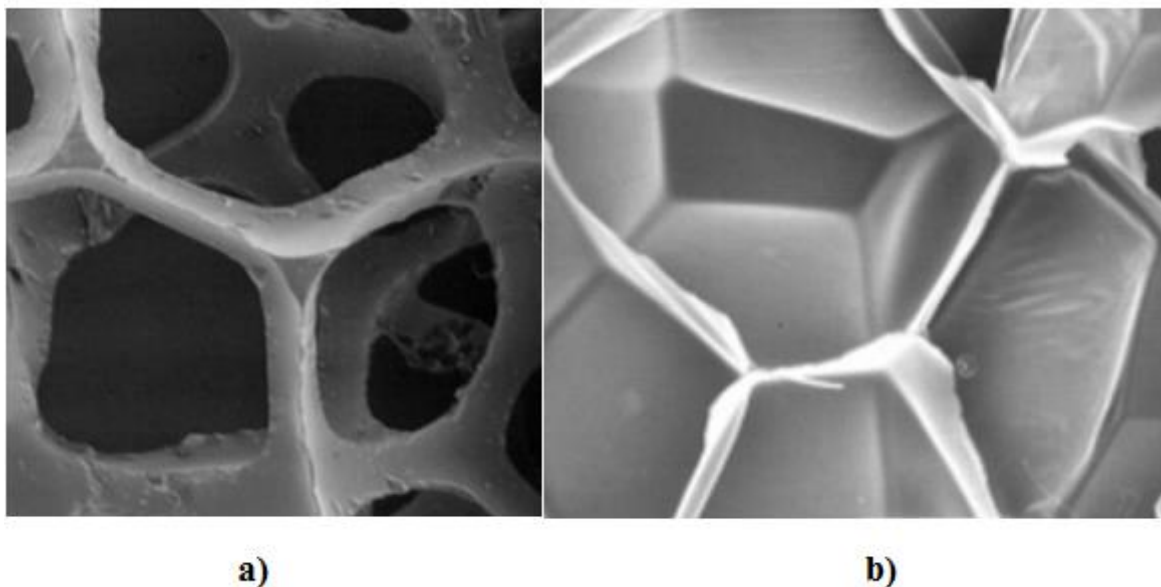
Speciální technologií je pak skládání pásů plechů. Pásky plechů, ve kterých jsou vytvořeny zářezy, se vkládají do sebe. Při této technologii není potřeba žádné ohýbání plechů. Vzniklé buňky mají pouze čtvercový nebo trojúhelníkový tvar. Vytvořená struktura se potom svařuje nebo pájí. Tato metoda se používá i pro křehké keramické materiály a kompozity. [26]



Obr. 19 Výroba voštin skládáním pásů [27]
a) čtvercová voština, b) trojúhelníková voština

❖ *Polymerní pěna*

Polymerní pěny se vytváří společným smícháním pevné a plynné fáze. Výsledná struktura je popsána dvěma způsoby; struktura s otevřenými buňkami (Obr. 20a) a struktura s uzavřenými buňkami (Obr. 20b). Struktura s uzavřenými buňkami je obvykle tužší a má dobré vlastnosti tepelné izolace, zatímco struktura s otevřenými buňkami má lepší schopnost absorpce vody a vlhkosti, vyšší propustnost plynů a lepší absorpci zvuku. Plyn, který se používá pro vytvoření polymerní pěny, se nazývá nadouvadlo. Nadouvadlo se používá chemické a fyzikální. Chemická nadouvadla jsou látky, které se při chemické reakci rozkládají a vytvářejí tak buňky pěny. Fyzikální nadouvací činidla jsou plyny, které chemicky nereagují při tvorbě polymerní pěny, a proto jsou inertní k polymeru tvořící matrici polymerní pěny. [28, 29]



Obr. 20 Ukázka buňkové struktury [29]

a) Otevřené buňky, b) Uzavřené buňky

Polymerní pěny se dělí na termoplastické a reaktoplastické, ty se dále dělí na pevné a ohebné pěny. Termoplasty se mohou recyklovat, zatímco termosety je obtížné recyklovat z důvodu silně síťované struktury. Struktura s uzavřenými buňkami se obvykle vyrábí z polyuretanu, epoxidové pryskyřice, silikonu, polyvinylchloridu, polystyrenu, naopak struktura s otevřenými buňkami se nejčastěji připravuje z formaldehydu. [28]

Pěnové materiály se podle hustoty rozdělují na pět základních skupin: [29]

- Velmi lehké ($\rho = 3-50 \text{ kg/m}^3$)
- Lehké ($\rho = 50-200 \text{ kg/m}^3$)
- Střední ($\rho = 200-500 \text{ kg/m}^3$)
- Těžké ($\rho = 500-700 \text{ kg/m}^3$)
- Supertěžké ($\rho = \text{větší než } 700 \text{ kg/m}^3$)

Pro jádra sendvičové konstrukce se nejčastěji používají: [29]

- Polyuretanová pěna (PUR)
- Polystyrenová pěna (PS)
- Polyvinylchloridová pěna (PVC)
- Polymethacrilimidová pěna (PMI)
- Polyethyltereftalátová pěna (PET)
- Styren-akrilonitrilová pěna (SAN)

➤ **Polyuretanová pěna (PUR)**

Polyuretanová pěna je vyráběna v mnoha variantách od měkké pěny s otevřenými buňkami až po tuhou pěnu s uzavřenými buňkami. PUR pěna se vyrábí s hustotou $30-500 \text{ kg/m}^3$. PUR pěny mají obvykle křehké stěny buněk a tím pádem nemají možnost velkého protažení. Mechanické vlastnosti jsou nižší oproti ostatním polymerním pěnám. Nicméně PUR pěna je nejlevnější ze všech dostupných materiálů jádra sendvičové konstrukce. V praxi je PUR pěna známá také jako molitan. PUR pěna má velmi dobré izolační a akustické vlastnosti. Používá se především ve stavebnictví. Dále se často vyskytuje v nábytkářském průmyslu pro výrobu čalouněného nábytku a jako jádro v sendvičových konstrukcích. [30]

➤ **Polystyrenová pěna (PS)**

Polystyrenová pěna je vyráběna vytlačováním nebo expanzí v uzavřených formách. V obou případech je plast smíchaný s nadouvadlem, které se roztahuje při zvýšené teplotě. Polystyrenové pěny mají hustotu $15-300 \text{ kg/m}^3$. PS pěna má dobré mechanické, tepelně izolační vlastnosti a odolnost proti vlhkosti, a to při nízké výrobní ceně. Nevýhodou PS pěny je malá odolnost proti chemikáliím a vysoká hořlavost, proto se přidávají retardéry hoření pro zajištění samozhášivosti. [31]

➤ Polyvinylchloridová pěna (PVC)

PVC pěna existuje ve dvou různých formách, a to jako zesíťovaná či nezesíťovaná varianta. Nesíťovaná PVC pěna se vyznačuje vysokou tažností, dobrými mechanickými vlastnostmi, ale měkne při zvýšených teplotách. Síťovaná PVC pěna je tužší, má vyšší pevnost a tuhost, dobrou odolnost proti zvýšeným teplotám, ale je křehká. Polyvinylchloridová pěna je dostupná v hustotách 30-400 kg/m³. Mechanické vlastnosti PVC pěny jsou mnohem vyšší než u PUR pěny a PS pěny, avšak je ve srovnání s těmito pěny dražší. Teplotní odolnost PVC pěny je omezená do 100°C. PVC pěny mají při nižších hustotách téměř 95% uzavřených buněk a při vyšších hustotách mají všechny uzavřené buňky, což se s výhodou využívá v aplikacích, kde je potřeba dobré odolnosti proti navlhavosti. PVC pěny mají výbornou chemickou odolnost a dobré izolační vlastnosti. [32]

➤ Polymethacrilimidová pěna (PMI)

PMI pěna vykazuje jedny z nejlepších mechanických vlastností z dostupných polymerních pěn. PMI pěna je poměrně křehká a vykazuje tažnost přibližně 3%. Hlavní výhodou PMI pěny je odolnost proti vysokým teplotám. Struktura PMI pěny má uzavřené buňky a hustota se pohybuje v rozmezí 30-300 kg/m³. [8]

➤ Polyethyltereftalátová pěna (PET)

Pěny na bázi PET patří k nejnovějším konstrukčním materiálům jádra sendvičové konstrukce. PET pěny se vyznačují vysokou pevností při nízké hmotnosti, vynikající odolností proti únavě a velmi dobrou teplotní stabilitou. Hustota PET pěny se pohybuje v rozmezí 60-400 kg/m³. Mezi další výhodné vlastnosti PET pěny patří dobré tepelně izolační vlastnosti, výborné mechanické vlastnosti a snadná zpracovatelnost. Díky uzavřené buněčné struktuře zajišťuje minimální absorpci vlhkosti. [33]

➤ Styren-akrilonitrilová pěna (SAN)

Termoplastická SAN pěna se vyznačuje uzavřenou buňkovou strukturou. SAN pěna spojuje dobré mechanické vlastnosti s velkým protažením, což vede k výrazné rázové houževnatosti a únavové odolnosti. SAN pěna má velmi dobrou chemickou stabilitu a je odolná proti pryskyřicím, které se používají při výrobě sendvičových konstrukcí. Styren-akrilonitrilová pěna má také velmi dobrou tepelnou odolnost. [34]

2 VÝROBA SENDVIČOVÝCH KONSTRUKCÍ

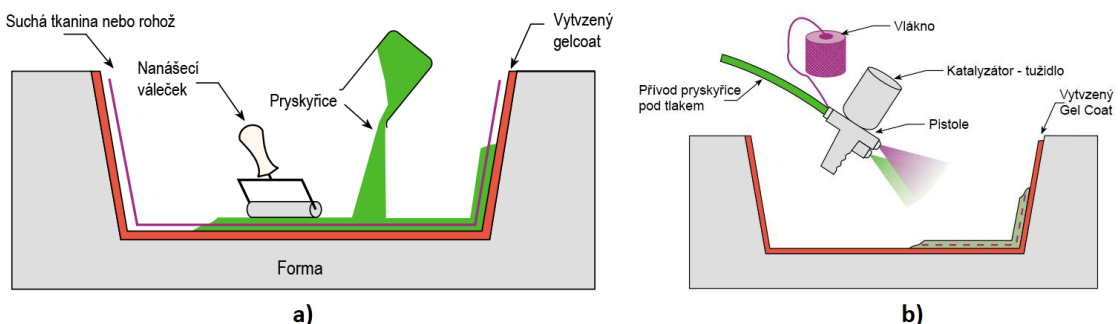
Technologie výroby je velmi důležitý faktor při výrobě sendvičových konstrukcí, jelikož ovlivňuje konečné vlastnosti výrobku i ekonomiku celé výroby. Volba metody výroby je dána především charakterem výrobku:

- sériovost dílce,
- velikost a členitost výrobku,
- kvalita povrchu,
- požadované vlastnosti, zejména pevnost a hmotnost,
- limit nákladů. [5]

2.1 Ruční kladení a stříkání

Ruční kladení je nejjednodušší a nejstarší pracovní postup, který je vhodný pro malosériovou výrobu, výrobu prototypů a velkoplošných dílců. Nejprve se povrch formy opatří vrstvou separačního činidla a na ní se nanese vrstva pryskyřice, která zabraňuje proniknutí struktury výztuže na povrch výrobku a současně slouží jako ochrana povrchu. Poté se postupně kladou předem nařezané vrstvy výztuže, které se prosycují pryskyřicí. Prosycování se provádí ručně pomocí válečku, aby bylo zajištěno rovnoměrné rozložení pryskyřice a odstranění zachyceného vzduchu. Jednotlivé vrstvy výztuže se kladou postupně, dokud se nedocílí požadované tloušťky výrobku. Na povrch formy jde také pomocí ručního kladení nanášet před-impregnované materiály, prepregy. Použití prepregu eliminuje oddělenou manipulaci s výztuží a pryskyřicí a díky dobrému poměru pryskyřice zlepšuje kvalitu výrobku. [15]

Stříkání laminátů je částečně mechanizovaná forma ručního kladení. Pryskyřice, výztuž a ostatní složky se nanášejí pomocí stříkacího zařízení na povrch formy. Pomocí tlakového vzduchu se směs tří složek stříká tryskami na povrch formy s nánosem separátoru. [15]



Obr. 21 a) Ruční kladení, b) Stříkání laminátů [35]

2.2 Vysokotlaké vstřikování (RTM – Resin Transfer Moulding)

Tento proces nese celou řadu podobností s vstřikováním plastových dílů. RTM forma je řešena jako dvoudílná, kdy je nejčastěji vyrobena z kovu nebo kompozitního materiálu. Do formy je možné zabudovat chladicí, popřípadě ohřívací systém. Forma by měla být taktéž dobře spojena pomocí šroubového spojení nebo jiného zabezpečovacího systému. Před vložení výztuže se musí obě části formy opatřit vrstvou separace. Při špatné separaci bude povrch nekvalitní. Poté se výztuž umístí do formy a forma se uzavře. Pryskyřice a tvrdidlo se promíchají v dávkovacím zařízení na homogenní směs a poté se tato směs vstřikuje pod tlakem do uzavřené formy. Kvůli zvýšené odolnosti proti toku způsobené přítomností vláken je nutné, aby pryskyřice měla nízkou viskozitu, a tím se zajistily přiměřené vstřikovací tlaky. Umístění vtokového ústí je velice důležité a musí být pečlivě vybráno, aby se výrobek zcela prosytil pryskyřicí a nevznikala žádná suchá místa a dutiny. Po otevření formy se výrobek vyjme a nechá se na volném vzduchu dovytvdit při pokojové teplotě. Pro technologii RTM se používají obvykle polyesterové, vinyl esterové a epoxidové pryskyřice. [36, 37]

Mezi hlavní výhody technologie RTM se řadí uzavření formy, což zabraňuje unikání výparů při vytvrzování a vytváří pohledové obě strany výrobku. Mezi další výhody metody RTM patří vysoký obsah výztuže (40-50%), dobrá rozměrová stálost, schopnost použití jader a eliminace vzduchových bublin. [36, 37]

Mezi nevýhody technologie RTM patří nutnost použití vysokých tlaků při vstřikování (díky čemuž se může výztuž při vstřikování přemístit do nesprávné polohy), náročnost na kvalitu formy a vysoká cena formy.

Modifikace technologie RTM se dělí na:

- LRTM (Z angl. Light Resin Transfer Molding)
- VARTM (Z angl. Vacuum Assisted Resin Transfer Molding)
- SQRTM (Z angl. Some Qualified Resin Transfer Molding)
- HSRTM (Z angl. Hight Speed Resin Transfer Molding)

❖ **LRTM (Z angl. Light Resin Transfer Molding)**

Technologie LRTM nevyžaduje při vstřikování vysoké tlaky pryskyřice (tlak se pohybuje mezi 0,1 až 0,3 MPa). Menší tlaky dovolují použití méně tuhých a lehčích forem. Pryskyřice je nasávána podtlakem. [37]

❖ **VARTM (Z angl. Vacuum Assisted Resin Transfer Molding)**

Jedná se o modifikaci, při které se prosycení pomáhá účinkem vakua při technologiích RTM a LRTM. Většinou se používá u forem, které jsou složité a mají místa, kde spatně zatéká pryskyřice. Pryskyřice s malou viskozitou se vstříkuje do dvoudílné formy, ve které je připravená výztuž. Tok pryskyřice je vyvolán jak vstříknutím, tak podtlakem. Běžnější je však použití jednodílné formy. Druhá strana formy je tvořena fólií, filmem nebo vakem. Díky této technologii je nižší šance, že budou vznikat suchá místa nebo bubliny, taktéž dochází k odsátí přebytečné pryskyřice, a tím se zvýší obsah vlákna ve výrobku. [37]

❖ **SQRTM (Z angl. Some Qualified Resin Transfer Molding)**

Technologie SQRTM se odlišuje od běžného RTM především tím, že se nepoužívá suchých polotovarů, ale používá se zde prepregů. Prepregové vrstvy jsou naskládány do formy, následně se forma uzavře a do formy se vstříkne malé množství pryskyřice. Je důležité přesné umístění vtokových ústí. Pryskyřice není určena k prosycení prepregu, ale pouze k udržení stabilního hydrostatického tlaku. Pryskyřice zajistí taktéž, aby ve formě nezůstávaly vzduchové nebo těkavé látky. Technologii SQRTM je také daleko jednodušší ovládat, jelikož do výrobku není třeba dodávat velké množství pryskyřice. Ta se nachází přímo v prepregu, tím je zajištěno, že se pryskyřice dostane do všech částí výrobku. [37]

❖ **HSRTM (Z angl. High Speed Resin Transfer Molding)**

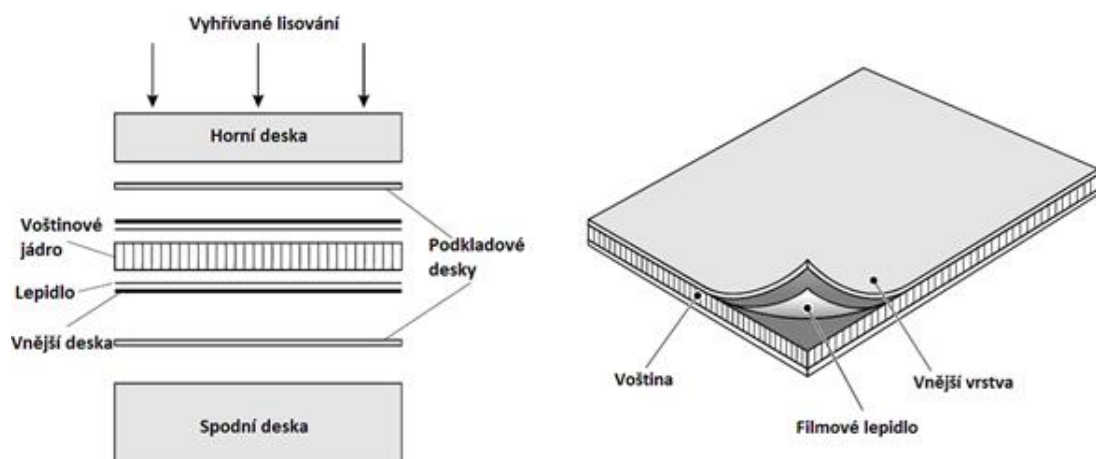
Používá se především v automobilovém průmyslu, kde je nutné, aby pryskyřice rychle polymerovala a výrobek se mohl během krátké doby vyndat z formy. Řešení je navrženo tak, aby se poměr katalyzátoru vyvíjel v průběhu času při plnění a poslední kapky pryskyřice obsahovaly více katalyzátoru než ty na začátku. Pryskyřice je smíchávána s katalyzátorem těsně před vstupem do formy, a tím se spustí její vytvrzování až přímo ve formě. Je nutné mít čas vytvrzení pryskyřice přesně spočítán. [37]

2.3 Lisování ve vyhřívaném lisu

Lisování za tepla a tlaku je jednou z nejproduktivnějších výrobních technologií pro velkosériovou výrobu malých a středně velkých dílů.

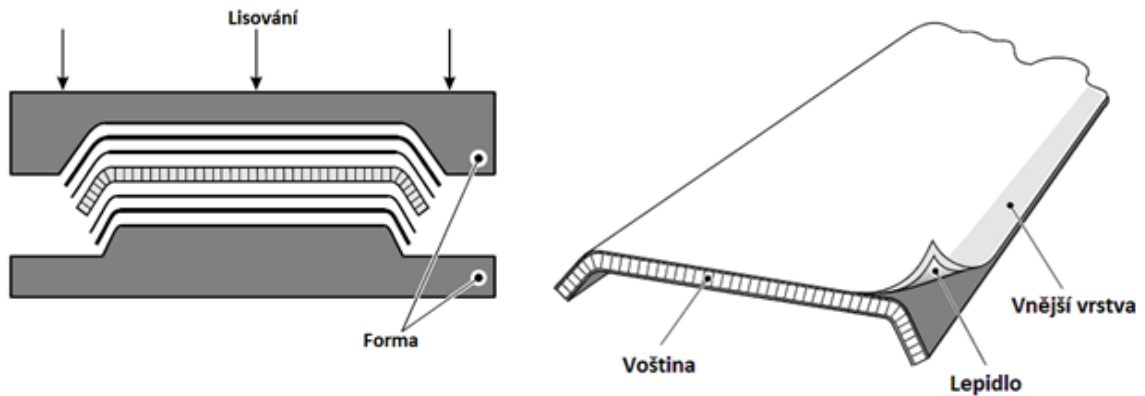
Výroba sendvičových struktur pomocí vyhřívaného lisování spočívá ve vložení všech komponentů sendvičové sestavy mezi podkladové desky a následném zalisování. Sendvičová sestava se skládá ze dvou vnějších desek, dvou vrstev foliového lepidla a jádra. Na vnější krycí desky se při této technologii nejčastěji používají prepregy nebo tenké kovové plechy. Lisování se pak provádí za zvýšených teplot a tlaků ve dvou nebo vícedílných kovových formách, jejichž povrch je leštěný nebo chromovaný. Schéma vyhřívaného lisování je zobrazeno na Obr. 22. [15]

Výhodou lisování ve vyhřívaném lisu jsou krátké výrobní cykly v řádu několika minut, vysoká reprodukovatelnost kvality a rozměrů i možnost automatizace procesu. Nevýhodou jsou vysoké pořizovací náklady na lisy a formy. [5]



Obr. 22 Výroba sendvičové konstrukce lisováním ve vyhřívaném lisu [5]

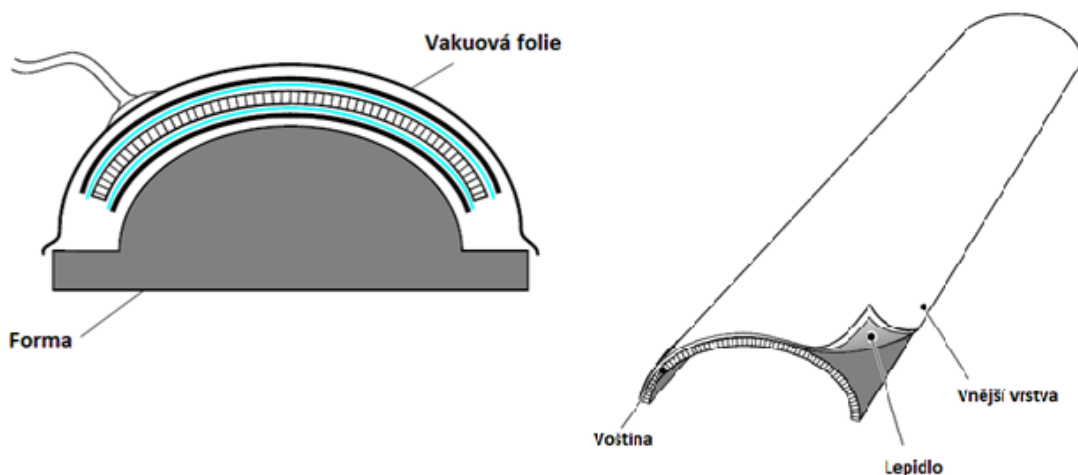
Vytvrzování v uzavřené formě je další metoda vyhřívaného lisování. Tato metoda výroby sendvičových panelů je nejvhodnější pro výrobky, kde je hlavním cílem dosáhnout vysoké přesnosti a dobré povrchové úpravy. Tepla a tlaku lze v tomto případě dosáhnout několika způsoby. Typickým způsobem je použití vyhřívaných forem s vnějším mechanickým tlakem. Formování za pokojové teploty se používá, je-li sendvičová konstrukce příliš velká, nebo není-li topné zařízení k dispozici. [5]



Obr. 23 Výroba sendvičové konstrukce vytvrzováním v uzavřené formě [5]

2.4 Vytvrzování v peci za působení vakua

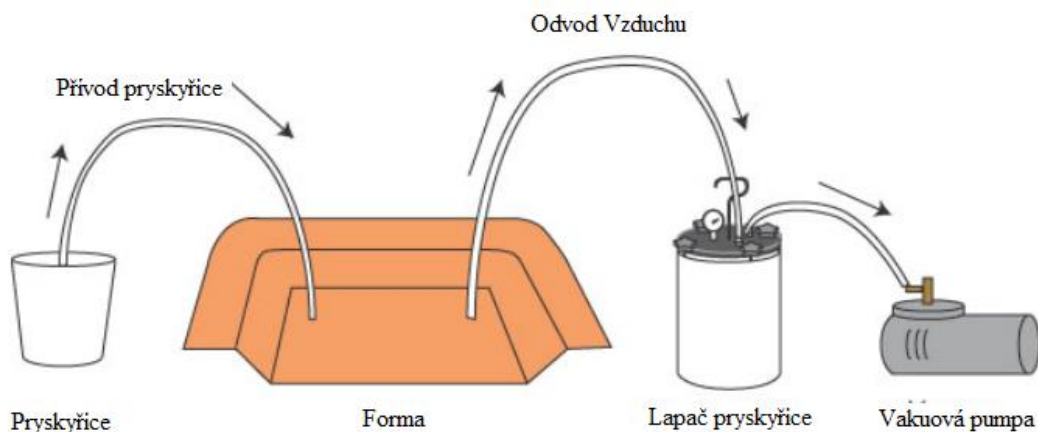
Skladba jednotlivých materiálů, které tvoří sendvičovou strukturu, je stejně jako u lisování připravena ještě před vložením do vakuové pece. Naskládané vrstvy sendvičové konstrukce se pokládají do formy, která je poté překryta pomocnými materiály a vakuovou folií. Forma pokrytá pružnou folií se umístí do vyhřívané pece. Tato technologie výroby je vhodná zejména pro jádra sendvičové konstrukce, která jsou pružná a poddajná. Jako vnější krycí vrstvy se nejčastěji používají prepregy nebo předem vytvarované kovové plechy opatřené adhezivní vrstvou. [5]



Obr. 24 Výroba sendvičové konstrukce vytvrzováním ve vakuové peci [5]

2.5 Vakuová infuze

Vakuová infuze (VIP – Z angl. Vacuum Infusion Process) je technologie, při které se využívá podtlaku k prosycení výztuže pryskyřicí. Suchá výztuž se vkládá na připravenou formu. Těsně před transportem matrice je ve formě vytvořeno vakuum. Prosyncování infuzí je vhodné pro malé až střední série. Jako výztuže se používají vyztužující materiály všeho druhu, od tkanin na bázi skleněných, uhlíkových nebo aramidových vláken, až po speciální prošíváné nebo složené rohože. Metoda je vhodná pro konstrukce, do kterých mohou být zakomponovány jádrové materiály pro vytvoření sendvičové struktury. Nejčastěji se používá pěnové jádro. [38]



Obr. 25 sestava pro vakuovou infuzi [37]

Při vakuové technologii se používá mnoho pomocných materiálů, které jsou k výrobě nezbytné. Po dokončení výroby a následného odformování dílce se z pomocných materiálů většinou stává odpad. Mezi pomocné materiály patří vakuová folie, odsávací rohož, distribuční síťka, separační tkanina. [39]

Vakuová folie je pružná plastová folie, která umožňuje vytvářet vakuum. Slouží jako horní díl formy. Tato folie překrývá všechny ostatní pomocné materiály a musí být řádně utěsněna. Folie musí být tepelně, chemicky i mechanicky odolná. Její rozměr se volí s přesahem o 30 až 40% než samotný výrobek. Odsávací rohož je netkaná textilie, která plní dvě funkce. Zabezpečuje odsávání vzduchu z uzavřeného prostoru a absorbuje přes separační folii přebytečnou pryskyřici. Distribuční síťka zabezpečuje rozvod pryskyřice a urychluje její tok do suché výztuže. Stejně jako většinu pomocných materiálů i distribuční síťku nelze po prosycení pryskyřice znovu použít. Pro lepší tok pryskyřice se použije i více vrstev. Volba distribučního média závisí na použité technologii a pryskyřici. Separací tkanina je tvořena ze syntetických vláken, které se kladou jako první přímo na výztuže výrobku. Při odformování se

separační tkanina strhává z výrobku a vzniká drsný povrch potřebný pro další technologické operace, mezi které patří laminování, lepení nebo povrchová úprava. Také slouží k oddělení všech další pomocných materiálů. [39]

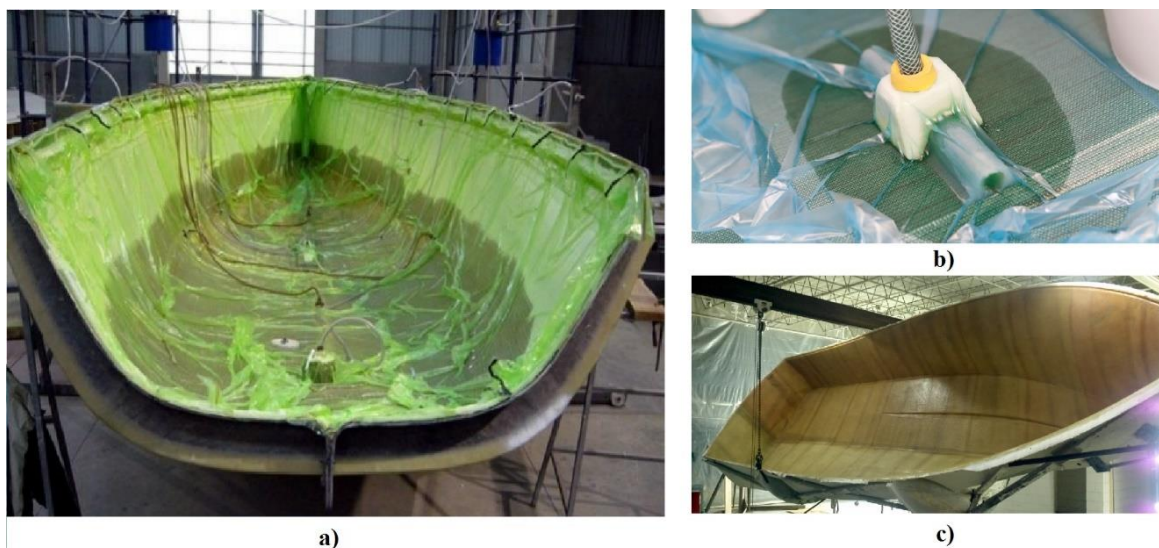
Mezi hlavní výhody vakuové infuze patří:

- Vhodné pro velkorozměrné výrobky,
- nízká hmotnost,
- vysoký obsah výztuže,
- minimální obsah dutin,
- dobré mechanické vlastnosti,
- eliminuje únik styrenu do ovzduší. [38]

Nevýhody vakuové infuze:

- Pomocné materiály zvyšují náklady,
- vysoké nároky na praktickou zkušenost pracovníka. [38]

Výrobky vyrobené vakuovou infuzí se nejčastěji používají na paluby a trupy lodí, různé dílce pro kapotáž lokomotiv a vagonů, lopatky větrných elektráren, komponenty letadel, sendvičové konstrukce atd.



Obr. 26 Výroba trupu lodi vakuovou infuzí [40]

a) průběh vakuové infuze, b) detail na rozvod pryskyřice, c) hotový výrobek

2.5.1 Princip vakuové infuze

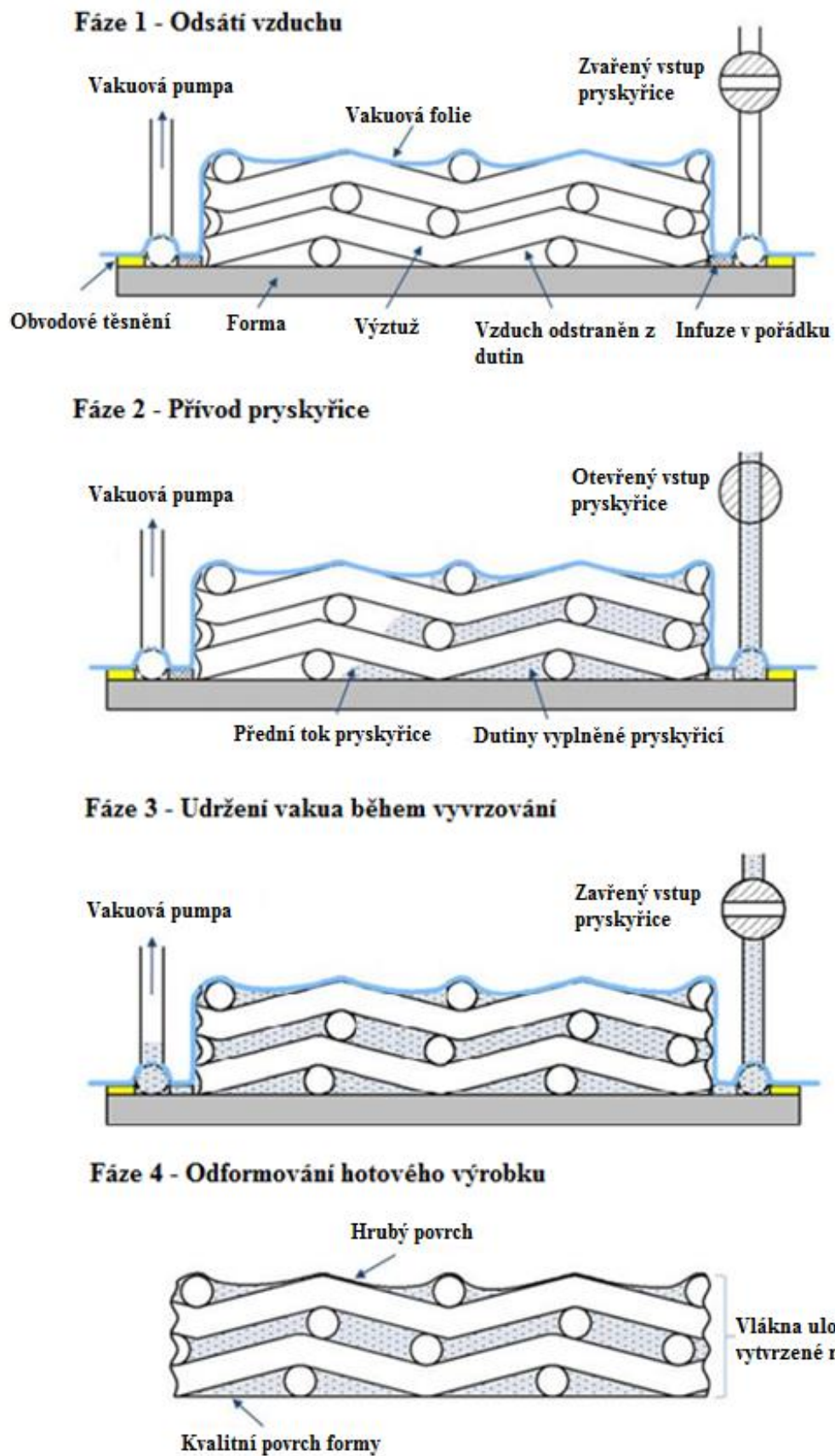
Suchá výztuž se postupně klade do připravené dutiny formy. Na tuto výztuž se dále kladou technologické pomocné vrstvy (separační fólie, distribuční medium, vakuová fólie atd.). Nejdříve se z formy odsaje vzduch a vytvoří se tak podtlak. Pomocí vakuové folie se všechny materiály ve formě slisují. Matrice je následně do formy transportována pomocí vakua a rozváděcí tkaniny. K prosycení suchých vrstev se využívá podtlaku a suchá výztuž se postupně smáčí matricí. Po úplném prosycení výztuže matricí začíná vytvrzování matrice, které probíhá při standartních atmosférických podmínkách. Po vytvrzení matrice dochází k odformování výrobku. [39]

U vakuové infuze se přebytečná matrice odsává z formy, což u ručního laminování nebo stříkání není. Tím pádem vzniká lehčí výrobek s lepšími mechanickými vlastnosti. Díky vakuové fólii je zabráněno emisi matrice do okolí. [39]

Technologie vakuové infuze získala již mnoho modifikací. Mezi nejznámější způsoby vakuové infuze patří:

- VFI (z angl. vacuum foil infusion),
- VPI (z angl. vacuum proces infusion),
- CVI (z angl. Controled vacuum infusion),
- SCRIMP (z angl. Seeman Composite Resin Infusion Moulding Process),
- VBM (z angl. Vacuum Bag Mouldning),
- DBI (z angl. Double bag infusion),
- RI (z angl. Resin infusion). [41]

Všechny tyto zkratky různých výrobních technologií jsou založeny na principu vytvoření vakua před přivedením matrice do formy.



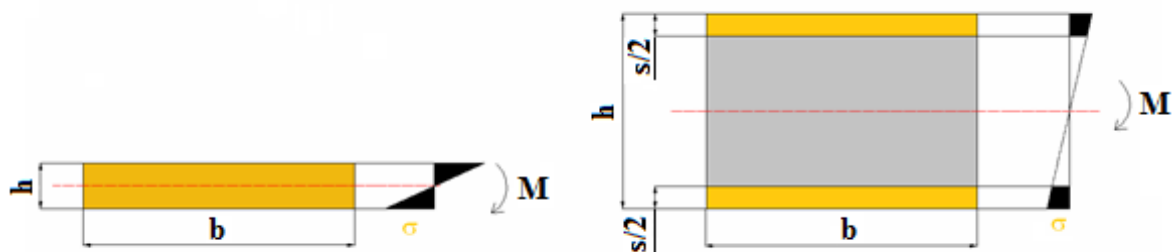
Obr. 27 Princip vakuové infuze [41]

3 VYZTUŽOVÁNÍ POLYMERNÍCH STĚN ŽEBROVÁNÍM

3.1 Vyztužování tenkých polymerních stěn

Převládajícím typem namáhání sendvičových výrobků jsou namáhání ohybová. Tenkostěnných profilů se vyrábí celá řada v závislosti na jejich použití. Ohybová tuhost i ohybová únosnost je u nevyztužené tenké stěny velmi malá. Z geometrické stránky je to způsobeno tím, že hmota profilu je soustředěna poblíž její neutrální osy (plochy nulových ohybových napětí). Ramena vnitřních sil v průřezu stěny jsou tedy malá, a proto materiál stěny je při přenosu ohybových momentů málo využit. Zvyšování ohybové tuhosti a pevnosti zvětšením tloušťky stěny je velmi neekonomické a také málo účinné. Proto se pevnost a tuhost daného profilu zvětšuje tak, aby se ušetřilo materiálu a zároveň se zvýšila ohybová tuhost a pevnost na požadované hodnoty. Pro zvýšení pevnosti a tuhosti je tedy důležité, aby se podstatná část průřezu profilu nacházela ve větší vzdálenosti od neutrální plochy průřezu profilu. Poloha neutrální osy je dána polohou těžiště průřezu (za předpokladu lineárně elastického chování). [42]

Následující obrázek zobrazuje rozdíl mezi málo využitým materiálem nevyztužené plochy a dobře využitým materiálem sendvičové konstrukce [42]

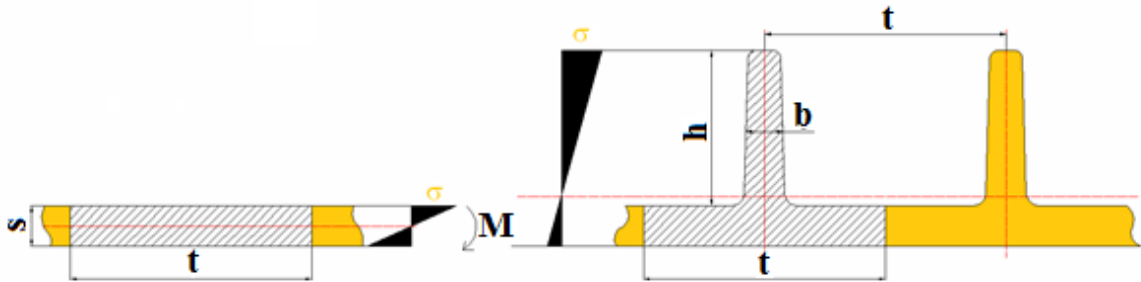


Obr. 28 Srovnání nevyztužené stěny a sendvičové konstrukce [42]

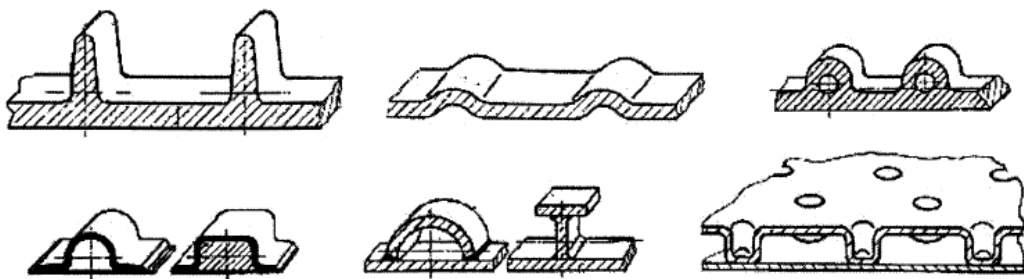
Vliv pěnového jádra sendvičového profilu se zanedbává. Zvýšení tuhosti je zřejmé, přičemž využití materiálu je v obou případech tedy stejné. Jasně je vidět rozdíl velikosti napětí při působení na tyto profily stejným ohybovým momentem. Zvýšení tuhosti je dáno poměrem kvadratických momentů ploch průřezů k neutrální ose: [42]

$$\frac{J_s}{J} = \left(\frac{h}{s}\right)^3 - \left(\frac{h}{s} - 1\right)^3 \quad (1)$$

Málo efektivní jsou jednostranné typy vyztužení stěn s průřezy nesouměrnými k neutrální ose. Sem patří zejména vyztužení vstříkovaných výrobků jednostrannými žebry. Jejich nevýhodou je nesymetrie průřezu k neutrální ose mající za následek relativně vysoké hodnoty ohybového napětí na koncích žeber. [42]



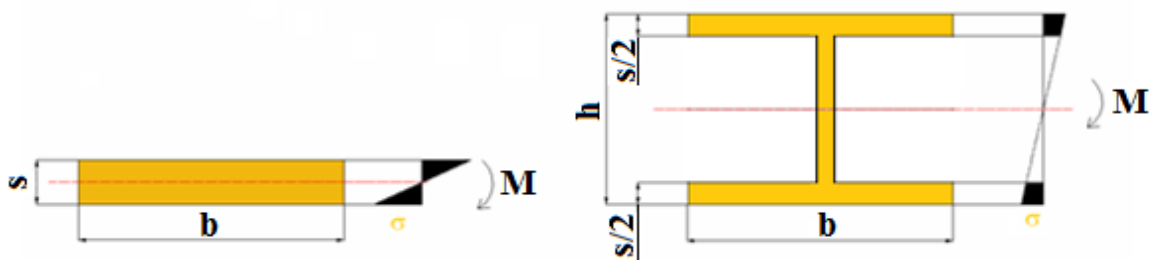
Obr. 29 Jednostranné vyztužení žebry [42]



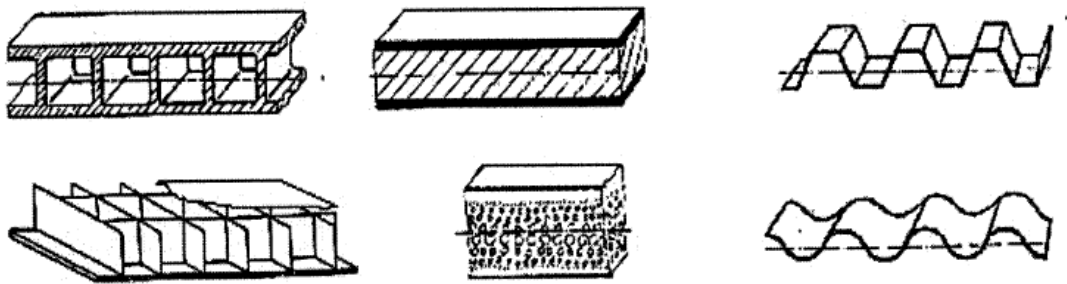
Obr. 30 Typy jednostranného vyztužení [42]

U profilů, jež mají vyztužení provedeno jednosměrně, dochází k tzv. konstrukční ortotropii. Jedná se tedy o to, že ve směru výztuže vzrůstá ohybová tuhost, avšak ve směru příčném zůstává prakticky na úrovni nevyztužené stěny. [42]

Symetrické plošné výztuže (duté profily, sendvičové konstrukce) vykazují vysoké poměry ohybové tuhosti ku objemu materiálu profilu. [42]



Obr. 31 Symetrické vyztužení [42]



Obr. 32 Typy symetrického vyztužení [42]

3.2 Vyztužování jádra sendvičových konstrukcí

Kompozitní sendvičové konstrukce jsou vyrobeny ze dvou tenkých tuhých vnějších krycích vrstev a lehkého materiálu jádra. Vzhledem k výhodám kompozitních sendvičových konstrukcí, jako je vysoký poměr mezi pevností a hmotností, jsou sendvičové panely široce používány v průmyslu (zejména automobilový, letecký a raketový). V těchto aplikacích jsou dané struktury obvykle vystaveny různému druhu zatížení. Mezi nejčastější patří namáhání v tlaku a ohybu. Při překročení limitní hodnoty napětí nedochází pouze k porušení jednotlivých materiálů sendvičového panelu, ale často dojde i k porušení vazby mezi jednotlivými materiály sendvičové konstrukce. [43]

Vyztužování sendvičových konstrukcí se provádí především za účelem zlepšení mechanických vlastností materiálu jádra a také pro zlepšení vazby vnějších krycích vrstev a jádra sendvičové konstrukce. [43]

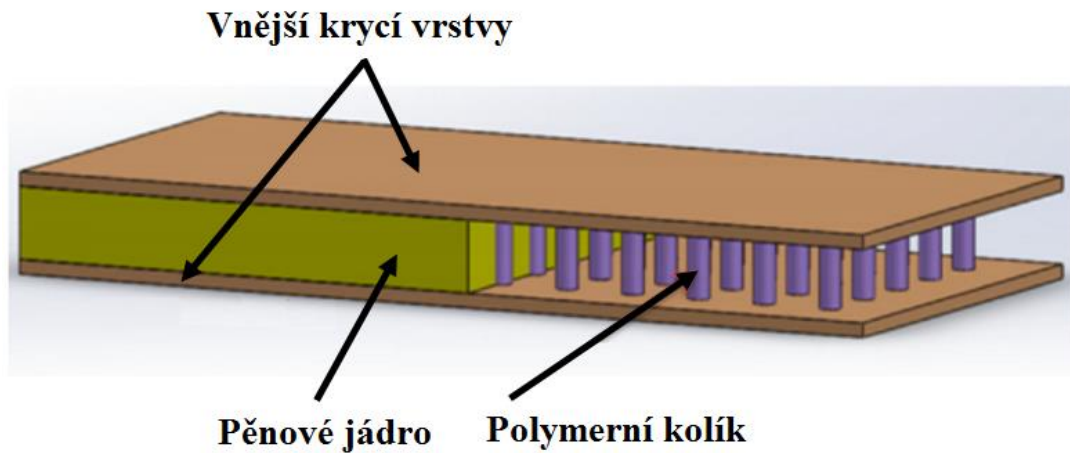
3.2.1 Vyztužování sendvičové konstrukce polymerními kolíky

Vyztužené pěnové jádro sendvičového panelu s kompozitními vnějšími krycími vrstvami je nový druh sendvičové konstrukce, kde je pěnové jádro vyztužené kruhovými polymerními kolíky. Tyto kolíky také pevně spojují vrchní a spodní vnější krycí vrstvu. Schématicky je vyztužený sendvičový panel polymerními kolíky znázorněn na Obr. 33. Polymerní kolíky jsou vyrobeny ze stejného polymeru, který se používá jako matrice u kompozitních vnějších krycích vrstev. [43]

Výhody vyztuženého sendvičového panelu polymerními kolíky jsou:

- Výroba probíhá v jednom kroku. Proto jsou vnější krycí vrstvy, pěnové jádro a polymerní kolíky spojeny do jedné konstrukce.

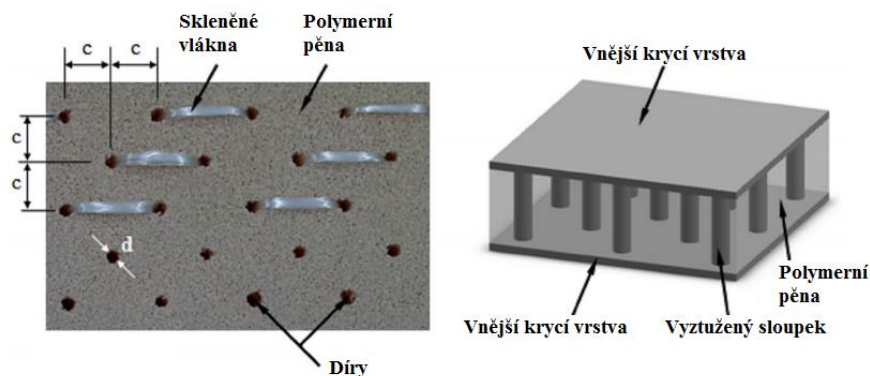
- Polymerní kolíky pevně spojují horní a spodní vnější krycí vrstvy sendvičového panelu a zvyšují pevnost na rozhraní mezi pěnovým jádrem a vnějšími krycími vrstvami.



Obr. 33 Vyztužení sendvičové konstrukce polymerními kolíky [43]

3.2.2 Vyztužování sendvičové konstrukce prošíáním jádra vlákny

Vyztužování sendvičové konstrukce prošíáním jádra vyztužujícími vlákny je principiálně velmi podobné předešlému způsobu vyztužování sendvičové konstrukce polymerními kolíky. Jak znázorňuje Obr. 34, do otvorů v pěnovém jádru se prošijí vyztužující vlákna, které se následným zpracováním prosytí stejnou matricí, jež je použita pro vnější krycí vrstvy sendvičové konstrukce. Dále pro pevnější vazbu mezi jádrem a vnější krycí vrstvou je možné vlákna prošít také jednotlivé vrstvy vnějších krycích vrstev. Tento způsob vyztužování sendvičového panelu je výrobně náročnější z důvodu odděleného prošívání jádra a následného prosycování pryskyřicí. Jádro se prošívá ručně, což je časově náročné, nebo pomocí šicího stroje. [44]

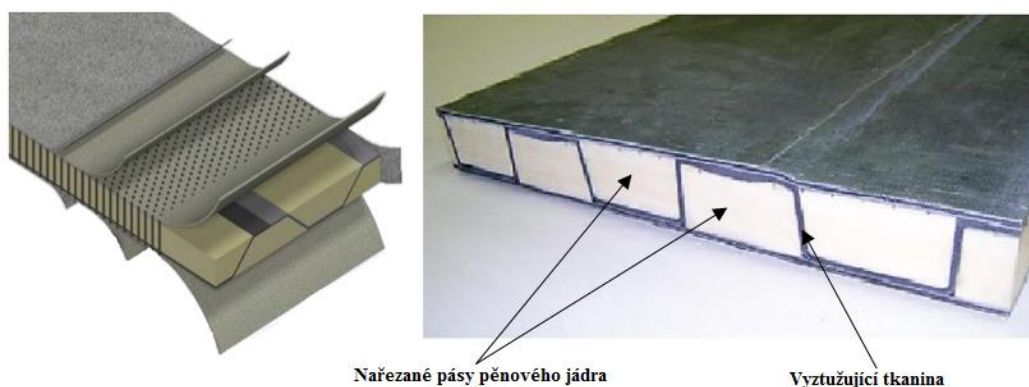


Obr. 34 Vyztužení sendvičové konstrukce prošíáním jádra vlákny [44]

Obě metody vyztužování sendvičových konstrukcí jsou značně efektivní, a zlepšení mechanických vlastností sendvičového panelu je velmi výrazné. Modifikace mechanických vlastností se provádí různými rozměry průměru a rozmístěním děr. Také volbou vyztužujících vláken používaných na vnější krycí vrstvy a prošitím jádra sendvičové konstrukce.

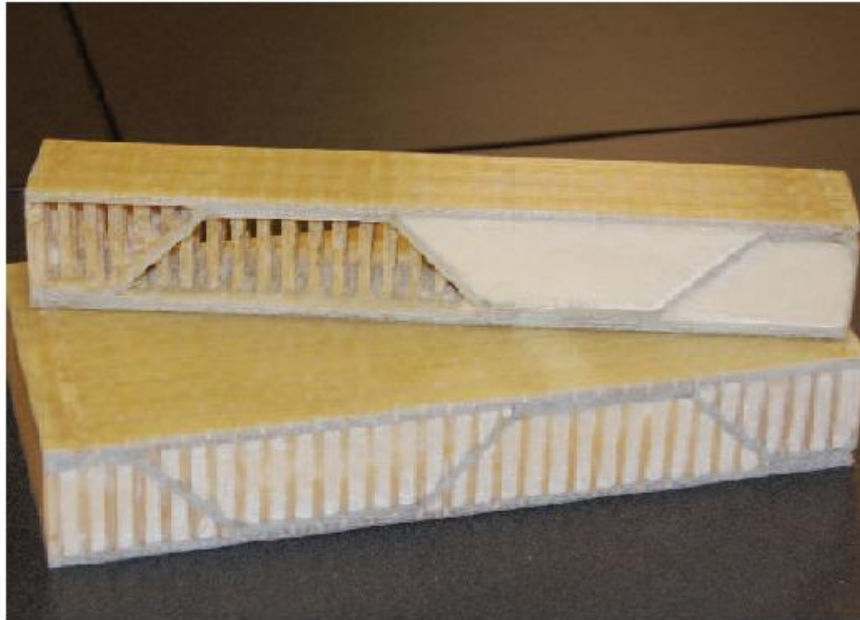
3.2.3 Vyztužování sendvičové konstrukce prokládáním pásů jádra vyztužující tkaninou

Při této technologii vyztužování sendvičové konstrukce je jádro nařezáno na pásy požadované velikosti a tvaru. Pásy jádra se podle potřeby řežou pod určitým úhlem. Mezi pásy jádra se vkládá vyztužující tkanina, která se v následující operaci prosyť pryskyřicí. Pro výztuž se používá nejčastěji skleněných, uhlíkových nebo aramidových vláken. Na jádro se používá polymerní pěna nebo balsové dřevo. Vytvořený vnitřní zvlněný profil velmi výrazně zvyšuje ohybovou tuhost a odolnost proti smykovým silám při velmi nízké hmotnosti. [45]



Obr. 35 Vyztužení sendvičové konstrukce prokládáním pásů jádra vyztužující tkaninou [46]

Tuto technologii lze kombinovat s některou z předchozích metod vyztužování sendvičové konstrukce. Díky tomu lze dosáhnout extrémně příznivých vlastností pro konkrétní aplikaci sendvičového panelu.



Obr. 36 Kombinace více technologií vyztužení sendvičové konstrukce [45]

4 TESTOVÁNÍ SENDVIČOVÝCH KONSTRUKCÍ

Kompozitní materiály mají nejrozmanitější vlastnosti, které jsou dány především jejich chemickým složením a strukturou. Pro použitelnost v technické praxi se dělí na vlastnosti:

- fyzikální (měří se např. hustota, elektrická a tepelná vodivost atd.),
- chemické (měří se např. elektrochemické, korozní atd.),
- mechanické (měří se např. pružnost, pevnost, houževnatost, tvrdost, tečení, únava atd.). [47]

Testy mohou být prováděny buď samostatně na vnější krycí vrstvy, na jádro sendvičové konstrukce, anebo na celý sendvičový panel. Správné plnění funkce sendvičové konstrukce vyžaduje, aby celý panel (jak obě krycí vrstvy, tak jádro panelu) splňoval požadované vlastnosti. Stejně tak je důležité, aby tyto komponenty měly nedílnou strukturu, to znamená, že vazba mezi nimi je spolehlivá a může přenášet potřebné síly. [47]

4.1 Testování mechanických vlastností sendvičové konstrukce

Testování mechanických vlastností materiálů hraje nezastupitelnou roli při kontrole technologie výroby, při kontrole jakosti a při přejímkách polotovarů či výrobků a také při vývoji nových materiálů.

Z hlediska působení síly na zkušební těleso se mechanické zkoušky rozdělují na:

- Statické zkoušky,
- dynamické zkoušky rázové a cyklické,
- zkoušky podle teploty, při kterých se provádí. [47]

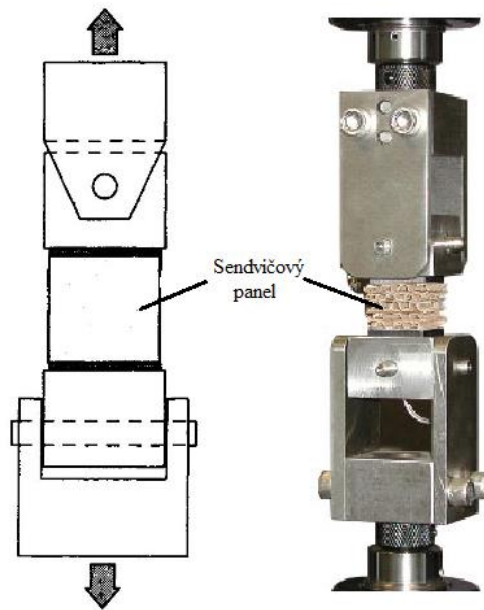
4.1.1 Zkouška tahem naplocho

Tato zkušební metoda stanovuje pevnost vazby mezi jádrem a vnějšími krycími vrstvami sendvičové konstrukce. Zkouška se provádí v souladu s americkou normou ASTM C297/C297M-15. Zkouška probíhá na tahovém zařízení, které vyvolá zatížení kolmé k rovině vnějších krycích vrstev sendvičového panelu (Obr. 37). Zkušební přístroj zaznamenává maximální tahové napětí, jaké je sendvičová konstrukce schopna unést. Zkušební vzorek je čtvercového nebo kruhového průřezu. Plocha vnější krycí vrstvy by měla dosahovat nejméně 625 mm². [8, 48]

Napětí se vypočítá ze vztahu: [8]

$$\sigma = \frac{F}{w \cdot l} \text{ [Mpa]} \quad (2)$$

Kde F je zatěžující síla [N], w (Z angl. width) a l (Z angl. length) jsou rozměry zkušebního vzorku [mm].



Obr. 37 Tahová zkouška sendvičového panelu [8]

4.1.2 Smyková zkouška

Smyková zkouška se provádí podle americké normy ASTM C273/C273M-11. Tato zkouška poskytuje informace o deformaci sendvičových konstrukcí při zatížení na stříh rovnoběžně s rovinou sendvičových konstrukcí. Tato zkouška může stanovit modul pružnosti ve smyku celkové sendvičové konstrukce nebo modul pružnosti ve smyku jádra. Šířka zkušebního vzorku může dosahovat maximálně dvojnásobné hodnoty tloušťky a délka může dosahovat maximálně dvanáctinásobku tloušťky sendvičového vzorku.[8, 49]



Obr. 38 Smyková zkouška sendvičového panelu [8]

4.1.3 Ohybová zkouška

Základem pro ohybovou zkoušku sendvičových konstrukcí je americká norma ASTM C393/C393M-11. Ohybová zkouška slouží pro stanovení ohybových vlastností sendvičové konstrukce při tříbodovém nebo čtyřbodovém zatížení. Ohybová zkouška ploché sendvičové konstrukce může být provedena pro zjištění ohybové a smykové tuhosti konstrukce, modulu pružnosti ve smyku a pevnosti ve stříhu jádra, nebo pro stanovení pevnosti v tlaku nebo tahu vnější krycí vrstvy. Zkouška na ohyb dává také základní informace o pevnosti vazby mezi jádrem a vnějšími krycími vrstvami sendvičové konstrukce. Hodnoty pevnosti v ohybu závisí výrazně na poloze vláken vzhledem k neutrální rovině. Ohybový moment vyvolá v horních vláknech průřezu tah a ve spodních vláknech tlak. Je-li průřez symetrický, je neutrální rovina v ose zkušební vzorku. To však platí pouze tehdy, má-li materiál stejné vlastnosti v tahu i tlaku. Pokud tomu tak není, neutrální osa se posouvá směrem k tužším vrstvám, kde je při daném zatížení vyšší pevnost. Ohybová zkouška se provádí na univerzálním trhacím stroji. Zkoušený vzorek je podepřen na volně otočných válečkách tak, aby podepření nebránilo pohybu tyče a tím i volnému deformování. Podpírací trny jsou většinou nastaveny na rozpětí 150 mm. [8, 15, 50]

Zkušební vzorky pro ohybovou zkoušku sendvičových konstrukcí mohou mít jádro z polymerní pěny, voštiny nebo balsového dřeva a vnější krycí vrstvy mohou být ocelové nebo kompozitové. Šířka zkušební vzorku by měla být stejná jako tloušťka celé sendvičové konstrukce, nebo širší. Tloušťky jednotlivých vrstev sendvičové konstrukce se volí podle následujícího poměru: [15]

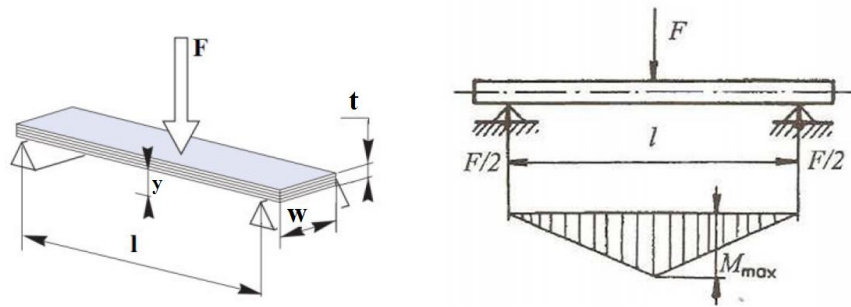
$$\frac{t_c + t_f}{t_f} \geq 5,7 \quad (3)$$

Kde t_c je tloušťka jádra (z angl. thickness core) [mm] a t_f je tloušťka vnější krycí vrstvy (z angl. thickness face) [mm].

❖ Tříbodová ohybová zkouška

Zkušební těleso je podepřeno dvěma podpěrami a uprostřed je zatěžováno konstantní rychlostí, dokud nedojde k porušení zkušební vzorku, nebo deformace nedosáhne stanovené hodnoty. Na Obr. 39 lze vidět, že zatěžovací síla působí ve směru kolmém na vrchní stranu zkoušené sendvičové konstrukce. Při zatěžování se snímá závislost síly na

průhybu zkoušeného vzorku. Ohybový moment se lineárně mění od nuly u podpěr k maximální hodnotě ve středu vzorku. [51]



Obr. 39 Tříbodová ohybová zkouška sendvičového panelu [42, 52]

Maximální ohybový moment M_{max} se vypočítá ze vzorce: [8]

$$M_{max} = \frac{F_{max}}{2} \cdot \frac{l}{2} = \frac{F_{max} \cdot l}{4} \text{ [N} \cdot \text{mm]} \quad (4)$$

Kde F_{max} je maximální zatěžující síla [N], l je vzdálenost podpěr [mm].

Modul průřezu se vypočítá ze vztahu:

$$W = \frac{w \cdot t^2}{6} \text{ [mm}^3\text{]} \quad (5)$$

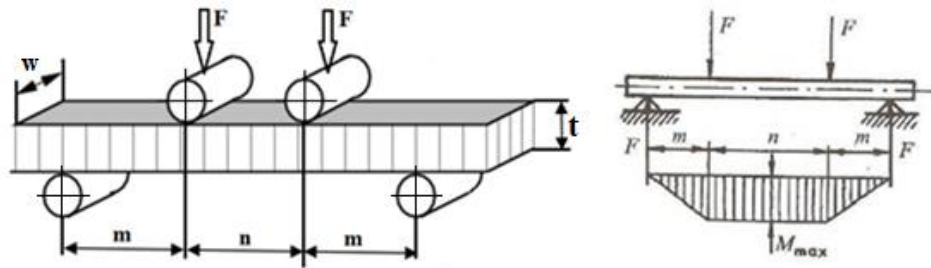
Kde w je šířka [mm] a t je tloušťka testovacího vzorku sendvičové konstrukce [mm].

Maximální ohybové napětí se pak určí ze vztahu: [8]

$$\sigma_y = \frac{M_{max}}{W} \text{ [Mpa]} \quad (6)$$

❖ Čtyřbodová ohybová zkouška

Vzorek se zatěžuje ve dvou symetricky rozložených místech mezi podpěrami (Obr. 40). Výhoda čtyřbodového ohybu spočívá v tom, že zajišťuje konstantní ohybový moment mezi středovými zatěžovacími trny. Tlaková napětí způsobená dvěma středovými zatěžovacími trny jsou nižší v porovnání s napětím vyvolaným jedním zatěžovacím trnem při tříbodové zkoušce. Dvě symetricky rozložená břemena vyvolají ohybový moment, který lineárně roste od nuly u podpěry až na maximální hodnotu pod zatěžujícím břemenem.



Obr. 40 Čtyřbodová ohybová zkouška sendvičového panelu [42]

Působí-li dvě síly F ve stejné vzdálenosti m od podpěr, pak pro čtyřbodový systém platí: [8]

$$M_{max} = F_{max} \cdot m \text{ [N} \cdot \text{mm]} \quad (7)$$

Kde m je vzdálenost zatěžujících trnů od podpěr [mm] a F je zatěžující síla [N].

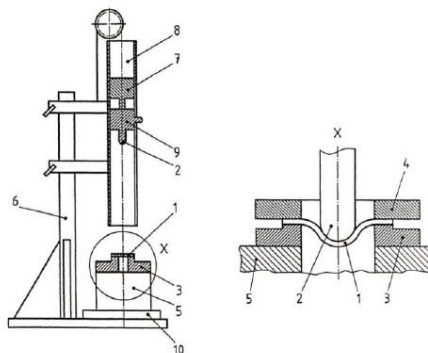
Pevnost v ohybu se pak vypočítá pomocí vzorce: [8]

$$\sigma_y = \frac{M_{max}}{W} \text{ [Mpa]} \quad (8)$$

Kde W je modul průřezu [mm³].

4.1.4 Rázová zkouška

Rázová zkouška se provádí pro měření odolnosti sendvičové konstrukce proti nárazu. Zatížení je vyvoláno poměrně vysokou kontaktní silou, která působí na malou plochu po velmi krátkou dobu. Rázová zkouška je často doplněna tlakovou zkouškou pro zjištění zbytkové pevnosti panelu. [8]



Obr. 41 Rázová zkouška sendvičového panelu [53]

1-zkušební těleso, 2-polokulová nárazová plocha, 3-podpěra pro zkušební těleso, 4-upínací kroužek, 5-základna, 6-držák tlouku, 7-systém pro přidržení a uvolnění tlouku, 8-vodící lišta tlouku, 9-tlouk o známé hmotnosti, 10-akustická izolace

4.1.5 Tlaková zkouška při působení bočního tlaku

Tlaková zkouška poskytuje základ pro posuzování únosnosti sendvičové konstrukce. Zkouška probíhá podle americké normy ASTM C 364/C364M-07. Na vzorek sendvičové konstrukce působí tlakové zatížení ve směru rovnoběžném s plochami sendvičového panelu. [8, 54]

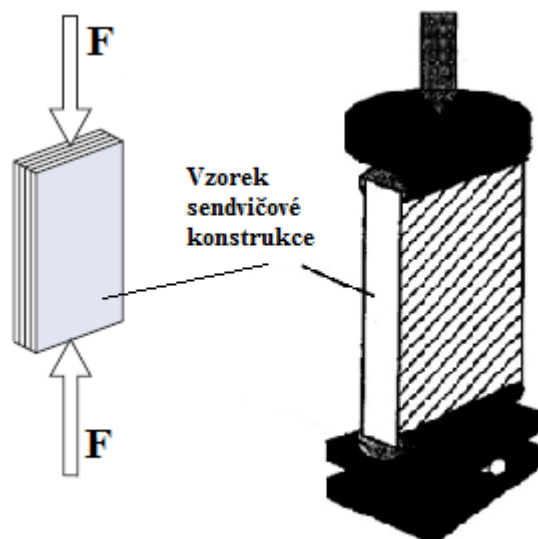
Tato zkušební metoda spočívá ve vystavení sendvičového panelu pomalu rostoucí tlakové síle rovnoběžně s rovinou jeho stran. Síla se přenáší na panel přes sevřenou nebo lepenou krajní podpěru. [8, 54]

Šířka testovacího vzorku by měla být větší nebo rovna 50 mm nebo dvojnásobku tloušťky testovacího vzorku a délka by měla být stejná nebo menší než osminásobek tloušťky testovacího vzorku sendvičové konstrukce.

Při testování se zaznamenává maximální zatěžující síla, která se použije do vzorce pro výpočet pevnosti v tlaku. Vztah pro výpočet pevnosti v tlaku je: [8]

$$\sigma = \frac{F_{max}}{(2 \cdot t_f) \cdot w} [Mpa] \quad (9)$$

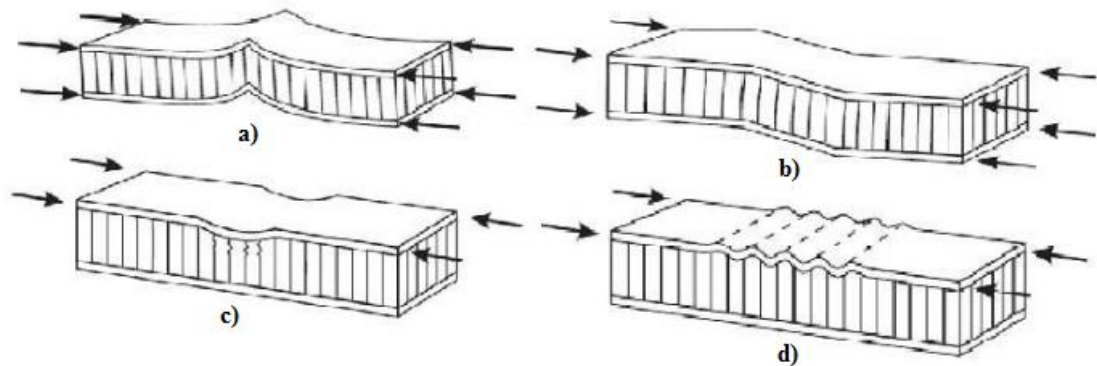
Kde F_{max} je maximální zatěžující síla [N], w je šířka zkušební vzorku (width) [mm] a t_f je tloušťka vnější krycí vrstvy (thickness face) [mm]



Obr. 42 Tlaková zkouška sendvičového panelu [8]

Při tlakové zkoušce dochází k více druhům porušení sendvičové konstrukce, jak znázorňuje Obr 43. Nejčastěji dochází ke ztrátě stability. Dále je možné setkat se s odloupenutím vnější krycí vrstvy a jádra sendvičové konstrukce nebo se zvlněním z důvodu

smykového zatížení. U sendvičových konstrukcí s voštinovým jádrem dochází ke zvrásnění vnějších krycích vrstev. [8]



Obr. 43 Typy porušení sendvičové konstrukce při tlakové zkoušce [5]

a) vzpěr, b) zvlnění, c) zvlnění vnější krycí vrstvy a zborcení jádra, d) zvlnění vnější krycí vrstvy

II. PRAKTICKÁ ČÁST

5 CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE

Praktická část diplomové práce se zabývá návrhem a výrobou kompozitních sendvičových panelů s pěnovým jádrem, které je vyztuženo polymerními žebry. Dále je zaměřena na testování mechanických vlastností a srovnání vlastností se sendvičovými panely bez vyztužení. Mechanické vlastnosti sendvičového panelu se budou zjišťovat pomocí tříbodové ohybové zkoušky a z tlakové zkoušky při působení bočního tlaku.

Mezi hlavní cíle této diplomové práce patří:

- Návrh vyztužení sendvičového panelu.
- Výroba sendvičových panelů a příprava zkušebních těles.
- Testování v tříbodovém ohybu.
- Testování panelů při působení bočního tlaku.
- Vyhodnocení a diskuze výsledků.

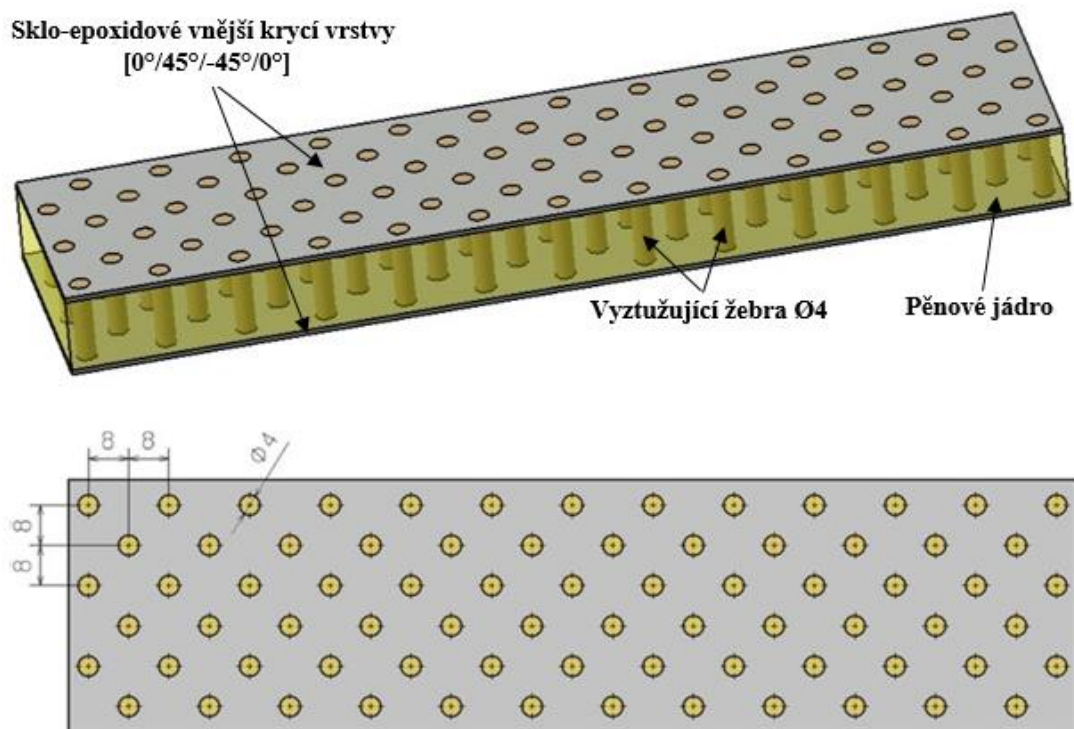
6 NÁVRH SENDVIČOVÝCH PANELŮ

Rozvržení vyztužujících žebér jádra sendvičového panelu bylo navrženo dvěma způsoby, označenými jako Návrh A a Návrh B. Další modifikace sendvičového panelu proběhla změnou průměru vyztužujících žebér, různými druhy materiálu jádra a také změnou tloušťky jádra sendvičové konstrukce.

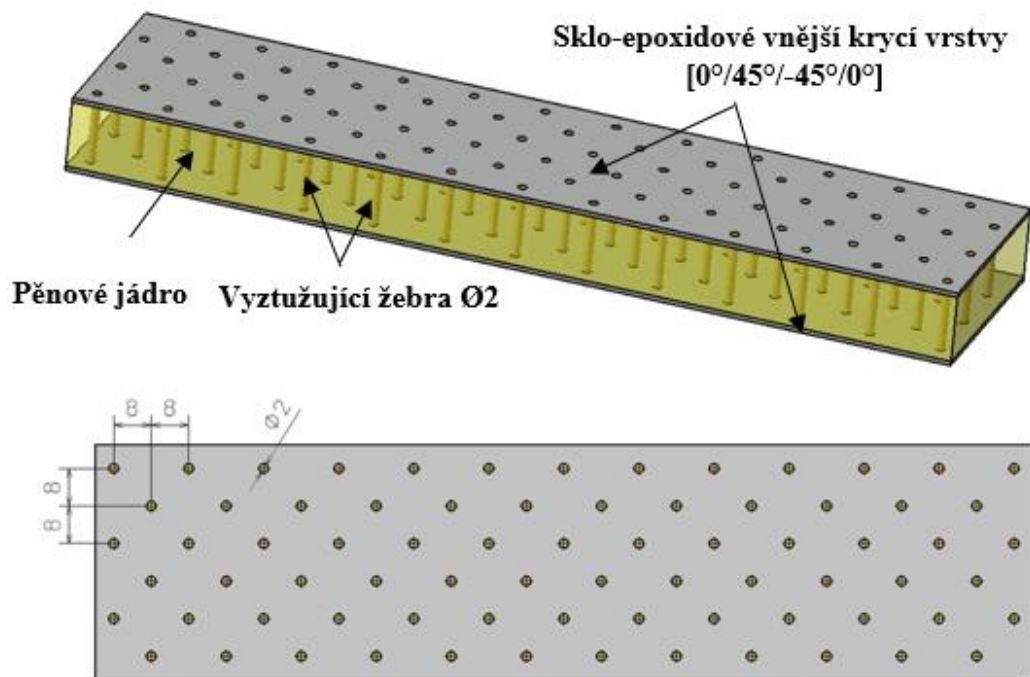
6.1 Rozvržení polymerních žebér

6.1.1 Návrh A (kosočtvercové rozložení)

V návrhu A je rozložení kosočtvercové, kde délka úhlopříčky kosočtverce je 16 mm. Průměr vyztužujících žebér byl zvolen 2 a 4 mm (Obr. 44 a Obr. 45).



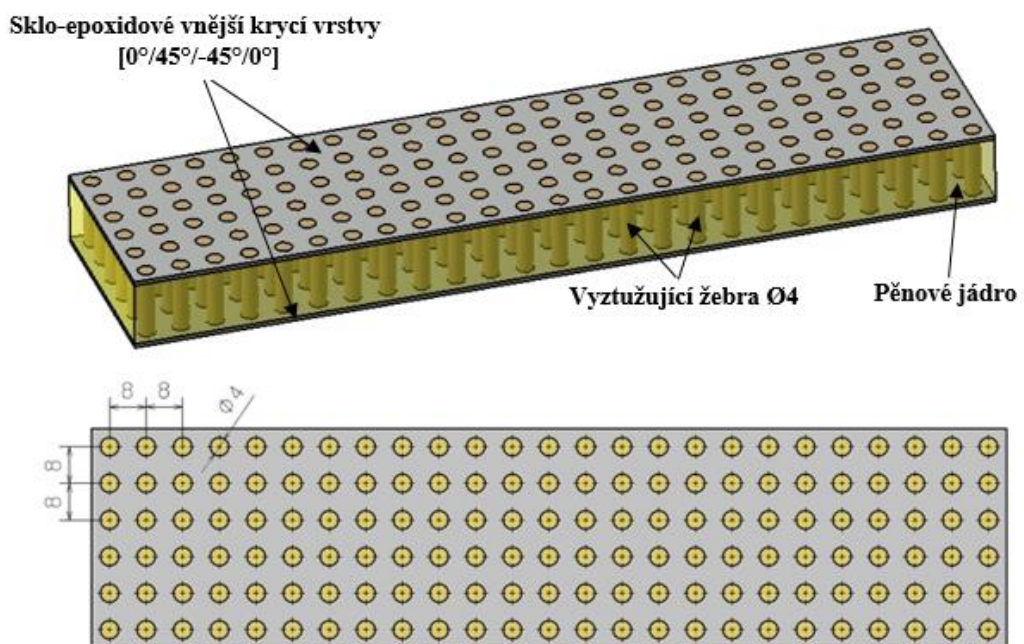
Obr. 44 Model rozložení návrhu A s průměrem vyztužujících žebér 4 mm



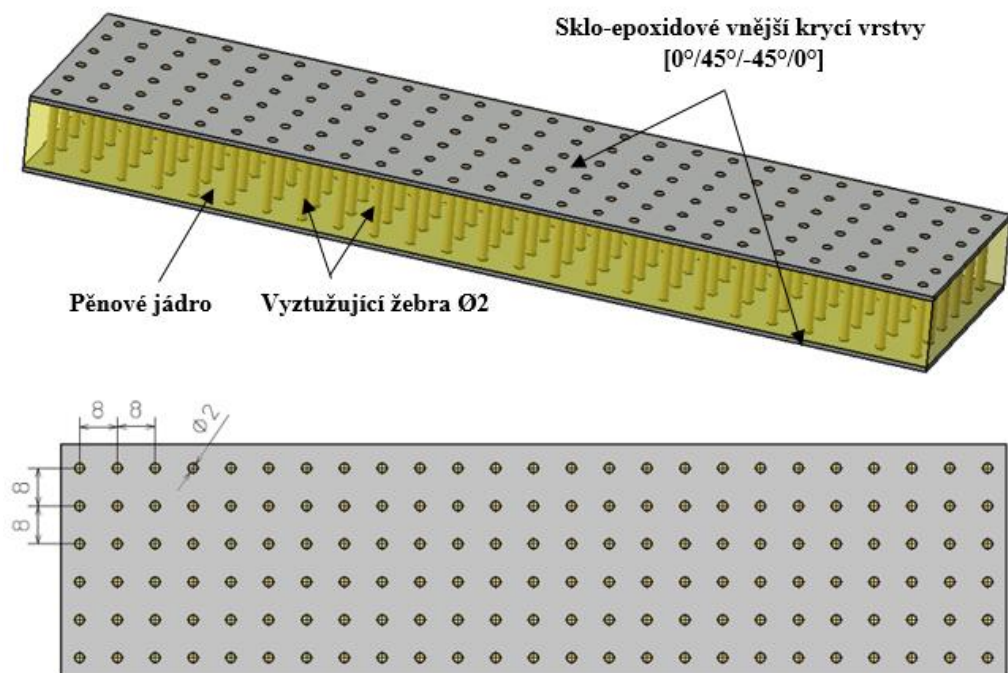
Obr. 45 Model rozložení návrhu A s průměrem vyztužujících žebor 2 mm

6.1.2 Návrh B (čtvercové rozložení)

Návrh B je tvořen rozložením tvaru čtverce s délkou strany 8 mm. Průměr vyztužujících žebor byl zvolen, stejně jako u návrhu A, 2 a 4 mm (Obr. 46 a Obr. 47).



Obr. 46 Model rozložení návrhu B s průměrem vyztužujících žebor 4 mm



Obr. 47 Model rozložení návrhu B s průměrem vyztužujících žebor 2 mm

Oba návrhy se od sebe liší jak svým rozložením, tak průměrným počtem vyztužujících žebor na jeden testovací vzorek. Počet vyztužujících žebor u návrhu B je přibližně dvojnásobný oproti návrhu A.

7 POPIS MATERIÁLOVÉHO SLOŽENÍ

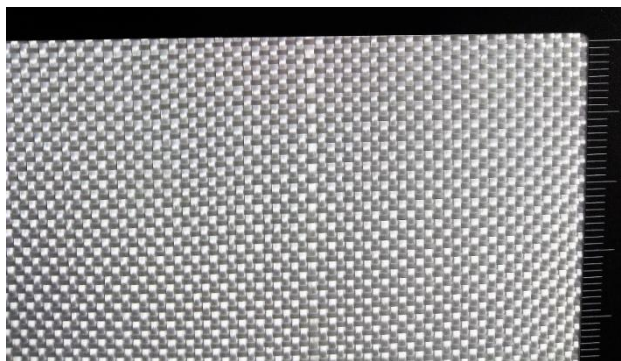
Kompozitní sendvičové panely se skládají ze tří materiálů, mezi které patří vyztužující vlákna, matrice a jádro sendvičové konstrukce.

7.1 Vyztužující vlákna

Vnější krycí vrstvy sendvičového panelu byly vyrobeny z kompozitního laminátu. Jako výztuž tohoto kompozitního laminátu byla použita tkanina skleněných vláken s plátňovou vazbou. Plátňo dodává firma Havel composites s značením Aeroglass.

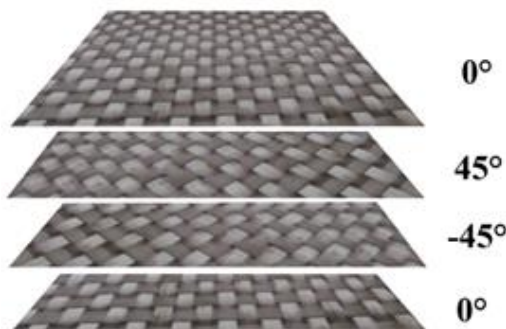
Tab. 1 Popis vyztužující tkaniny

Plošná hmotnost	200 g/m ² ± 15g
Vazba	plátňová
Šířka	100 cm ± 1 cm



Obr. 48 Vyztužující skleněná tkanina Aeroglass 200 g/m²

Na obě strany sendvičového panelu byly pro krycí potahy použity 4 vrstvy této výztuže. Složení laminátové vnější krycí vrstvy je zobrazeno na Obr. 49. Vnější krycí vrstva měla tloušťku přibližně 1 mm.



Obr. 49 Skladba kompozitní vnější krycí vrstvy

7.2 Matrice

Pro výrobu sendvičových panelů byly použity dva druhy pryskyřice, které slouží jako matrice kompozitních vnějších krycích vrstev a také jako vyztužující žebra pěnového jádra. První pryskyřice byla použita pro ruční laminování a druhá pro technologii vakuové infuze.

7.2.1 Biresin CR82 – pryskyřice pro ruční laminaci

Biresin CR82 je dvousložková epoxidová pryskyřice, která má nažloutlou transparentní barvu. Pro tuto pryskyřici se používá tužidlo Biresin CH80-1. Doba zpracovatelnosti je 50 minut. [Příloha I]

Tab. 2 Vlastnosti pryskyřice Biresin CR82 a tvrdidla Biresin CH80-1 [Příloha PI]

Vlastnosti	Jednotky	Biresin CR80	Biresin CH80-1
Viskozita (při 25 °C)	mPa . s	1600	50
Hustota (při 25 °C)	g/ml	1.11	1
Směšovací poměr v hm. dílech		100	27



Obr. 50 Pryskyřice Biresin CR82 a tvrdidlo CH80-1

7.2.2 Biresin CR80 – pryskyřice pro vakuovou infuzi

Tato pryskyřice je díky své viskozitě určena pro vakuové a vstřikovací procesy. Tvrdidlo pro tuto pryskyřici může být Biresin CH80-1 nebo Biresin CH80-2. Pro vyrábění sendvičové panely bylo použito tvrdidlo Biresin CH80-1. [Příloha PII]

Tab. 3 Vlastnosti pryskyřice Biresin CR 80 a tvrdidla Biresin CH80-1 [Příloha PII]

Vlastnosti	Jednotky	Biresin CR80	Biresin CH80-1
Vizkozita (při 25 °C)	mPa . s	900	50
Hustota (při 25 °C)	g/ml	1.13	1
Směšovací poměr v hm. dílech		100	30



Obr. 51 Tvrdidlo Biresin CH80-1 a pryskyřice Biresin CR80

7.3 Jádra sendvičových konstrukcí

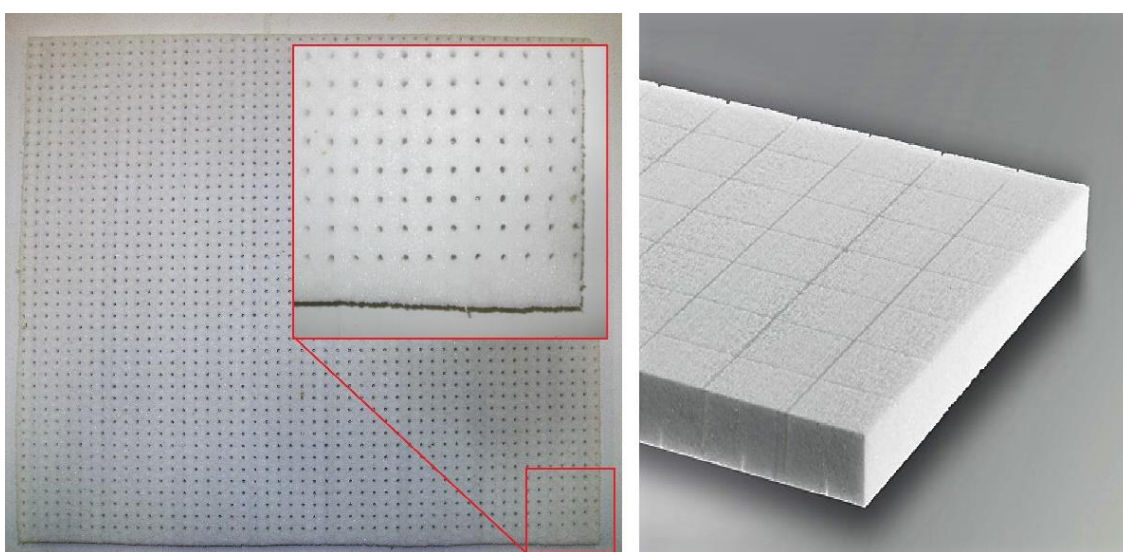
Jako jádra sendvičových konstrukcí byly zvoleny dva typy pěnových materiálů, a to konkrétně PET pěna (Airex T90.100) a PVC pěna (Airex C70.55).

7.3.1 Airex T90.100

Airex T90.100 je termoplastická polymerní PET pěna s uzavřenými buňkami. Má velmi dobré mechanické a únavové vlastnosti. Airex T90.100 je chemicky stabilní, má výbornou odolnost proti ohni a velmi malou nasákavost vlhkosti. Tato pěna je určena pro snadné použití se všemi pryskyřičnými systémy a pro všechny zpracovatelské technologie. Airex T90.100 je ideální jádrový materiál pro sendvičové konstrukce. Na zkušební vzorky byla použita pěna, která má tloušťku 10 mm. [Příloha PIII]

Tab. 4 Vlastnosti pěnového jádra Airex T90.100 [Příloha PIII]

Vlastnosti	Jednotky	Hodnoty
Hustota	Kg/m ³	110
Pevnost v tlaku	MPa	1.4
Modul pružnosti v tlaku	MPa	85
Pevnost v tahu	MPa	2.2
Modul pružnosti v tahu	MPa	120
Smyková pevnost	MPa	0.8
Modul pružnosti ve smyku	MPa	20



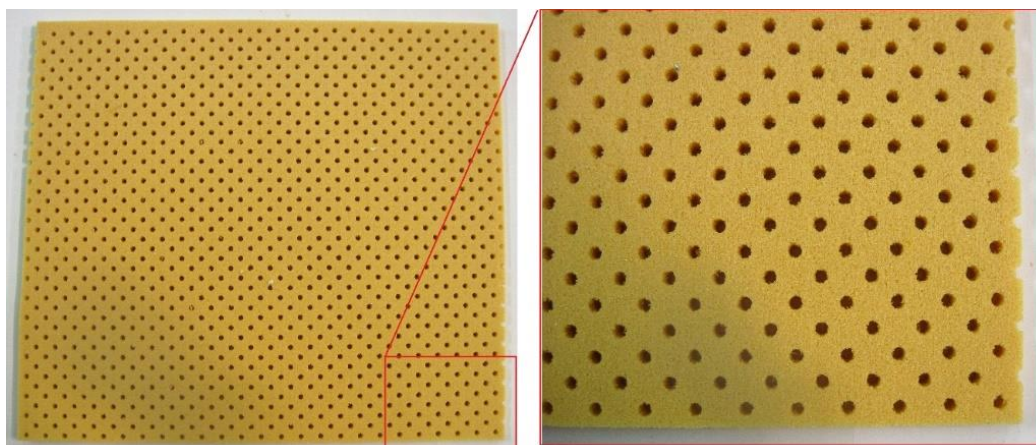
Obr. 52 Pěnové jádro Airex T90.100

7.3.2 Airex C70.55

Airex C70.55 je polymerní PVC pěna s uzavřenými buňkami, která kombinuje příznivý poměr pevnosti ku hmotnosti s vysokou tuhostí. Nedrobí se, má zanedbatelnou nasákavost vody a vykazuje výbornou chemickou odolnost. Je kompatibilní s většinou pryskyřic a s běžnými zpracovatelskými postupy. Díky jemné buněčné struktuře nabízí vynikající povrch pro lepení, což je vhodné zejména pro použití na jádro pro sendvičové konstrukce. Na zkušební vzorky byly použity tloušťky pěny 10 mm a 15 mm. [Příloha PIV]

Tab. 5 Vlastnosti pěnového jádra Airex C70.55 [Příloha PIV]

Vlastnosti	Jednotky	Hodnoty
Hustota	Kg/m ³	60
Pevnost v tlaku	MPa	0.9
Modul pružnosti v tlaku	MPa	69
Pevnost v tahu	MPa	1.3
Modul pružnosti v tahu	MPa	45
Smyková pevnost	MPa	0.85
Modul pružnosti ve smyku	MPa	22



Obr. 53 Pěnové jádro Airex C70.55

7.4 Modifikace sendvičových konstrukcí

Jak je již výše zmíněno, bylo vyrobeno několik modifikací sendvičové konstrukce. Byly použity dva materiály pro jádra sendvičových konstrukcí, dva způsoby rozložení a dva průměry vyztužujících žeber. Kombinací těchto modifikací bylo vyrobeno celkem 15 druhů sendvičových panelů, které jsou popsány v Tab. 6. Dále byl vyroben jeden sendvičový panel, jehož jádro je prořito skleněným vláknem.

Tab. 6 Modifikace vyztužených sendvičových konstrukcí

Označení	Náhled	Materiál	Tloušťka	Vyztužující žebra	
				Rozložení	Průměr
PVC x 10		C55.70	10 mm	Bez vyztužujících žeber	
PVC x 10 x A2		C55.70	10 mm	kosočtvercové	2 mm
PVC x 10 x B2		C55.70	10 mm	čtvercové	2 mm
PVC x 10 x A4		C55.70	10 mm	kosočtvercové	4 mm
PVC x 10 x B4		C55.70	10 mm	Čtvercové	4 mm
PET x 10		T90.100	10 mm	Bez vyztužujících žeber	
PET x 10 x A2		T90.100	10 mm	kosočtvercové	2 mm
PET x 10 x B2		T90.100	10 mm	Čtvercové	2 mm
PET x 10 x A4		T90.100	10 mm	kosočtvercové	4 mm
PET x 10 x B4		T90.100	10 mm	Čtvercové	4 mm
PVC x 15		C55.70	15 mm	Bez vyztužujících žeber	
PVC x 15 x A2		C55.70	15 mm	kosočtvercové	2 mm
PVC x 15 x B2		C55.70	15 mm	Čtvercové	2 mm
PVC x 15 x A4		C55.70	15 mm	Kosočtvercové	4 mm
PVC x 15 x B4		C55.70	15 mm	Čtvercové	4 mm

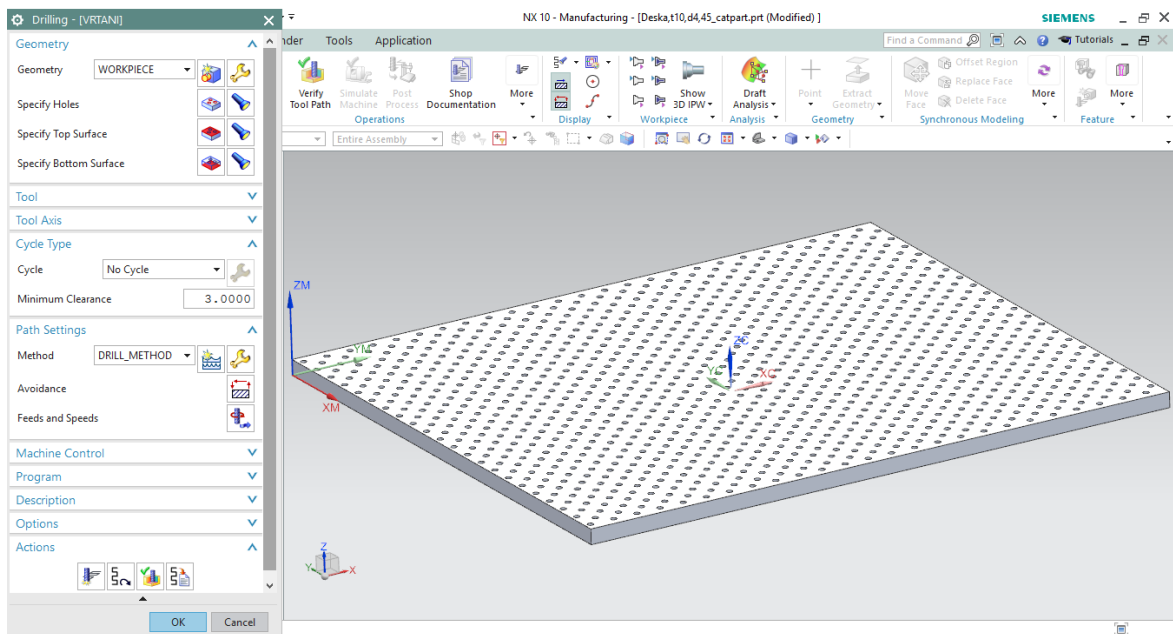
8 VÝROBA SENDVIČOVÉ KONSTRUKCE VYZTUŽENÉ POLYMERNÍMI ŽEBRY

8.1 Příprava pěnového jádra

Přípravou pěnového jádra se rozumí zhotovení otvorů, ve kterých jsou umístěny vyztužující žebra sendvičové konstrukce. Výroba těchto otvorů byla prováděna na tříosé frézce AZK HWT C-442.

8.1.1 Příprava programu pro vrtání

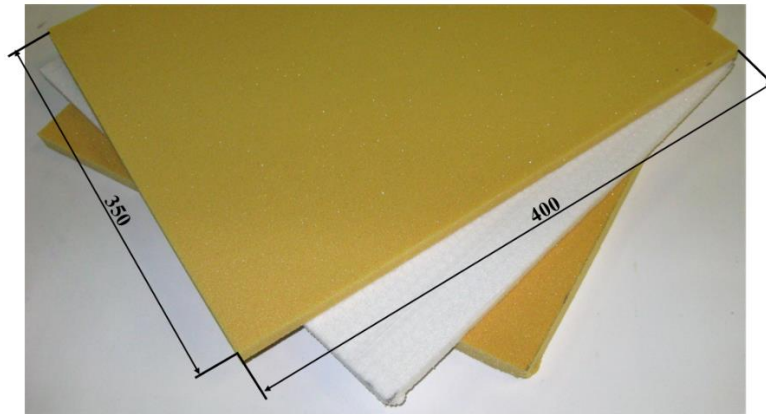
Nejdříve byly zhotoveny modely všech modifikací pěnového jádra sendvičové konstrukce v programu Catia V5R19. V dalším kroku se tyto modely využily k přípravě CNC programu pro CNC tříosou frézku. Na přípravu těchto CNC programů byl využit program NX 10.0. Tvorba CNC programu je zobrazena na Obr. 54.



Obr. 54 Tvorba CNC programu

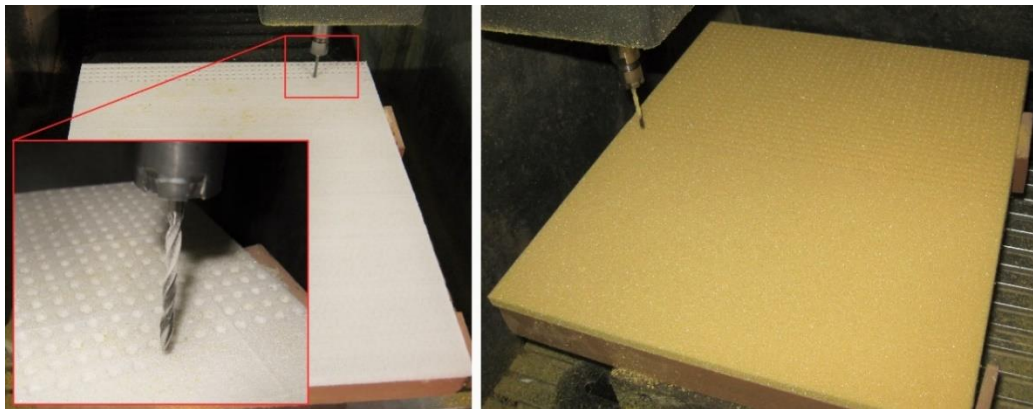
8.1.2 Vrtání otvorů pro vyztužující žebra

Vrtání otvorů probíhalo na CNC frézce AZK HWT C-442, která má tři řízené osy. Nejprve byly připraveny polotovary pěnového jádra, jež byly nařezány na rozměr 400x350 mm.



Obr. 55 Nařezané polotovary pěnového jádra

Na pracovní desku CNC frézky byly polotovary pěnového jádra připevněny pomocí oboustranné pásky.



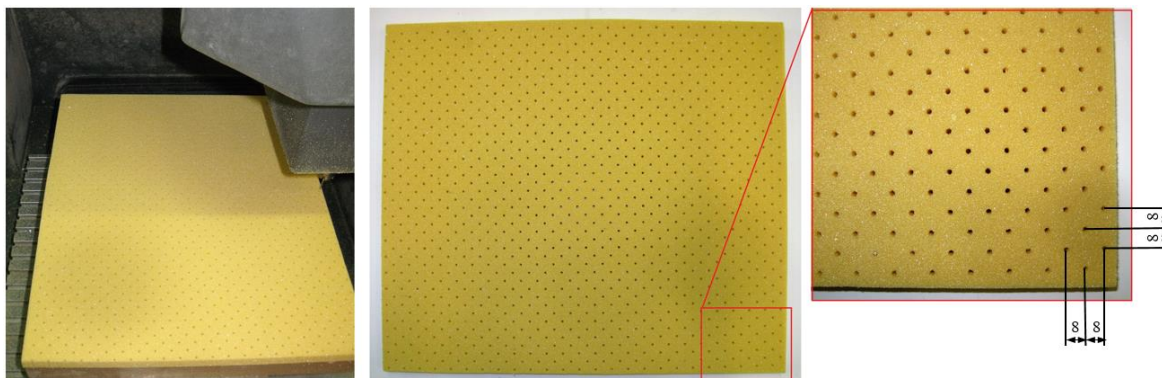
Obr. 56 Výroba otvorů pro vyztužující žebra v pěnovém jádru sendvičové konstrukce



Obr. 57 Pěnové jádra s připravenými otvory pro vyztužující žebra

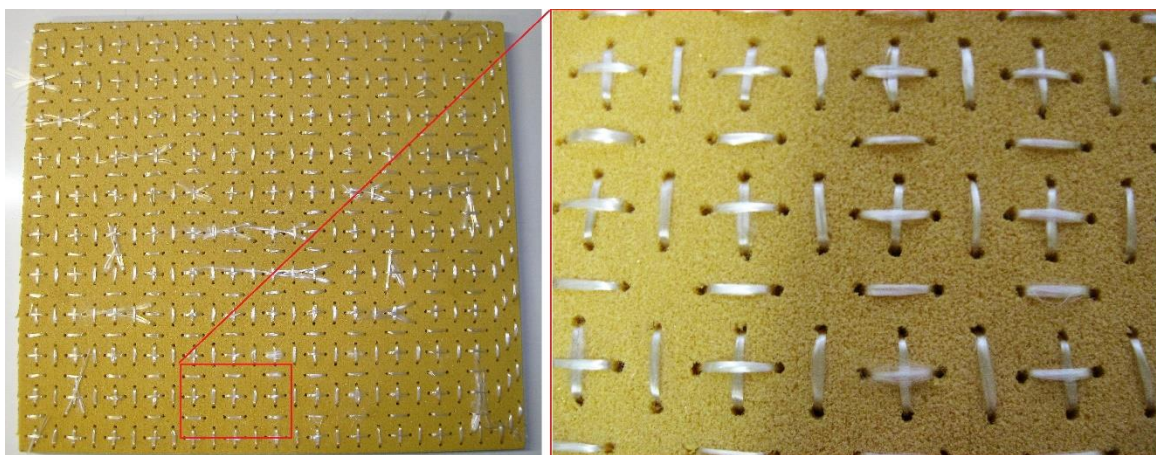
8.1.3 Prošívání pěnového jádra vyztužujícími vlákny

Tento způsob vyztužení jádra sendvičového panelu byl proveden pouze u jedné modifikace z dosud uvedených sendvičových konstrukcí a to z důvodu náročného ručního prošívání pěnového jádra. Bylo vybráno pěnové jádro materiálu Airex C70.55 s tloušťkou 15 mm, do kterého byly vyrobeny otvory průměru 2 mm s výše uvedeným kosočtvercovým rozložením (návrh A).



Obr. 58 Připravené pěnové jádro pro prošívání skleněným vláknem

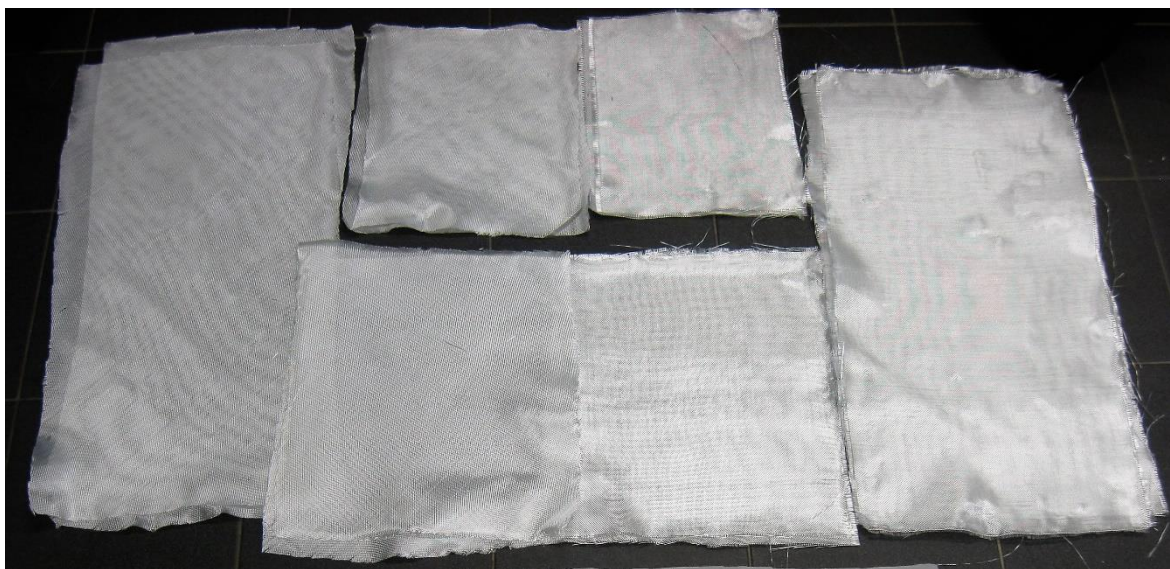
Poté bylo pěnové jádro ručně, pomocí jehly, prošíváno rovingem skleněného vlákna přes každý vytvořený otvor. Takto vytvořené jádro sendvičové konstrukce bylo dále zpracováno, stejně jako ostatní vyztužené sendvičové panely, a to vakuovou infuzí.



Obr. 59 Prošité pěnové jádro skleněným vláknem

8.2 Výroba vzorků ruční laminací

Aby bylo možné porovnat vyztužené sendvičové konstrukce, bylo zapotřebí vyrobit sendvičové konstrukce bez vyztužení. Vzorky sendvičových konstrukcí bez vyztužení byly vyrobeny technologií ruční laminace. Nejprve byly nastříhány jednotlivé vrstvy výztuže pro kompozitové vnější krycí vrstvy sendvičových konstrukcí.



Obr. 60 Připravené vrstvy skleněné tkaniny

Po nastříhání výztuže bylo zapotřebí připravit formu. Příprava formy zahrnuje důkladné očištění a naseparování. Separace formy byla provedena pomocí separačního základového vosku a separátoru PVA. Separací základového vosku byly nanесeny dvě vrstvy a třetí vrstvu, která byla finální, tvořil separátor PVA. Následně byla připravena matrice, jejíž množství je závislé na hmotnosti vyztužujícího vlákna. Matrici tvořila pryskyřice a tvrdidlo, v poměru hmotnostních dílů 100:27. Samotná pryskyřice byla nanášena na jednotlivé vrstvy výztuže ručně, pomocí válečku. Pro lepší vlastnosti byly zalaminované vzorky, podobně jako u vakuové infuze, stlačeny vakuovou folií. Pro snazší odformování bylo potřeba vzorky opatřit vrstvou odtrhové tkaniny a odsávací rohože.



Obr. 61 Zavakuovaný sendvičový panel pod pružnou fólií po ruční laminaci

8.3 Výroba vzorků vakuovou infuzí

8.3.1 Pomocné materiály pro vakuovou infuzi

Při technologii vakuové infuze je třeba použít řadu pomocných materiálů. Tyto materiály nejsou po dokončení výroby znova použitelné a stává se z nich odpad. Mezi pomocné materiály se řadí:

❖ *Odtrhová tkanina*

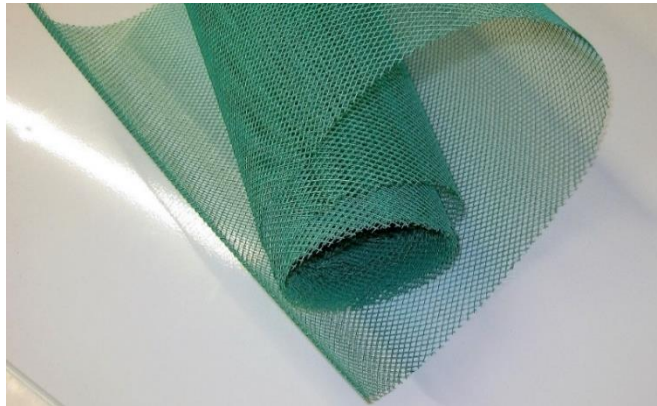
Odtrhová tkanina se klade přímo na připravenou výztuž. Díky ní lze snadněji vytlačit bubliny a dopomáhá tak lepšímu spojení jednotlivých vrstev výztuže. Na tuto tkaninu se kladou další pomocné materiály. Po vytvrzení matrice pomáhá odtrhová tkanina k oddělení všech pomocných materiálů od výztuže. Tkanina má na sobě červený proužek, který ji umožňuje snáze identifikovat na výrobku.



Obr. 62 Odtrhová tkanina

❖ *Distribuční síťka*

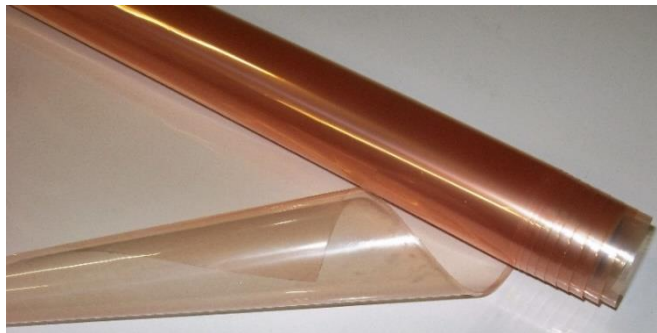
Distribuční síťka je navržena tak, aby podporovala při vakuové infuzi lepší a rychlejší tok pryskyřice. Obvykle se distribuční síťky používá jedna vrstva. Vyžaduje-li se však větší průtok pryskyřice, může se použít několika vrstev distribuční síťky. Po vytvrzení nelze distribuční síťku opakovaně použít a stává se z ní odpad.



Obr. 63 Distribuční síťka

❖ *Vakuová fólie*

Vakuová fólie slouží k uzavření formy a rovnoměrnému rozložení tlaků na povrch kompozitní struktury. Vakuová fólie je průhledná, flexibilní, odolná proti roztržení a chemicky odolná vůči matrici. Tato fólie se vyrábí většinou z PE nebo PA.



Obr. 64 Vakuová fólie

❖ *Těsnící páska*

Je to oboustranná páska sloužící jako těsnící a spojovací materiál mezi formou a vakuovou fólií. Těsnící pásky se liší podle teploty použití.

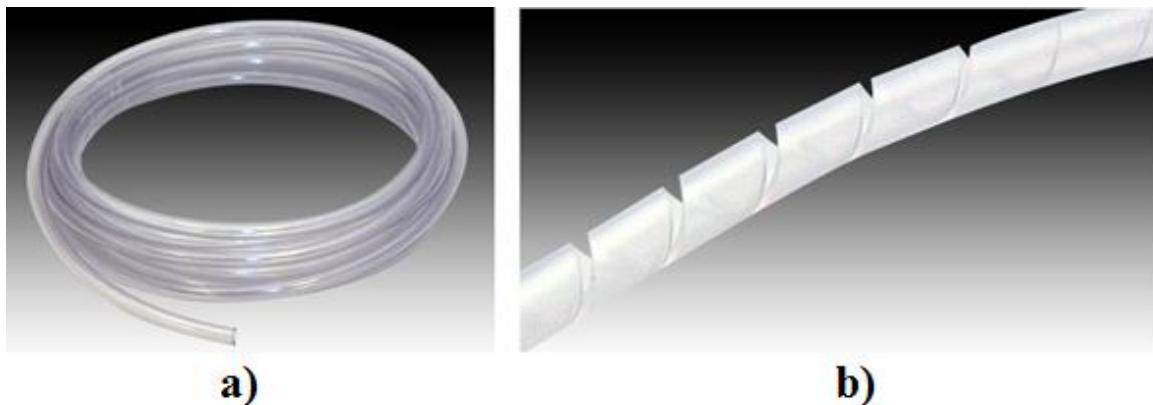


Obr. 65 Těsnící páska

❖ *Hadice pro dopravu matrice*

Hadice slouží pro přívod matrice a také pro odvod přebytečné matrice a vzduchu z prostoru formy. Nejčastěji se vyrábí z PE. Při vakuové infuzi se používají dva druhy hadic:

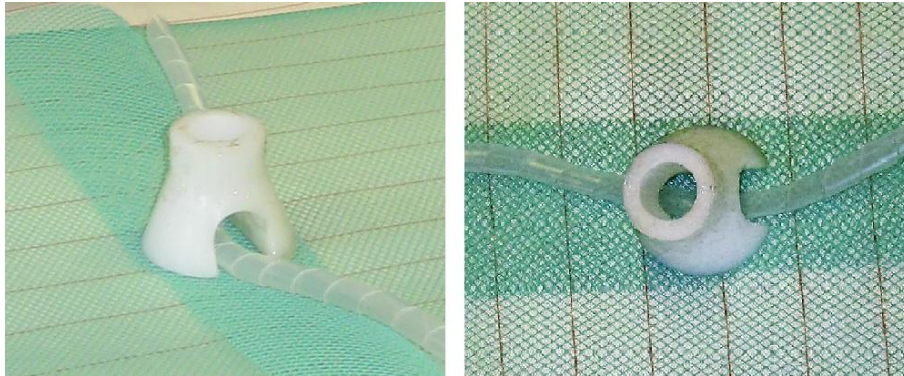
- a) Slouží k dopravě matrice a odvodu vzduchu
- b) Slouží pro rozvod matrice do špatně přístupných míst a k odvodu přebytečné matrice. Tyto hadice mají spirálový tvar.



Obr. 66 a) Hadice pro přívod matrice, b) spirálová hadice

❖ *Konektor RIC (Resin infusion connector)*

Konektor RIC slouží jako vtokové ústí do formy. Slouží k propojení formy a přívodní hadice.



Obr. 67 Konektor RIC

❖ *Rezervoár matrice*

Rezervoár je umístěn mezi formu a vývěvu. Nádoba slouží pro zachycení přebytečné matrice a zabraňuje tak vniku matrice do vývěvy.



Obr. 68 Rezervoár matrice

❖ Vakuová vývěva

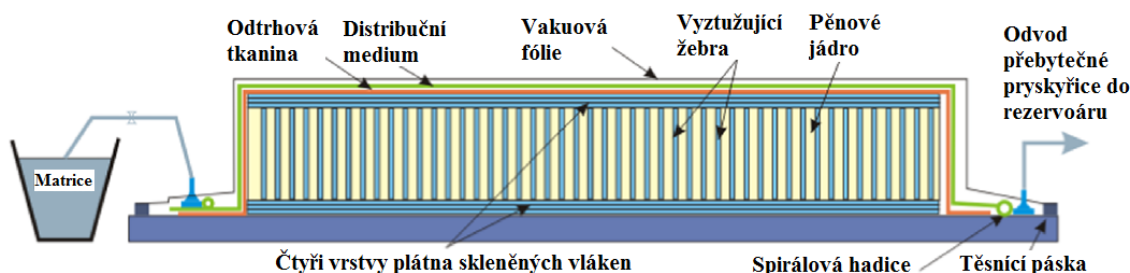
Vývěva zajišťuje vakuum v prostorách formy a čerpá matrici ze zásobníku do vývěvy.



Obr. 69 Vakuová vývěva

8.3.2 Výroba testovacích vzorků

Pro výrobu sendvičových konstrukcí vyztužených polymerními žebry byla vybrána technologie vakuová infuze. Vakuová infuze je velmi vhodná pro sendvičové konstrukce s pěnovým jádrem. V tomto případě se vakuová infuze s výhodou použila pro výrobu vyztužujících polymerních žeber.



Obr. 70 Princip výroby sendvičové konstrukce s vyztuženým pěnovým jádrem [43]

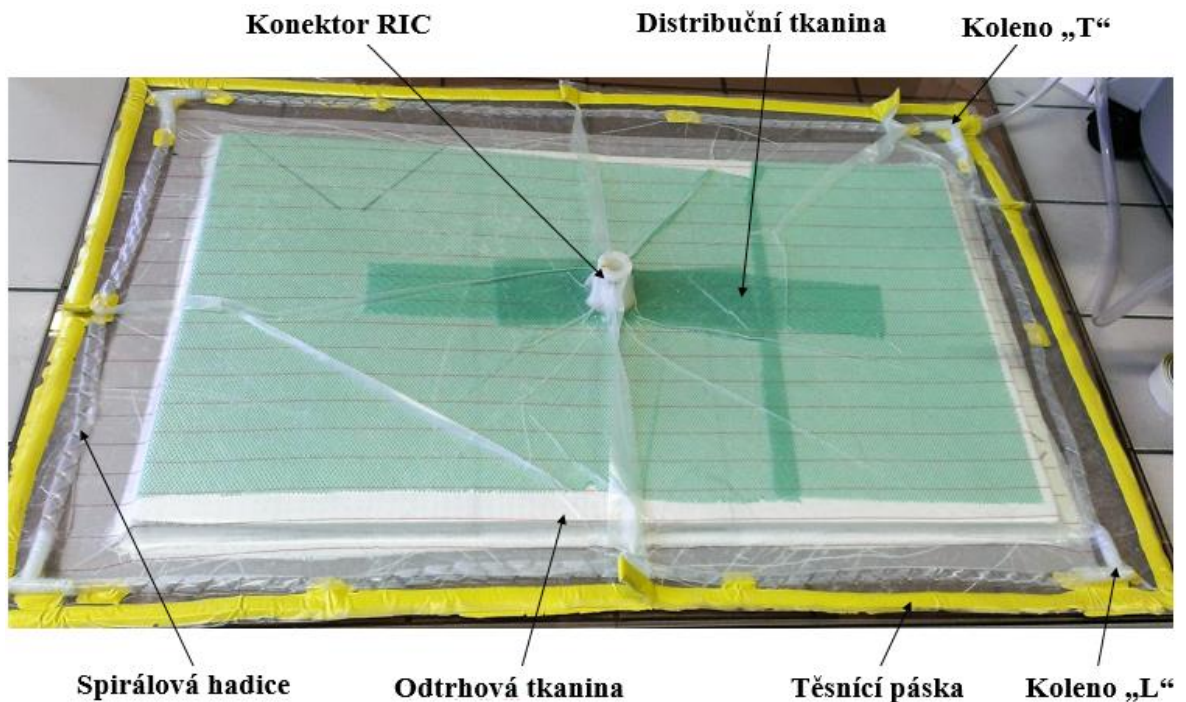
Příprava technologie vakuové infuze začíná, podobně jako většina technologií výroby kompozitů, očištěním a naseparováním formy. Naseparování formy bylo zajištěno dvěma vrstvy separačního základového vosku a jednou vrstvou separátoru PVA. Poté byly nastříhány všechny vrstvy vyztužující skelné tkaniny na požadovaný rozměr. V tomto případě se vrstvy stříhaly na rozměr jádra sendvičové konstrukce. Následovalo zvážení vyztužující tkaniny, pro přípravu matrice. Množství matrice se určovalo velmi obtížně,

jelikož matrice tvořila i vyztužující žebra sendvičové konstrukce. Pryskyřice a tvrdidlo bylo namícháno v poměru 100:30 hmotnostních dílů. Na naseparovanou formu byly položeny všechny vrstvy výztuže kompozitních vnějších krycích vrstev a také pěnové jádro s připravenými otvory pro polymerní žebra.



Obr. 71 Naskládané vrstvy sendvičové konstrukce

Následně byly kladeny další vrstvy pomocných materiálů pro vakuovou infuzi. První pomocnou vrstvou byla odtrhová tkanina, která se klade přímo na připravenou výztuž. Na tuto odtrhovou tkaninu byla položena distribuční síťka, pro lepší tok pryskyřice. Na distribuční síťku se umístil konektor RIC pro spojení formy a přívodem pryskyřice a také část spirálové hadice, která podporovala lepší tok matrice.

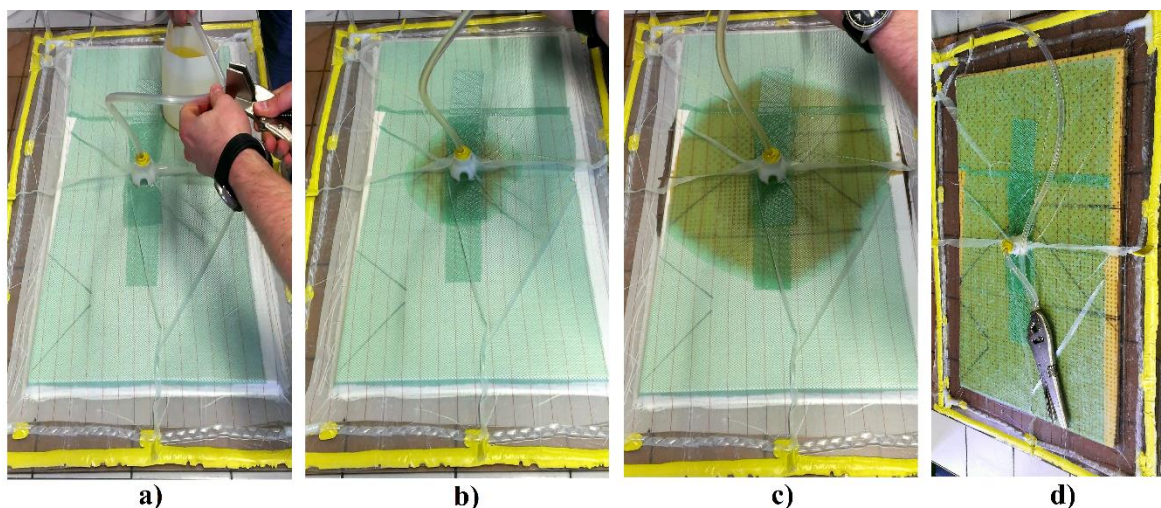


Obr. 72 Slisovaná sendvičová konstrukce připravená pro vakuovou infuzi

Spirálová hadice byla také pomocí těsnící pásky umístěna po celém obvodu připravených vrstev. V rozích byla tato hadice spojena pomocí kolena tvaru „L“ a pro napojení hadice do rezervoáru bylo použito koleno tvaru „T“. Spirálová hadice měla za úkol odvod přebytečné pryskyřice z prostoru formy.

Celá tato konstrukce byla poté překryta vakuovou fólií. Rozměr vakuové fólie musel být větší než všechny vrstvy připravené k vakuové infuzi, aby fólie překryla všechny vrstvy a zůstala nenapnutá. Fólie byla připevněna pevně k formě pomocí pásky.

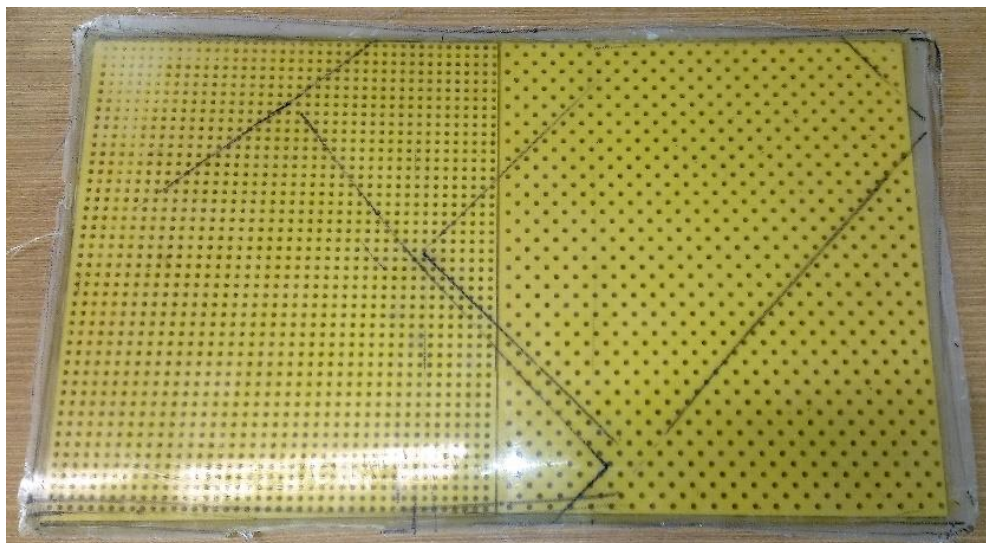
Po dokonalém utěsnění vytvořila vývěva podtlak a vakuová folie stlačila všechny nakladené vrstvy. Hadice pro přívod matrice, která byla do této chvíle pro zajištění podtlaku sepnuta kleštěmi, byla vložena do nádoby s připravenou matricí. Samotná výroba začínala odstraněním kleští z přívodní hadice. Pomocí podtlaku nastal proces infuze, pryskyřice byla dopravována do formy a impregnovala suchou výztuž.



Obr. 73 Průběh vakuové infuze

- a) Odstranění kleští z nasávací hadice, b) Začátek prosycování výztuže matricí,
c) Prosycování výztuže matricí, d) Prosycený sendvičový panel připraven k vytvrzování*

Takto vyrobený sendvičový panel byl vytvrzen při pokojové teplotě za dobu 24 hodin. Po uplynutí vytvrzovací doby byl vzorek sendvičové konstrukce odformován.

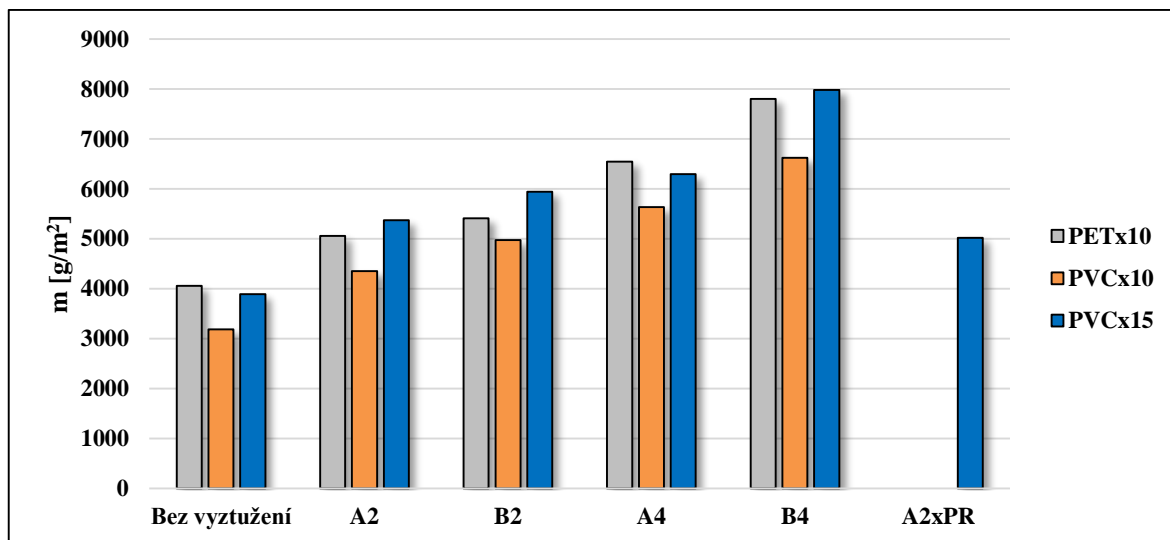


Obr. 74 Vyrobený sendvičový panel

Vyrobené sendvičové panely byly zváženy, a jejich hmotnost byla pro snadnější porovnání přepočítána na plochu 1 m². Jednotlivé hmotnosti sendvičových panelů jsou uvedeny v následující Tab. 7. Z naměřených hodnot hmotnosti je zřejmé, že největší nárůst hmotnosti vykazují sendvičové panely, které měly průměr vyztužujících žeber 4 mm a čtvercové rozložení. U těchto sendvičových panelů je dvojnásobný nárůst hmotnosti ve srovnání s nevyztuženými sendvičovými panely. Sloupcový graf (Obr. 75) graficky interpretuje zvyšující se jednotlivé hmotnosti všech druhů sendvičových konstrukcí.

Tab. 7 Hmotnost vyrobených sendvičových konstrukcí - m [g/m²]

Hmotnost sendvičových panelů m [g/m ²]								
Označení	\bar{x}	[%]	Označení	\bar{x}	[%]	Označení	\bar{x}	[%]
PETx10	4057	-	PVCx10	3185	-	PVCx15	3890	-
PETx10xA2	5058	28,7	PVCx10xA2	4353	36,7	PVCx15xA2xPR	5024	29,1
PETx10xB2	5411	33,4	PVCx10xB2	4973	56,1	PVCx15xA2	5374	38,2
PETx10xA4	6548	61,4	PVCx10xA4	5637	77,0	PVCx15xB2	5942	52,8
PETx10xB4	7804	92,4	PVCx10xB4	6622	107,9	PVCx15xA4	6300	62,0
						PVCx15xB4	7980	105,1



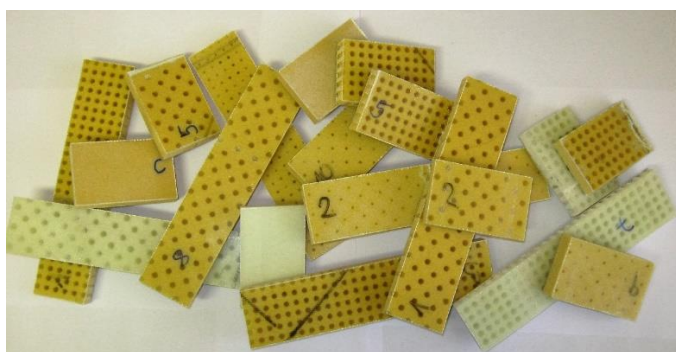
Obr. 75 Grafická interpretace hmotnosti vyrobených sendvičových panelů

8.4 Řezání vzorků

Vyrobené sendvičové panely byly nařezány na požadované rozměry pro jednotlivé zkoušky. Na povrch sendvičové konstrukce byly narýsovány jednotlivé zkušební tělesa. Řezání probíhalo na stolní řezačce Scheppach HS80 pomocí kotouče vhodného na řezání sendvičových materiálů.



Obr. 76 Řezání sendvičových konstrukcí na testovací vzorky



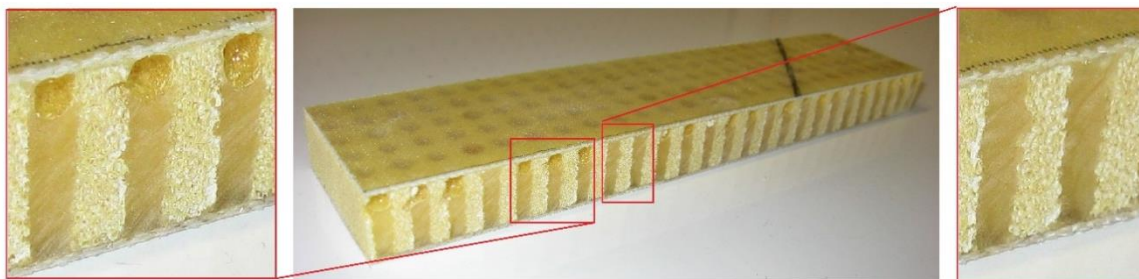
Obr. 77 Vyrobené testovací vzorky

8.5 Vady vzniklé na zkušebních tělesech

Při výrobě vznikly na sendvičových panelech určité nedostatky, které odchyľují vyrobené vzorky od ideální sendvičové konstrukce. Tyto nedostatky mohou mít vliv na výsledné vlastnosti sendvičové konstrukce vyztužené polymerními žebry.

8.5.1 Uzavřený vzduch v místě polymerního žebra

V některých místech, kde v ideálním stavu dochází ke spojení polymerního žebra a vnější krycí vrstvy sendvičové konstrukce, došlo k uzavření vzduchu. Tento uzavřený vzduch měl za následek nedokonalé vyplnění otvoru matricí pro vyztužující žebro. Tento jev, tak zabraňoval ideálnímu spoji mezi žebrem a vnější krycí vrstvou. Detailní pohled je zobrazen na Obr. 78. Důvodem této vady mohla být málo výkonná vývěva.



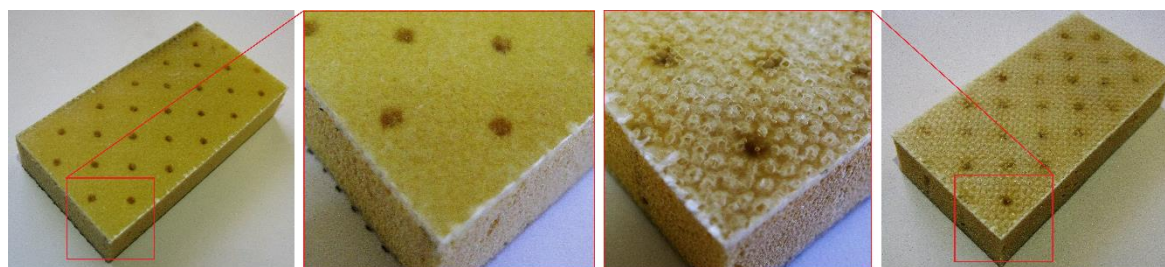
Žebro s uzavřeným vzduchem

Ideální žebro

Obr. 78 Uzavřený vzduch v místě polymerního žebra

8.5.2 Nedokonalé prosycení výztuže matricí

Při výrobě vyztuženého sendvičového panelu s pěnovým jádrem prošívaným skelným vláknem došlo k nedokonalému prosycení výztuže kompozitních vnějších krycích vrstev, zejména v rohových oblastech. Tato vada mohla být způsobena nedokonalým utěsněním při vakuové infuzi a dá se očekávat, že bude mít vliv konečné vlastnosti sendvičové konstrukce.



Ideální prosycení

Nedokonalé prosycení

Obr. 79 Špatně prosycená vnější krycí vrstva

9 POPIS STATISTICKÝCH VELIČIN

Následující statistické veličiny byly použity k vyhodnocení a popisu experimentálně naměřených dat:

- ❖ \bar{x} - **aritmetický průměr** – vznikne součtem hodnot statistického souboru dělených jejich počtem [55]

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

- ❖ s^2 – **rozptyl** – je součet kvadratických odchylek od průměru, dělených rozsahem statistického souboru [55]

$$s_x^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$$

- ❖ s – **směrodatná odchylka** – druhá odmocnina z rozptylu [55]

$$s_x = \sqrt{s_x^2}$$

- ❖ **MIN** – minimální hodnota
- ❖ **MAX** – maximální hodnota
- ❖ **MED** – Medián – je prostřední hodnota v uspořádaném statistickém souboru a to prostřední v pořadí hodnot uspořádaných podle velikosti, při sudém počtu hodnot je medián průměr dvou prostředních hodnot [55]

10 TESTOVÁNÍ VLASTNOSTÍ VYZTUŽENÉ SENDVIČOVÉ KONSTRUKCE

Sendvičové konstrukce byly podrobeny ohybové zkoušce a tlakové zkoušce při působení bočního tlaku. Obě tyto zkoušky byly provedeny na univerzálním zkušebním stroji ZWICK 1456, jehož technické parametry jsou uvedeny v Tab. 8. Měření dat bylo prováděno softwarově v programu TestExpert. Zkouška probíhala při pokojové teplotě.

Tab. 8 Technické parametry univerzálního zkušebního stroje ZWICK 1456

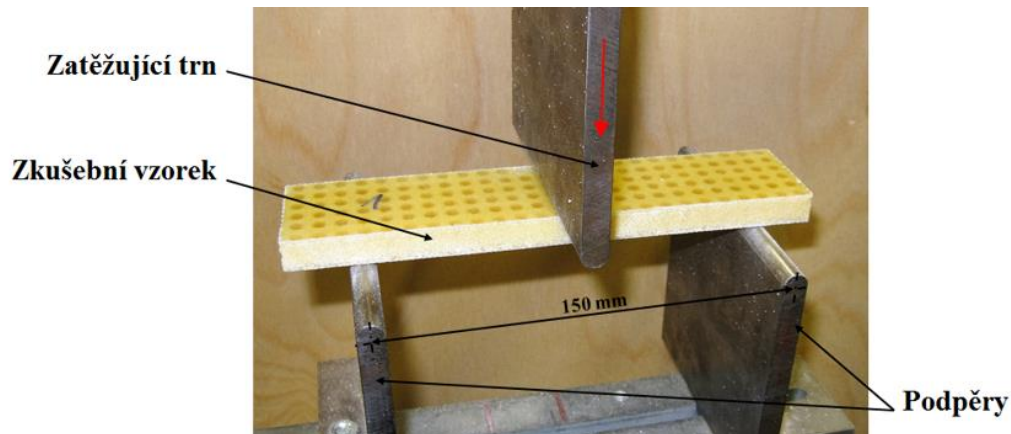
Maximální posuv příčnicku	800 mm/min
Snímače síly	2,5 a 20 kN
Teplotní komora	-80/+250 °C
TestExpert software	Tah/Ohyb/Tlak



Obr. 80 Univerzální zkušební stroj ZWICK 1456

10.1 Tříbodová ohybová zkouška

Tříbodová ohybová zkouška sendvičových nosníků probíhala dle americké normy ATSM C393/C393M-11 a schéma této zkoušky je zobrazeno na Obr. 81. Zkušební tělesa měla velikost 210 x 45 mm a tloušťka se měnila v závislosti na druhu sendvičové konstrukce. Vzdálenost podpěr, na kterých byl testovaný vzorek uložen, byla 150 mm a uprostřed působila zatěžující síla. Rychlost přičnicku byla dle doporučení normy zvolena 5 mm/min.



Obr. 81 Schéma tříbodové ohybové zkoušky

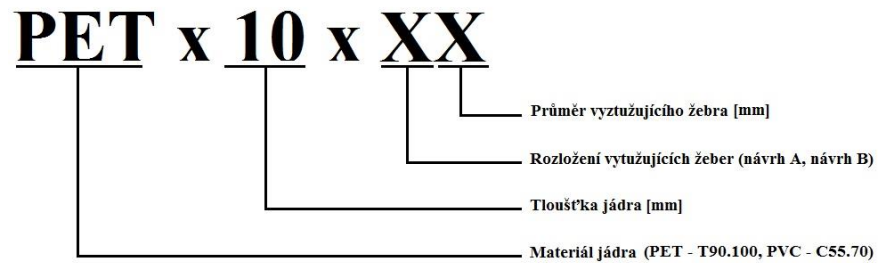
Pro každý druh sendvičové konstrukce bylo testováno 10 vzorků ($n = 10$). Během zkoušky ohybem se zaznamenávaly vzniklé poruchy sendvičové konstrukce.

Pro porovnání změn mechanických vlastností byly z programu ExperTest zjištěny následující materiálové charakteristiky:

- Efektivní modul pružnosti E [MPa] – zkouškou stanovený modul pružnosti. Čím vyšší je tento modul, tím méně a neochotněji se materiál deformuje (má vyšší tuhost)
- Mez pevnosti v ohybu σ [MPa] – Napětí, při jehož dosažení dojde k trvalému porušení materiálu
- Únosnost v ohybu F [N] – Maximální síla, které během ohybové zkoušky odolává zkušební těleso a kdy po jejím překročení dojde k některému typu porušení.

10.1.1 Třibodová ohybová zkouška sendvičových konstrukcí s pěnovým jádrem Airex T90.100/10 mm

Označení sendvičových konstrukcí s pěnovým jádrem Airex T90.100/10 mm:



*Obr. 82 Třibodová ohybová zkouška sendvičové konstrukce
s pěnovým jádrem Airex T90.100/10 mm*

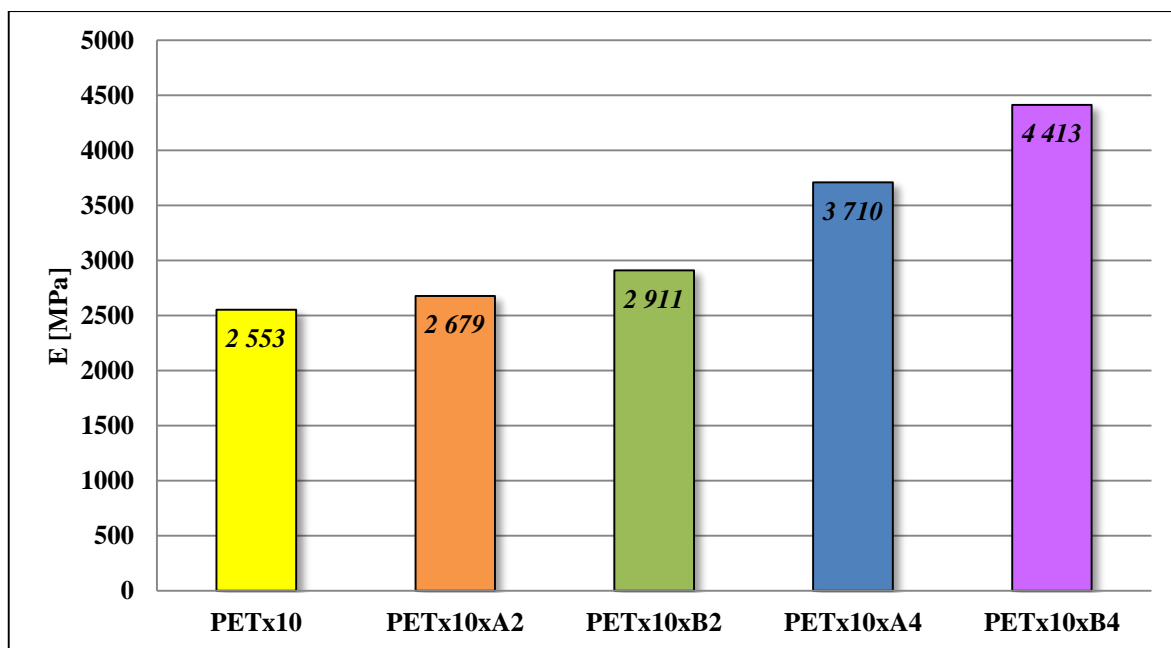
V následujících tabulkách (Tab. 9 – Tab. 11) jsou uvedeny statisticky vyhodnocená data jednotlivých druhů sendvičových panelů s pěnovým jádrem Airex T90.100/10 mm ze třibodové ohybové zkoušky.

❖ **Efektivní modul pružnosti v ohybu sendvičových panelů s pěnovým jádrem Airex T90.100/10 mm**

V Tab. 9 jsou uvedeny statisticky vyhodnocená data pro efektivní modul pružnosti sendvičových konstrukcí s pěnovým jádrem Airex T90.100/10 mm. Jak je z tabulky patrné, tak efektivní modul pružnosti vzrostl z hodnoty 2553 MPa, kterou vykazoval sendvičový panel s označením PETx10, až na 4413 MPa, což bylo naměřeno u sendvičové konstrukce s označením PETx10xB4. V tomto případě se efektivní modul pružnosti zvýšil o 73 %. Sloupcový graf (Obr. 83) graficky interpretuje zvyšující se efektivní modul pružnosti v závislosti na průměru vyztužujícího žebra a také na počtu vyztužujících žebor.

Tab. 9 *Efektivní modul pružnosti v ohybu sendvičových konstrukcí s pěnovým jádrem Airex T90.100/10 mm*

<i>Efektivní modul pružnosti v ohybu E [MPa]</i>							
	\bar{x}	s	MAX	MIN	MED	V [%]	Zlepšení [%]
PETx10	2553	45	2620	2480	2570	1,8	-
PETx10xA2	2679	116	2950	2570	2655	4,3	4,9
PETx10xB2	2911	136	3120	2720	2875	4,7	14,0
PETx10xA4	3710	79	3850	3610	3700	2,1	45,3
PETx10xB4	4413	113	4520	4130	4440	2,6	72,9



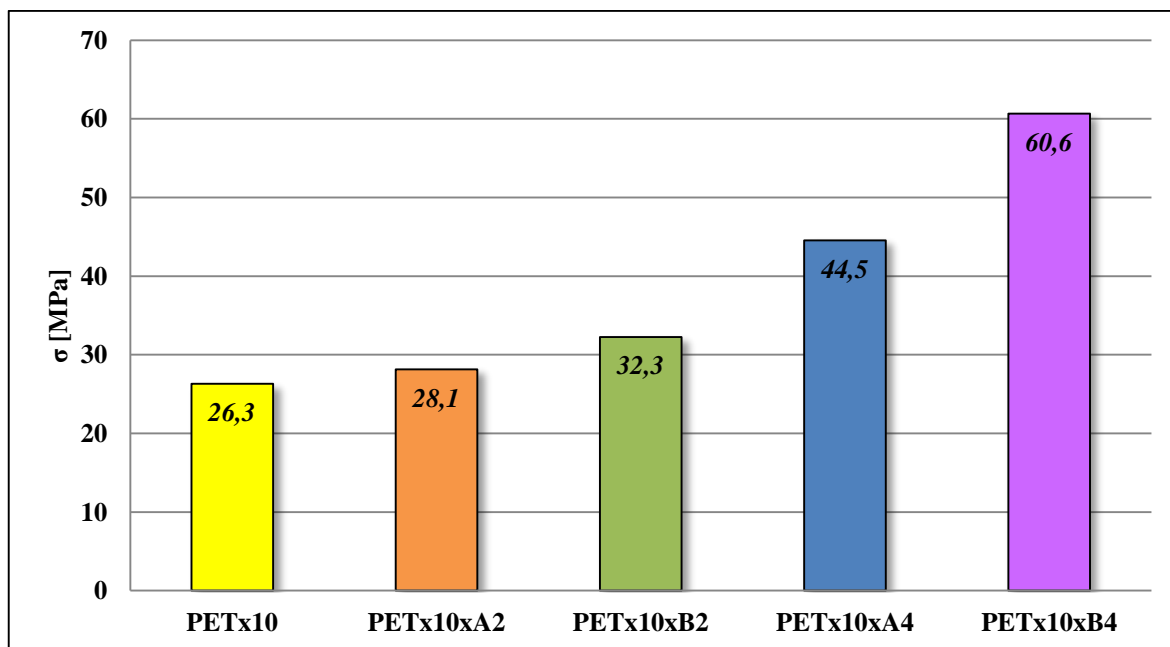
Obr. 83 *Grafická interpretace efektivního modulu pružnosti v ohybu sendvičových konstrukcí s pěnovým jádrem Airex T90.100/10 mm*

❖ **Mez pevnosti v ohybu sendvičových panelů s pěnovým jádrem Airex T90.100/10 mm**

Statisticky vyhodnocená data meze pevnosti v ohybu u sendvičových konstrukcí s jádrem Airex T90.100/10 mm jsou zaznamenána v Tab. 10. Mez pevnosti v ohybu dosahovala u nevyztužené sendvičové konstrukce (PETx10) 26,3 MPa. Díky vyztužení se hodnota meze pevnosti v ohybu změnila až na 60,6 MPa, což je zlepšení oproti původní nevyztužené sendvičové konstrukci o 130,4 %. Následující Obr 84. zobrazuje velikost meze pevnosti jednotlivých typů vyztužení sendvičových konstrukcí s pěnovými PET jádry. Je patrné, že nejvyšší hodnotu meze pevnosti měla sendvičová konstrukce s označením PETx10xB4.

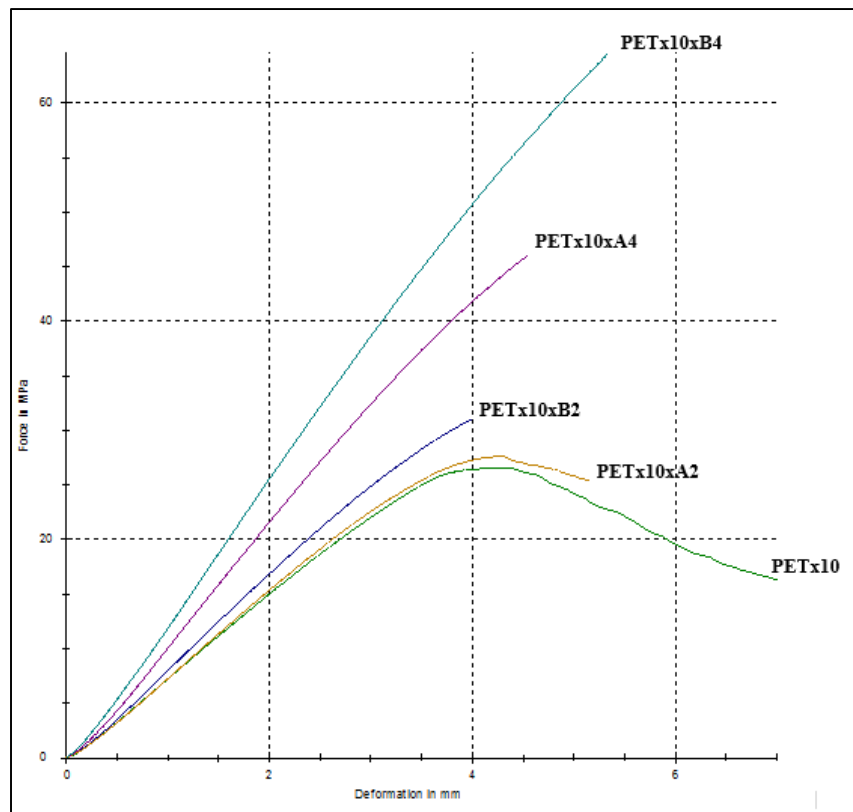
Tab. 10 Mez pevnosti v ohybu sendvičových konstrukcí s pěnovým jádrem Airex T90.100/10 mm

<i>Mez pevnosti v ohybu σ [MPa]</i>							
	\bar{x}	s	MAX	MIN	MED	V [%]	Zlepšení [%]
PETx10	26,3	1,0	27,6	24,8	26,5	3,8	-
PETx10xA2	28,1	2,1	31,9	26,0	27,2	7,3	6,9
PETx10xB2	32,3	2,3	35,3	29,7	31,0	7,2	22,6
PETx10xA4	44,5	4,9	51,6	36,8	46,0	11,2	69,2
PETx10xB4	60,6	5,8	73,5	53,0	59,4	9,5	130,4



Obr. 84 Grafická interpretace meze pevnosti v ohybu u sendvičových konstrukcí s pěnovým jádrem Airex T90.100/10 mm

Na následujícím grafu (Obr. 85) je zobrazena závislost meze pevnosti na deformaci jednotlivých modifikací sendvičových konstrukcí s pěnovým jádrem Airex T90.100/10 mm. Je zřejmé, že se zvyšujícím počtem vyztužujících žebér, roste také mez pevnosti a křivky jsou strmější, což souvisí se zvyšujícím se efektivním modulem pružnosti.



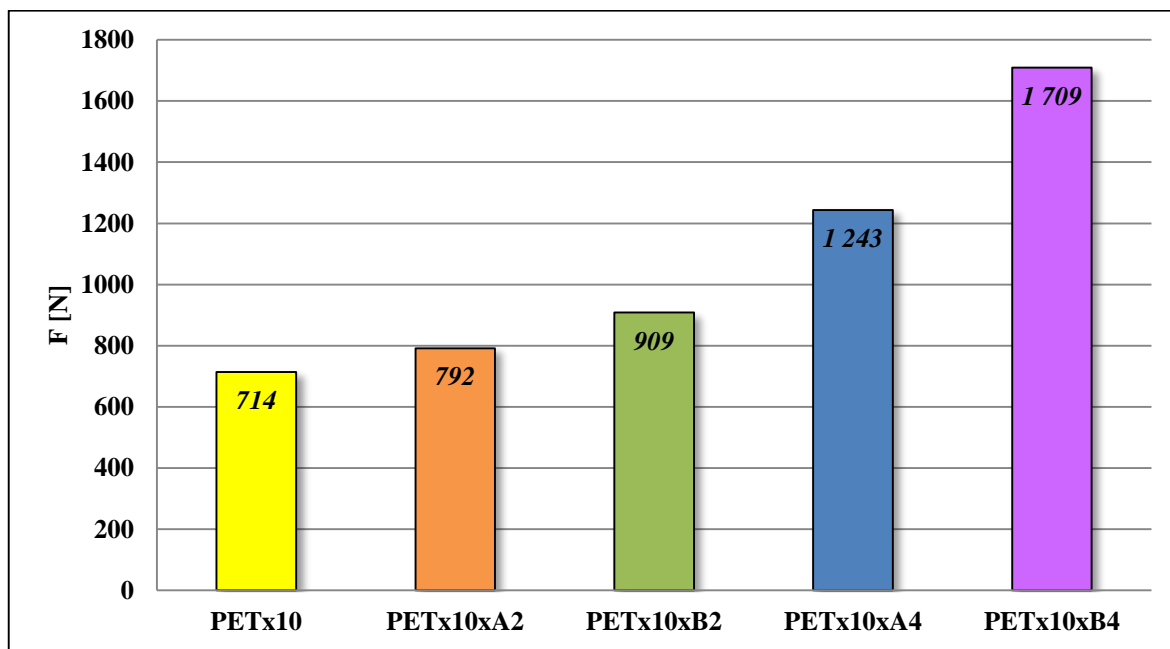
Obr. 85 Grafická interpretace závislosti meze pevnosti na deformaci v ohybu sendvičových konstrukcí s pěnovým jádrem Airex T90.100/10 mm

❖ Únosnost v ohybu sendvičových konstrukcí s pěnovým jádrem Airex T90.100/10 mm

Z naměřených dat v Tab. 11 vyplývá, že hodnota únosnosti sendvičového panelu s nevytuzeným pěnovým jádrem Airex T90.100/10 mm (PETx10) dosahovala velikosti 714 N. Díky vyztužení stoupla hodnota únosnosti v ohybu sendvičového nosníku s označením PETx10xB4 až na 1709 N. Vyztužením bylo dosaženo zlepšení o 139,5%.

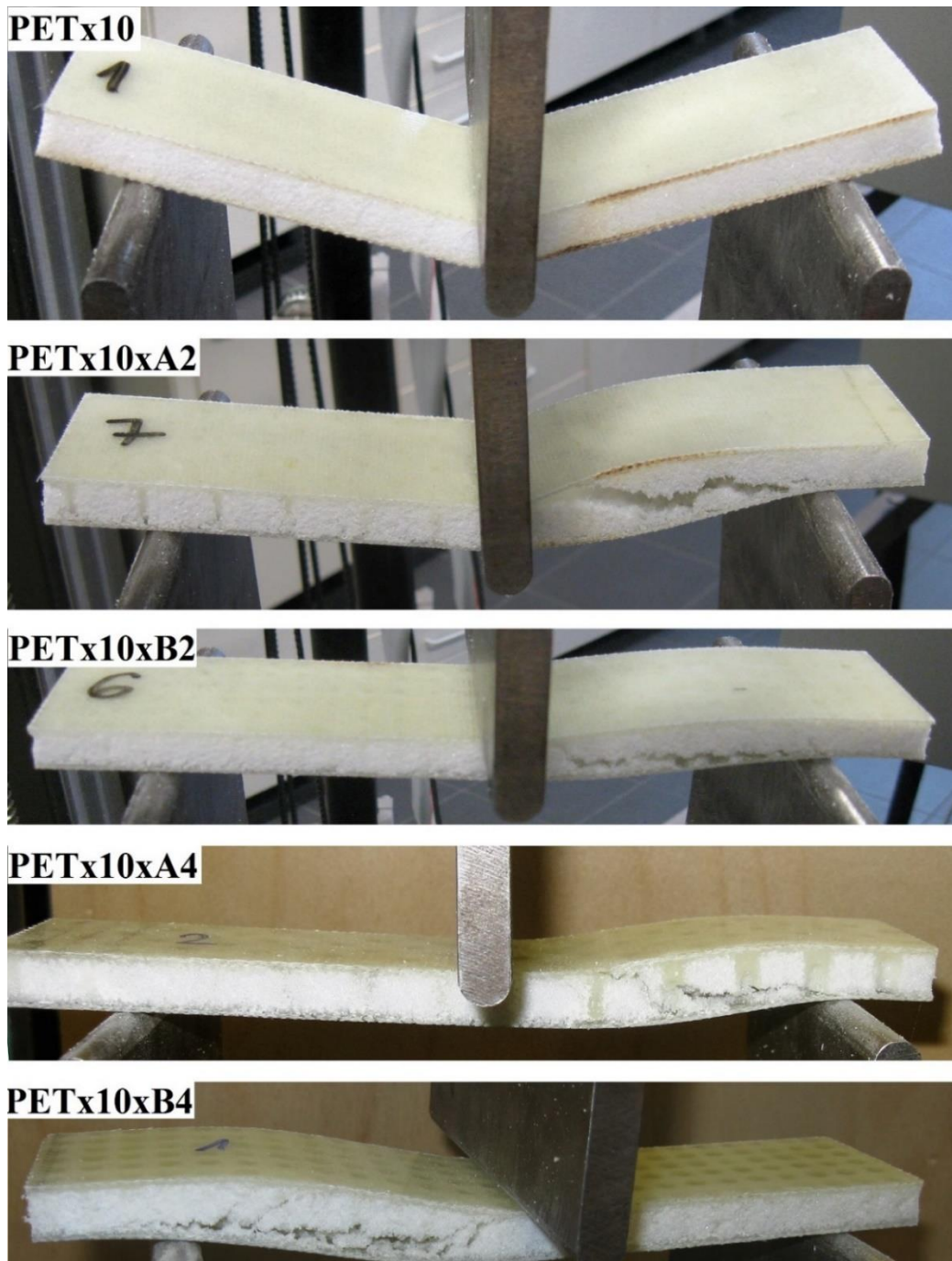
Tab. 11 Únosnost v ohybu sendvičových konstrukcí s pěnovým jádrem Airex T90.100/10 mm

Únosnost v ohybu F [N]							
	\bar{x}	s	MAX	MIN	MED	V [%]	Zlepšení [%]
PETx10	714	22	742	679	725	3,0	-
PETx10xA2	792	54	901	749	769	6,8	11,0
PETx10xB2	909	67	1010	841	867	7,3	27,4
PETx10xA4	1243	142	1460	1040	1300	11,4	74,2
PETx10xB4	1709	163	2080	1500	1680	9,6	139,5



Obr. 86 Grafická interpretace únosnosti v ohybu u sendvičových konstrukcí s pěnovým jádrem Airex T90.100/10 mm

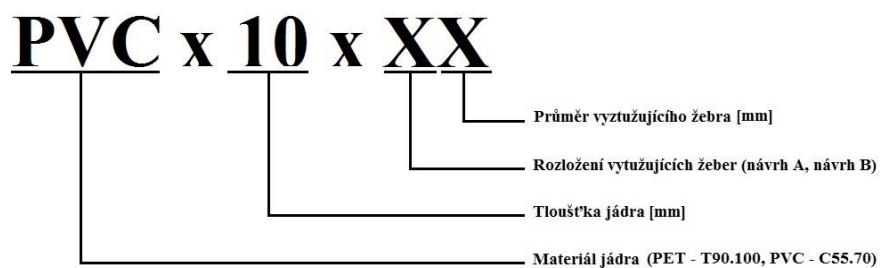
Nejčastější zaznamenanou poruchou v průběhu ohybové zkoušky bylo smykové porušení pěnového jádra, což nastalo u všech vyztužených sendvičových panelů. Poškození nevyztužené sendvičové konstrukce mělo lokální charakter a vznikalo v místě působení zatěžovacího trnu. Docházelo k tlakové poruše pěnového jádra, ale taky k trhlině ve vnější krycí vrstvě. Poruchy jednotlivých sendvičových panelů s pěnovým jádrem Airex T90.100/10 mm jsou zobrazeny na Obr. 87.



*Obr. 87 Poruchy při ohybové zkoušce sendvičových konstrukcí
s pěnovým jádrem Airex T90.100/10 mm*

10.1.2 Tříbodová ohybová zkouška sendvičových konstrukcí s pěnovým jádrem Airex C70.55/10 mm

Označení sendvičových konstrukcí s pěnovým jádrem Airex C70.55/10 mm:



*Obr. 88 Tříbodová ohybová zkouška sendvičové konstrukce
s pěnovým jádrem Airex C70.55/10 mm*

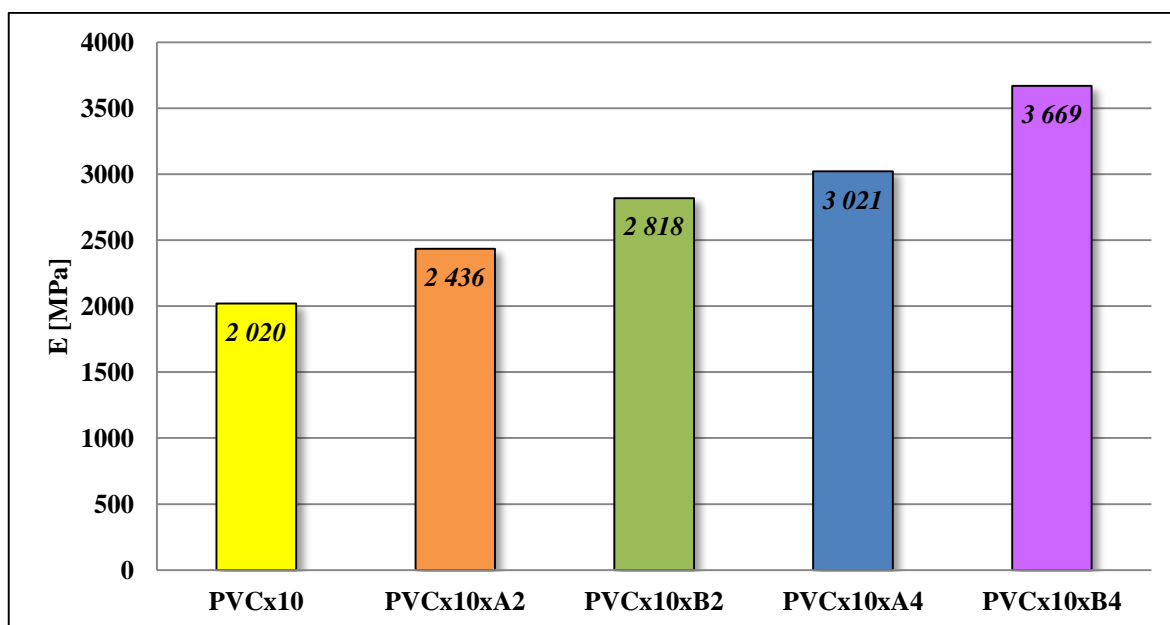
V následujících tabulkách (Tab. 12 – Tab. 14) jsou uvedeny statisticky vyhodnocená data jednotlivých druhů sendvičových panelů s pěnovým jádrem Airex C70.55/10 mm ze tříbodové ohybové zkoušky.

❖ **Efektivní modul pružnosti v ohybu sendvičových konstrukcí s pěnovým jádrem Airex C70.55/10 mm**

V Tab. 12. jsou statisticky vyhodnocená data pro efektivní modul pružnosti sendvičových konstrukcí s pěnovým jádrem Airex C70.55/10 mm. Z vyhodnocených dat sendvičových konstrukcí vyplývá, že efektivní modul pružnosti nevyztuženého sendvičového panelu (PVCx10) byl 2020 MPa. Díky vyztužení vzrostl efektivní modul pružnosti až na 3669 MPa. Tuto hodnotu efektivního modulu pružnosti vykazovala sendvičová struktura s označením PVCx10xB4. Zde bylo zlepšení efektivního modulu pružnosti o 81,6 %. Na následujícím sloupcovém grafu (Obr. 89) je patrné, že efektivní modul pružnosti vzrostl u všech vyztužených sendvičových konstrukcí.

Tab. 12 Efektivní modul pružnosti v ohybu sendvičových konstrukcí s pěnovým jádrem Airex C70.55/10 mm

Efektivní modul pružnosti v ohybu E [MPa]							
	\bar{x}	s	MAX	MIN	MED	V [%]	Zlepšení [%]
PVCx10	2020	19	2050	1990	2020	1,0	-
PVCx10xA2	2436	60	2540	2340	2430	2,4	20,6
PVCx10xB2	2818	129	3080	2650	2830	4,6	39,5
PVCx10xA4	3021	87	3170	2870	3020	2,9	49,6
PVCx10xB4	3669	245	3820	3010	3780	6,7	81,6



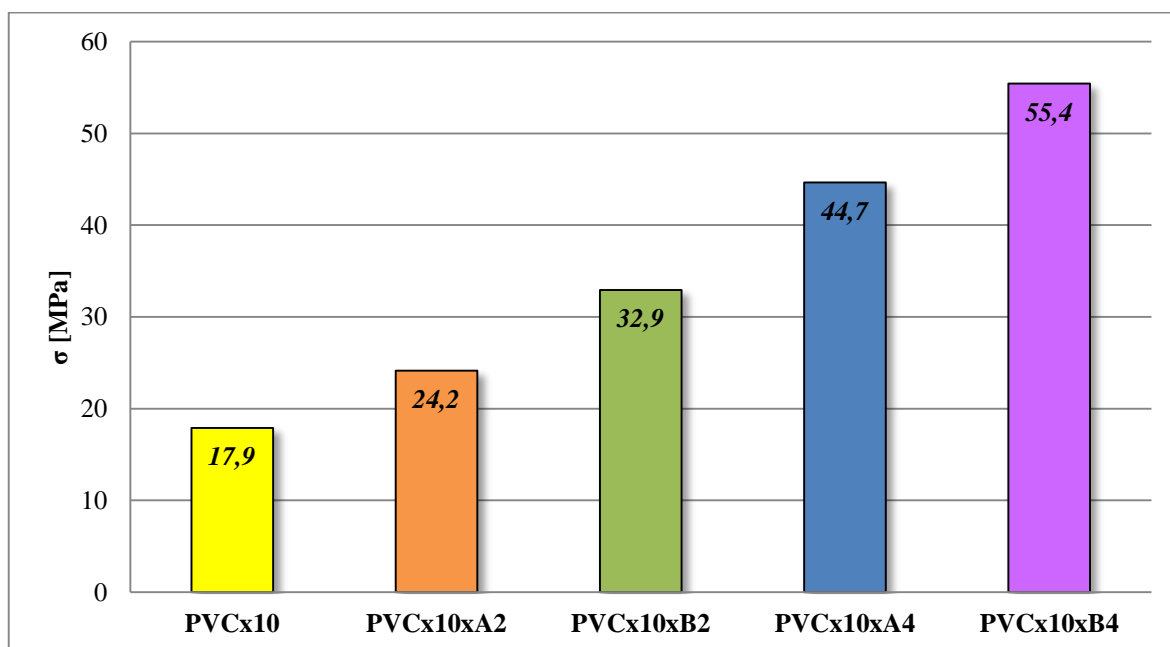
Obr. 89 Grafická interpretace modulu pružnosti v ohybu u sendvičových konstrukcí s pěnovým jádrem Airex C70.55/10 mm

❖ **Mez pevnosti v ohybu sendvičových konstrukcí s pěnovým jádrem Airex C70.55/10 mm**

Hodnoty meze pevnosti sendvičových konstrukcí s pěnovým jádrem materiálu Airex C70.55/10 mm jsou statisticky vyhodnoceny v Tab. 13. Sendvičová konstrukce v nevyztuženém stavu (PVCx10) měla mez pevnosti v ohybu 17,9 MPa. Po vyztužení polymerními žebry se zvýšila hodnota meze pevnosti v ohybu až na 55,4 MPa a to u sendvičové konstrukce s označením PVCx10xB4. Zlepšení oproti nevyztužené sendvičové konstrukci je v tomto případě o 209,8 %. Na grafickém znázornění (Obr. 90) je zřejmé, že vyztužení žebry s většími průměry ovlivnilo mez pevnosti výraznějším způsobem, než vyztužení žebry malých průměrů.

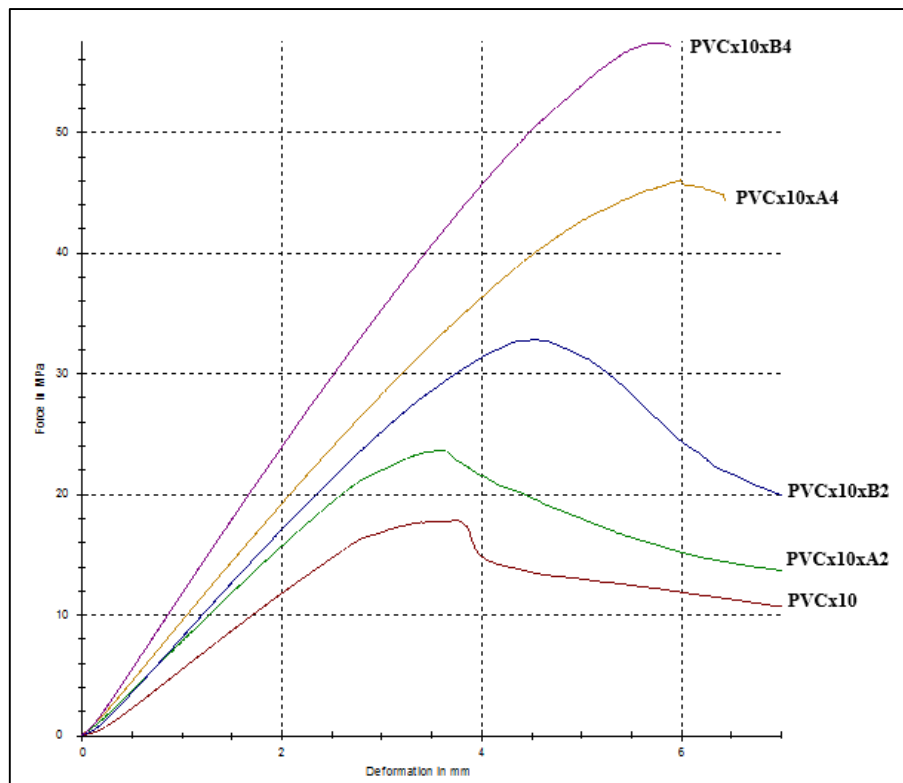
Tab. 13 Mez pevnosti v ohybu sendvičových konstrukcí s pěnovým jádrem Airex C70.55/10 mm

Mez pevnosti v ohybu σ [MPa]							
	\bar{x}	s	MAX	MIN	MED	V [%]	Zlepšení [%]
PVCx10	17,9	0,5	18,6	17,0	17,9	2,9	-
PVCx10xA2	24,2	1,7	27,2	21,5	23,8	6,9	35,0
PVCx10xB2	32,9	3,6	39,9	27,0	32,5	11,0	84,1
PVCx10xA4	44,7	3,1	51,6	40,1	44,8	7,0	149,5
PVCx10xB4	55,4	4,0	59,0	44,8	55,9	7,3	209,8



Obr. 90 Grafická interpretace meze pevnosti v ohybu u sendvičových konstrukcí s pěnovým jádrem Airex C70.55/10 mm

Obr. 91 zobrazuje závislost meze pevnosti na deformaci jednotlivých modifikací sendvičových konstrukcí s pěnovým jádrem Airex C70.55/10 mm. Je zde vidět, že zvětšení průměru vyztužujících žebek na 4 mm, zvýšilo mez pevnosti velmi výrazně. Křivky jsou s přibývajícím množstvím strmější, což souvisí se zvyšujícím se efektivním modulem pružnosti.



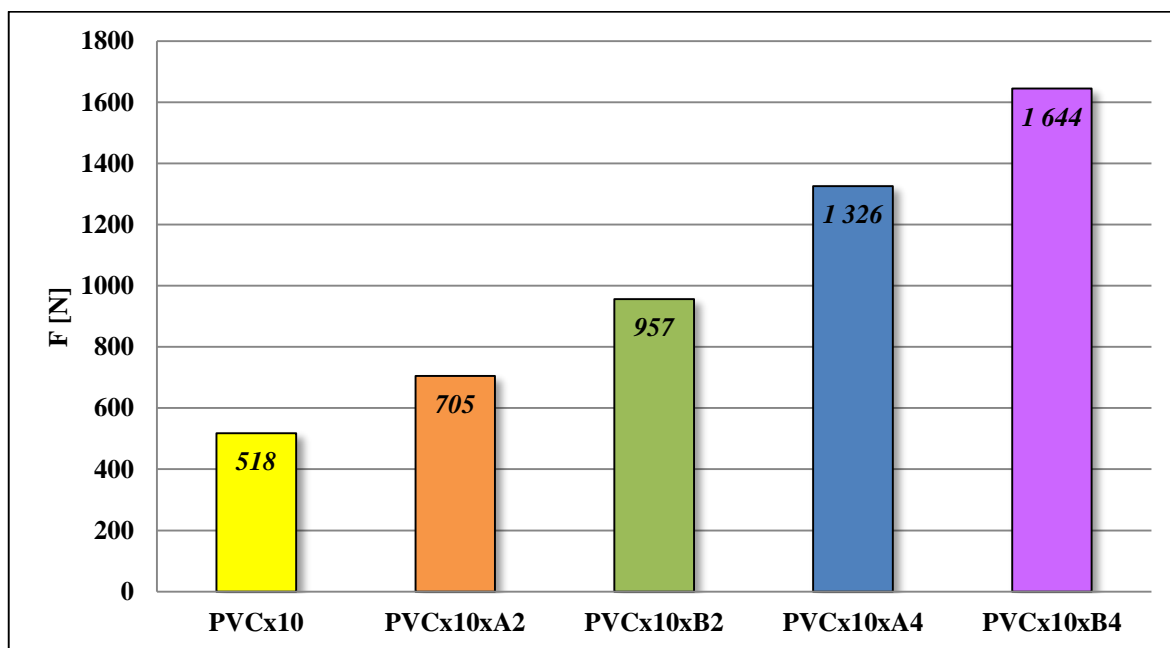
Obr. 91 Grafická interpretace závislosti meze pevnosti na deformaci v ohybu sendvičových konstrukcí s pěnovým jádrem Airex C70.55/10 mm

❖ Únosnost v ohybu sendvičových konstrukcí s pěnovým jádrem C70.55/10 mm

Z naměřených dat v Tab. 14 je lze zjistit, že u nevyztužené sendvičové konstrukce s pěnovým jádrem Airex C70.55/10 mm (PVCx10) byla hodnota únosnosti v ohybu 518 N. S přibývajícím vyztužením rostla také hodnota únosnosti v ohybu. Nejvyšší hodnotu únosnosti v ohybu vykazoval sendvičový panel s označením PVCx10xB4, a to 1644 N, což je o 217,7 % více než nevyztužený sendvičový panel.

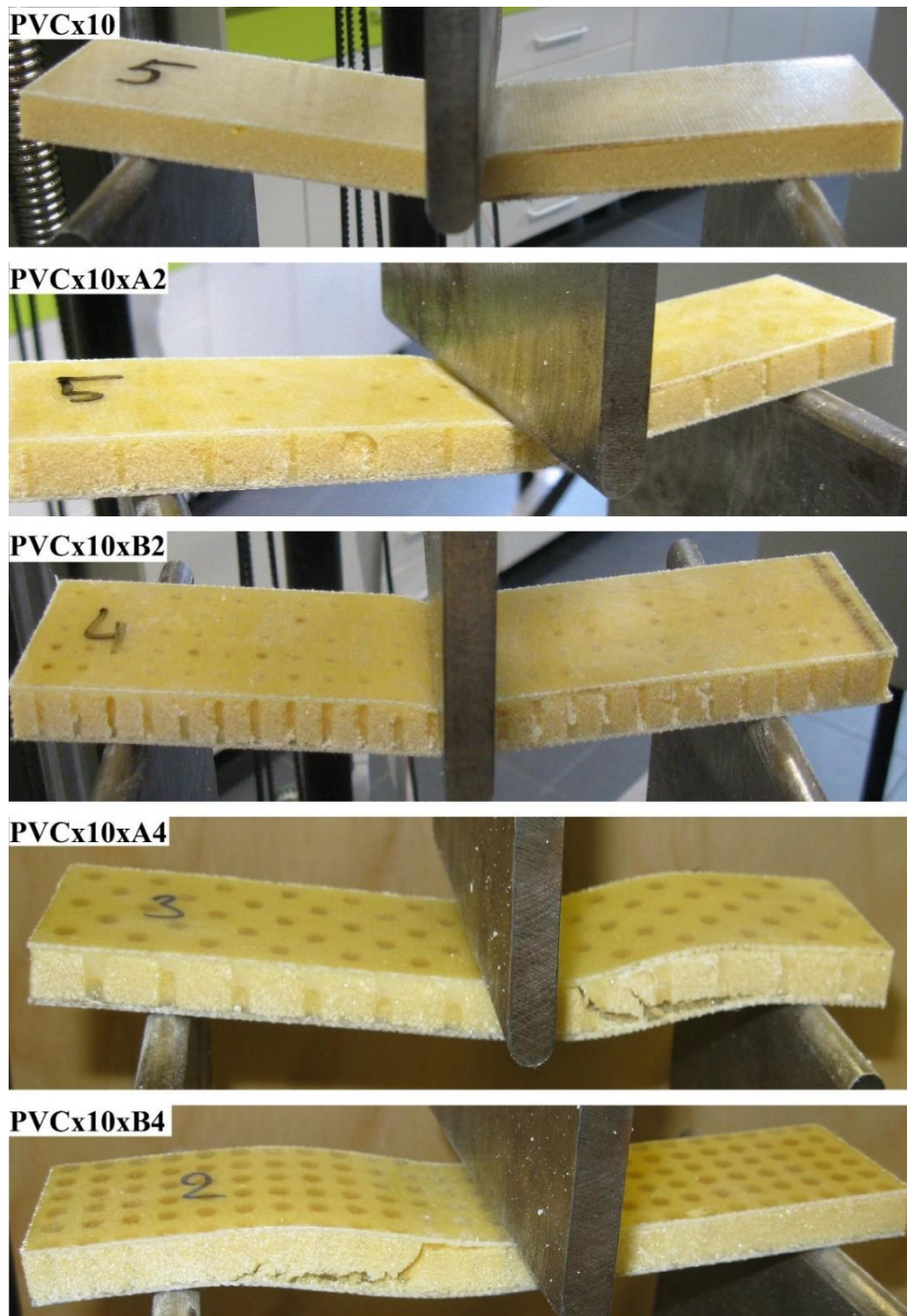
Tab. 14 Únosnost v ohybu sendvičových konstrukcí s pěnovým jádrem Airex C70.55/10 mm

Únosnost v ohybu F [N]							
	\bar{x}	s	MAX	MIN	MED	V [%]	Zlepšení [%]
PVCx10	518	14	540	498	513	2,8	-
PVCx10xA2	705	49	790	617	700	6,9	36,3
PVCx10xB2	957	107	1170	773	938	11,2	84,8
PVCx10xA4	1326	93	1530	1190	1330	7,0	156,1
PVCx10xB4	1644	120	1750	1330	1660	7,3	217,7



Obr. 92 Grafická interpretace únosnosti v ohybu u sendvičových konstrukcí s pěnovým jádrem Airex C70.55/10 mm

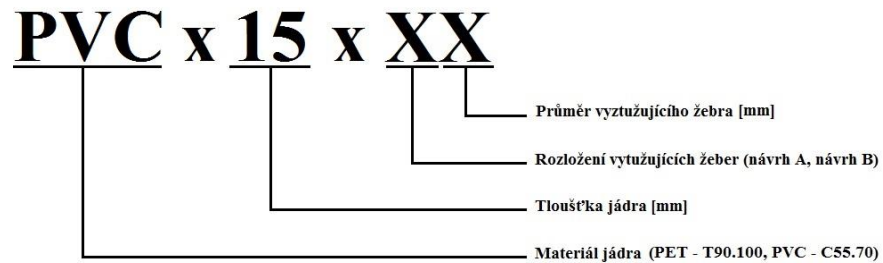
Na Obr. 93 jsou zobrazeny poruchy jednotlivých sendvičových panelů. Nevyztužený sendvičový panel, spolu s vyztuženými sendvičovými panely s průměrem vyztužujících žebek 2 mm měly porušení lokálního charakteru, které vznikalo v místě působení zatěžovacího trnu. Docházelo k tlakové poruše pěnového jádra, a také k trhlině ve vnější krycí vrstvě. U vyztužených sendvičových panelů s průměrem vyztužujících žebek 4 mm docházelo ke smykovému porušení pěnového jádra.



Obr. 93 Poruchy při ohybové zkoušce sendvičových konstrukcí s pěnovým jádrem Airex C70.55/10 mm

10.1.3 Třibodová ohybová zkouška sendvičových konstrukcí s pěnovým jádrem Airex C70.55/15 mm

Označení sendvičových konstrukcí s pěnovým jádrem Airex C70.55/15 mm:



*Obr. 94 Třibodová ohybová zkouška sendvičové konstrukce
s pěnovým jádrem Airex C70.55/15 mm*

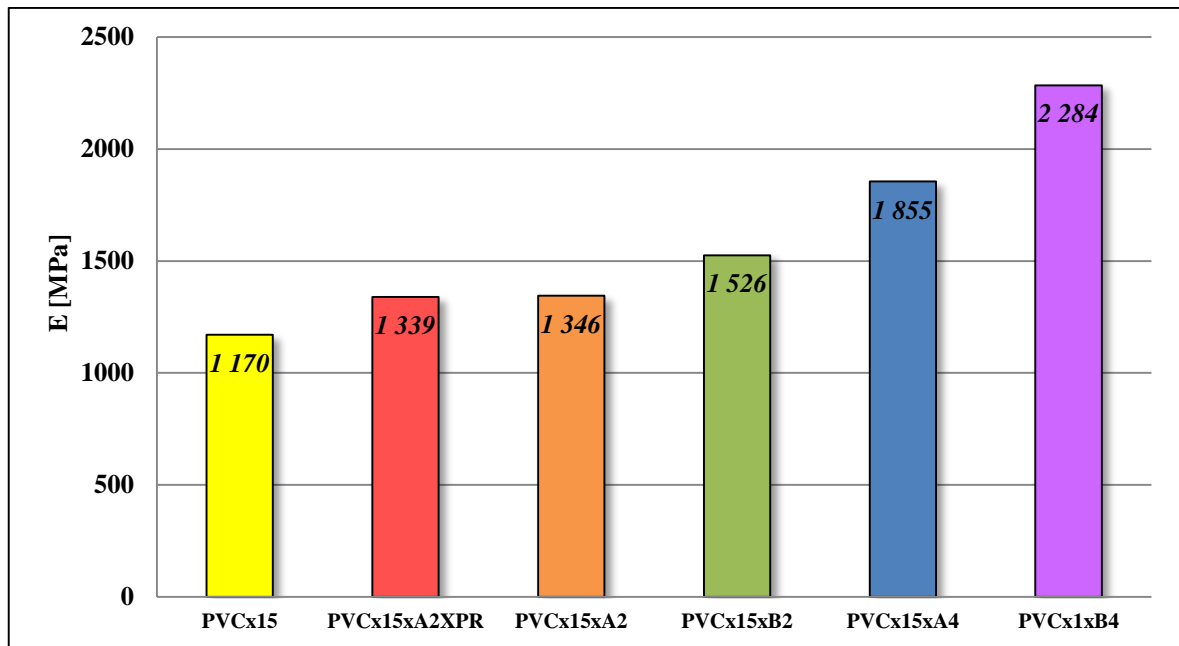
V následujících tabulkách (Tab. 15 – Tab. 17) jsou uvedeny statisticky vyhodnocená data jednotlivých druhů sendvičových panelů s pěnovým jádrem Airex C70.55/15 mm ze třibodové ohybové zkoušky.

❖ **Efektivní modul pružnosti v ohybu sendvičových konstrukcí s pěnovým jádrem Airex C70.55/15 mm**

V Tab. 15 jsou uvedeny statisticky vyhodnocená data pro efektivní modul pružnosti sendvičových panelů s pěnovým jádrem Airex C70.55/15 mm. Sendvičová konstrukce v nevyztuženém stavu (PVCx15) vykazovala hodnotu efektivního modulu pružnosti 1170 MPa. Největší modul pružnosti byl zaznamenán u sendvičové konstrukce s označením PVCx15xB4, kde byl naměřen modul pružnosti 2284 MPa a došlo tak ke zvětšení modulu pružnosti o 95,6 %. Zde bylo také porovnáváno vyztužení bez prošíání a vyztužení s prošíáním skleněným vláknem. Sendvičový panel vyztužený polymerními žebry bez prošíání (PVCx15xA2) měl hodnotu efektivního modulu pružnosti 1346 MPa. Sendvičový panel, který byl prošíán skleněným vláknem (PVCx15xA2xPR), měl modul pružnosti 1339 MPa, což je téměř shodná hodnota s vyztužením polymerními žebry bez prošíání. Zlepšení modulu pružnosti u sendvičové konstrukce vyztužené prošíáním jádra bylo o 14,4 % oproti sendvičové konstrukci bez vyztužení. V následujícím sloupcovém grafu (Obr. 95) je zobrazená změna efektivního modulu pružnosti v závislosti na druhu vyztužení.

Tab. 15 *Efektivní modul pružnosti v ohybu sendvičových konstrukcí s pěnovým jádrem Airex C70.55/15 mm*

<i>Efektivní modul pružnosti v ohybu E [MPa]</i>							
	\bar{x}	s	MAX	MIN	MED	V [%]	Zlepšení [%]
PVCx15	1170	18	1200	1130	1170	1,6	-
PVCx15xA2xPR	1339	119	1510	1200	1350	8,9	14,4
PVCx15xA2	1346	31	1380	1280	1360	2,3	15,0
PVCx15xB2	1526	44	1600	1420	1530	2,9	30,4
PVCx15xA4	1855	72	1950	1710	1850	3,9	58,6
PVCx15xB4	2284	112	2400	2060	2360	4,9	95,6



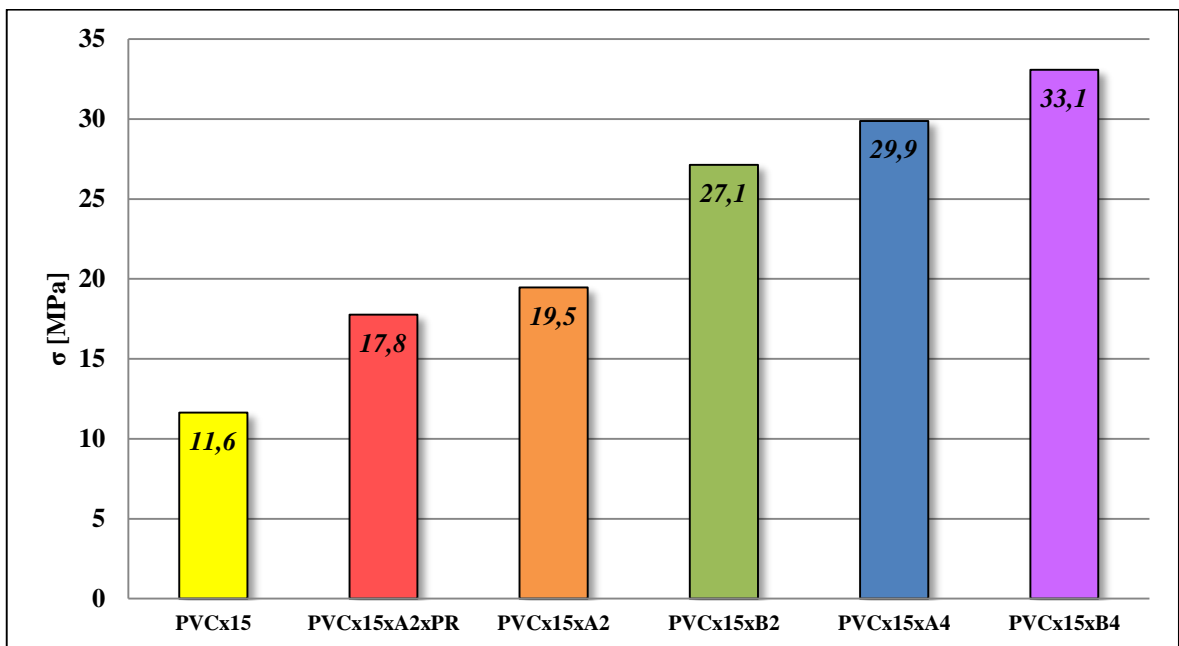
Obr. 95 Grafická interpretace efektivního modulu pružnosti v ohybu u sendvičových konstrukcí s pěnovým jádrem Airex C70.55/15 mm

❖ **Mez pevnosti v ohybu sendvičových konstrukcí s pěnovým jádrem Airex C70.55/15 mm**

V Tab. 16 jsou uvedeny statisticky vyhodnocená data pro mez pevnosti sendvičových konstrukcí s pěnovým jádrem Airex C70.55/15 mm. Při změně tloušťky pěnového jádra Airex C70.55 na 15 mm, měla nevyztužená sendvičová konstrukce mez pevnosti v ohybu 11,6 MPa. Vyztužením dosáhla sendvičová konstrukce s označením PVCx15xB4 meze pevnosti v ohybu až 33,0 MPa, což je zlepšení oproti nevyztužené sendvičové konstrukci o 184,4 %. S pěnovým jádrem C70.55/15 mm byl také testován sendvičový nosník s prošitým jádrem skleněnými vlákny (PVCx15xA2xPR) jehož hodnota meze pevnosti v ohybu byla 17,7 MPa. Tento sendvičový panel byl srovnáván s vyztuženým sendvičovým panelem bez prošití (PVCx15xA2), jehož mez pevnosti v ohybu byla 19,5 MPa. Sendvičový panel PVCx15xA2 měl navzdory očekávání větší mez pevnosti než panel PVCx15xA2xPR o 9,6 %, což mohlo být způsobeno špatným prosycením vnějších krycích vrstev u sendvičového panelu s prošitím.

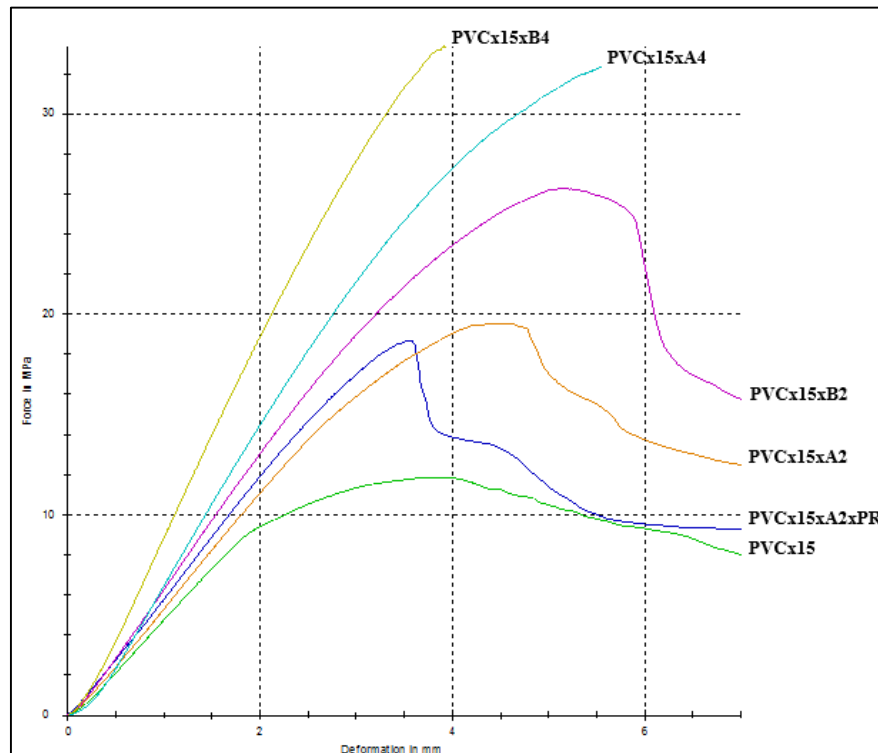
Tab. 16 Mez pevnosti v ohybu sendvičových konstrukcí s pěnovým jádrem Airex C70.55/15 mm

Mez pevnosti v ohybu σ [MPa]							
	\bar{x}	s	MAX	MIN	MED	V [%]	Zlepšení [%]
PVCx15	11,6	0,5	12,3	10,7	11,6	4,0	-
PVCx15xA2xPR	17,7	1,8	22,1	15,4	17,6	10,2	52,7
PVCx15xA2	19,5	1,0	21,4	18,4	19,2	5,1	67,4
PVCx15xB2	27,1	1,4	29,0	25,2	26,6	5,0	133,3
PVCx15xA4	29,9	1,5	32,4	27,8	29,5	5,1	156,8
PVCx15xB4	33,1	2,3	36,4	28,1	33,3	6,8	184,4



Obr. 96 Grafická interpretace meze pevnosti v ohybu u sendvičových konstrukcí s pěnovým jádrem Airex C70.55/15 mm

Na následujícím obrázku (Obr. 97) je zobrazena závislost meze pevnosti na deformaci jednotlivých modifikací sendvičových konstrukcí s pěnovým jádrem Airex C70.55/15 mm. Je patrné, že se zvyšujícím počtem vyztužujících žebër, roste také mez pevnosti.



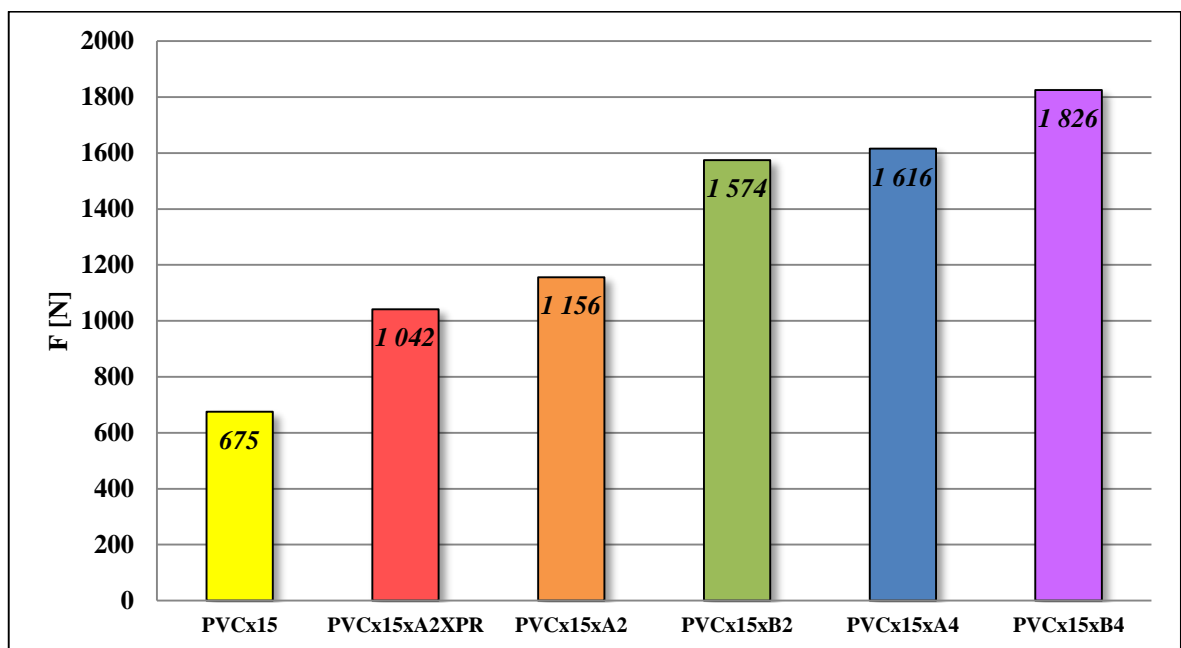
Obr. 97 Grafická interpretace závislosti meze pevnosti na deformaci v ohybu sendvičových konstrukcí s pěnovým jádrem Airex C70.55/15 mm

❖ Únosnost v ohybu sendvičových konstrukcí s pěnovým jádrem C70.55/15 mm

Hodnoty únosnosti v ohybu sendvičových panelů jsou statisticky vyhodnoceny v Tab. 17. Nevyztužený sendvičový panel s pěnovým jádrem Airex C70.55/15 mm (PVCx15) vykazoval únosnost v ohybu 675 N. Největší únosnost byla zaznamenána u vyztuženého sendvičového panelu s označením PVCx15xB4. Únosnost v ohybu tohoto panelu byla 1826 N. V tomto případě bylo zlepšení sendvičového panelu PVCx15xB4 o 170,5% oproti nevyztuženému sendvičovému panelu. Sendvičový panel s vyztuženým pěnovým jádrem, které bylo prošito skleněným vlákny (PVCx15xA2xPR) měl únosnost v ohybu 1042 N, což je o 10,9 % méně než sendvičový panel se stejným průměrem a rozložením vyztužujících žebër bez prošití (PVCx15xA2), který měl únosnost v ohybu 1156 N.

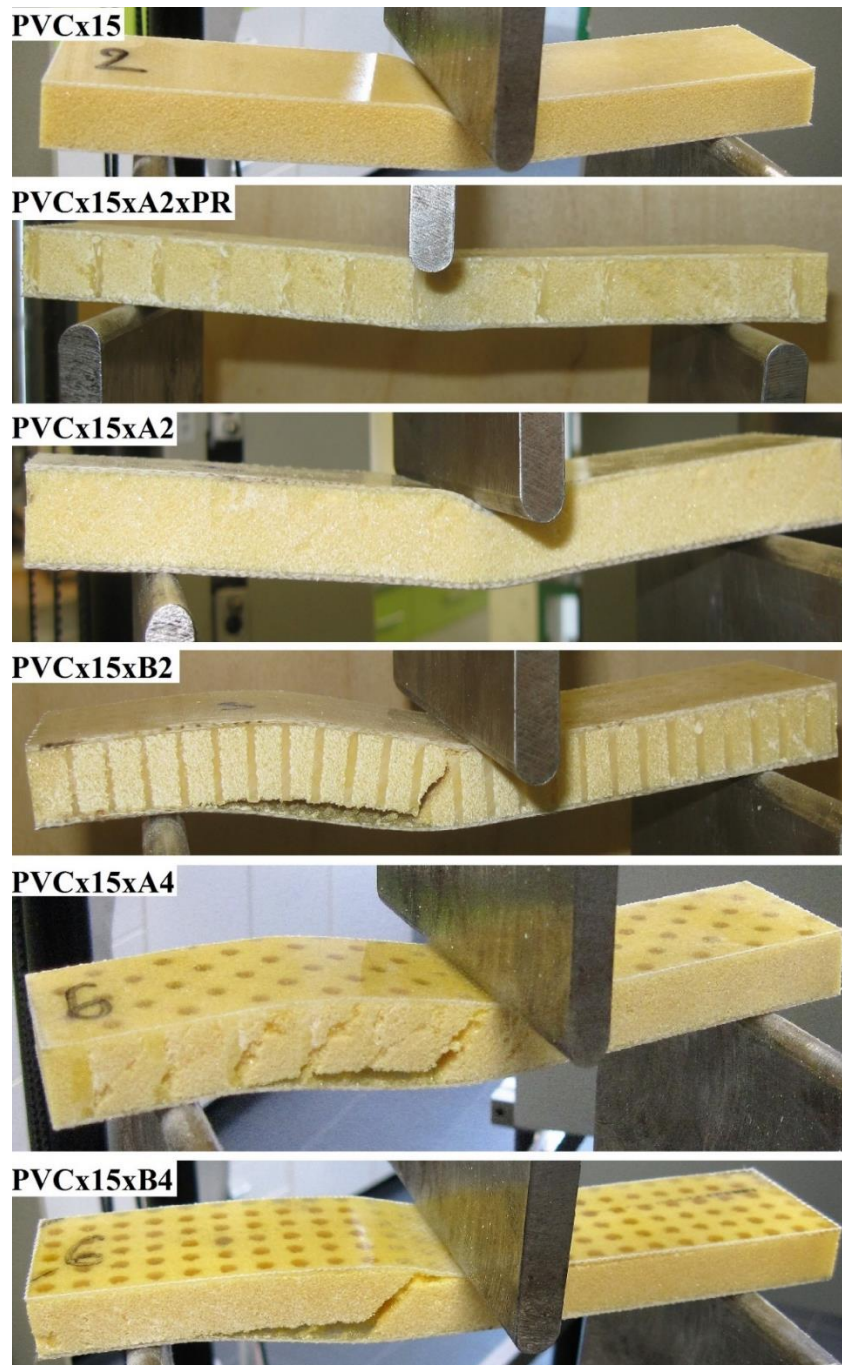
Tab. 17 Únosnost v ohybu sendvičových konstrukcí s pěnovým jádrem Airex C70.55/15 mm

Únosnost v ohybu F [N]							
	\bar{x}	s	MAX	MIN	MED	V [%]	Zlepšení [%]
PVCx15	675	29	707	610	677	4,4	-
PVCx15xA2xPR	1042	80	1230	945	1020	7,7	54,4
PVCx15xA2	1156	60	1270	1090	1140	5,2	71,2
PVCx15xB2	1574	78	1680	1460	1540	5,0	133,3
PVCx15xA4	1616	70	1710	1510	1610	4,4	139,4
PVCx15xB4	1826	128	2050	1560	1830	7,0	170,5



Obr. 98 Grafická interpretace únosnosti v ohybu u sendvičových konstrukcí s pěnovým jádrem Airex C70.55/15 mm

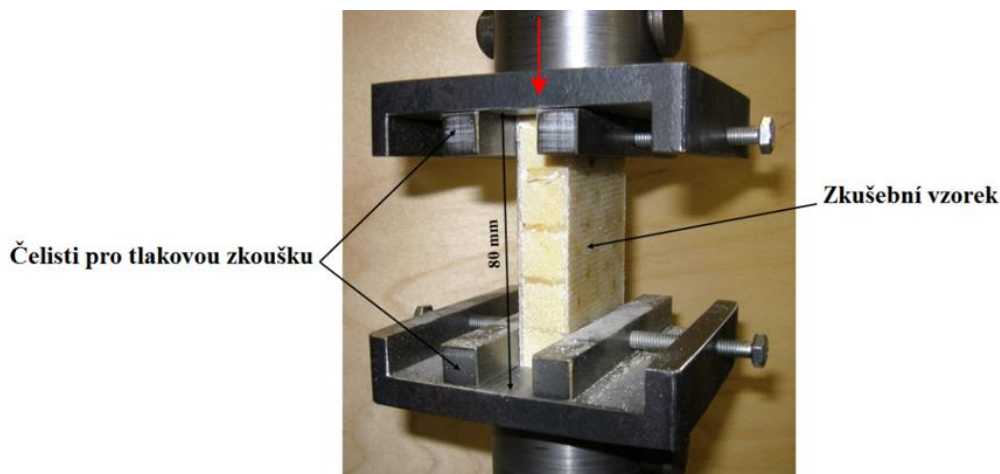
Na Obr. 99 jsou zobrazeny poruchy jednotlivých sendvičových panelů. Nevyztužený sendvičový panel, spolu s vyztuženými sendvičovými panely s průměrem vyztužujících žebér 2 mm a kosočtvercovým rozložením, z nichž jeden byl prošíty skleněným vláknem, měly porušení lokálního charakteru, které vznikalo v místě působení zatěžovacího trnu. U ostatních vyztužených sendvičových panelů docházelo ke smykovému porušení pěnového jádra.



Obr. 99 Poruchy při ohybové zkoušce sendvičových konstrukcí s pěnovým jádrem Airex C70.55/15 mm

10.2 Tlaková zkouška při působení bočního tlaku

Tlaková zkouška při působení bočního tlaku probíhala podle americké normy ASTM C464/C464M, jejíž schéma nastavení je zobrazeno na Obr. 100. Velikost testovacích vzorků byla 80 x 50 mm a tloušťka byla závislá na druhu sendvičové konstrukce. Rychlost posuvu příčnicku byla 5 mm/min.



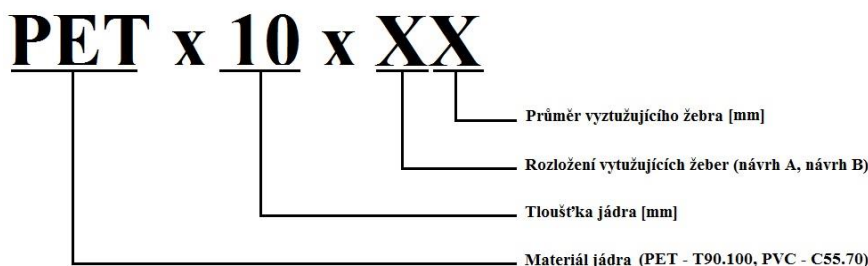
Obr. 100 Schéma tlakové zkoušky při působení bočního tlaku

Každé modifikace sendvičové konstrukce bylo testováno 8 vzorků ($n = 8$). Z programu TestExpert byly použity výsledky pro maximální zatěžující sílu F [N] a také rozměry vzorku. Pomocí těchto údajů se vyjádřila mezní pevnost σ [MPa] při působení bočního tlaku. Vztah pro výpočet mezní pevnosti vychází z americké normy ASTM C464/C646M, a je uveden v kapitole 4.1.5 Tlaková zkouška při působení bočního tlaku.

V následujících tabulkách (Tab. 18 – Tab. 23) jsou uvedeny statisticky vyhodnocená data jednotlivých druhů sendvičových panelů z tlakové zkoušky při působení bočního tlaku.

10.2.1 Tlaková zkouška při působení bočního tlaku u sendvičových konstrukcí s pěnovým jádrem Airex T90.100/10 mm

Označení sendvičových konstrukcí s pěnovým jádrem Airex T90.100/10 mm:

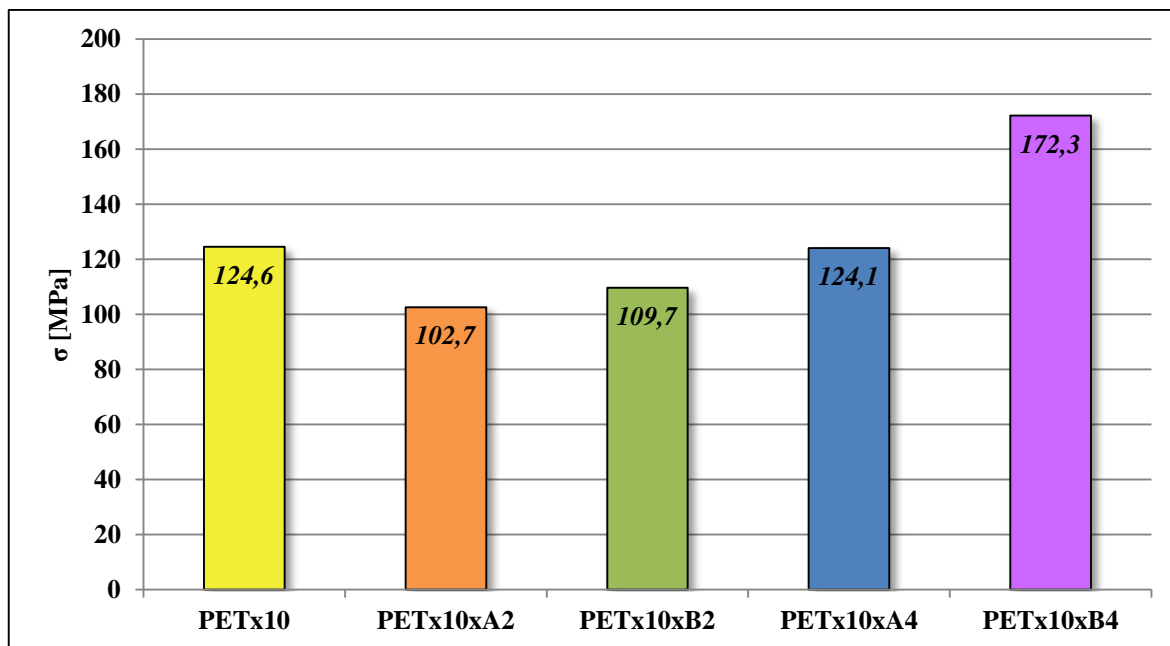


❖ Mez pevnosti v tlaku sendvičových konstrukcí s pěnovým jádrem T90.100/10 mm

Statisticky vyhodnocená data meze pevnosti při působení bočního tlaku na sendvičové konstrukce s pěnovým jádrem Airex T90.100/10 mm jsou uvedena v Tab. 18. Z hodnot meze pevnosti v tlaku je zřejmé, že ve srovnání s nevyztuženým sendvičovým panelem s pěnovým jádrem (PETx10), který měl mez pevnosti 124,6 MPa, bylo zaznamenáno pouze jedno zlepšení meze pevnosti, a to u sendvičového panelu s označením PETx10xB4, který měl mez pevnosti 172,3 MPa. Zlepšení vyztužením v tomto případě je o 38,3 %. V ostatních případech došlo ke snížení meze pevnosti. Největší pokles meze pevnosti byl zaznamenán u sendvičové konstrukce s označením PETx10xA2, který měl mez pevnosti v tlaku 102,7 MPa, což je o 17,6 % méně než nevyztužený sendvičový panel. Jednotlivé změny meze pevnosti sendvičových konstrukcí vlivem vyztužení jsou zaznamenány v následujícím grafu (Obr. 101).

Tab. 18 Mez pevnosti v tlaku sendvičových konstrukcí s pěnovým jádrem Airex T90.100/10 mm

Mez pevnosti v tlaku σ [MPa]							
	\bar{x}	s	MAX	MIN	MED	V [%]	Zlepšení [%]
PETx10	124,6	4,7	131,2	120,0	123,0	3,8	-
PETx10xA2	102,7	21,2	136,7	74,0	97,1	20,7	-17,6
PETx10xB2	109,6	30,8	147,7	51,6	109,6	28,1	-11,9
PETx10xA4	124,1	28,1	155,5	69,7	140,8	22,7	-0,4
PETx10xB4	172,3	18,8	201,9	143,6	176,2	10,9	38,3



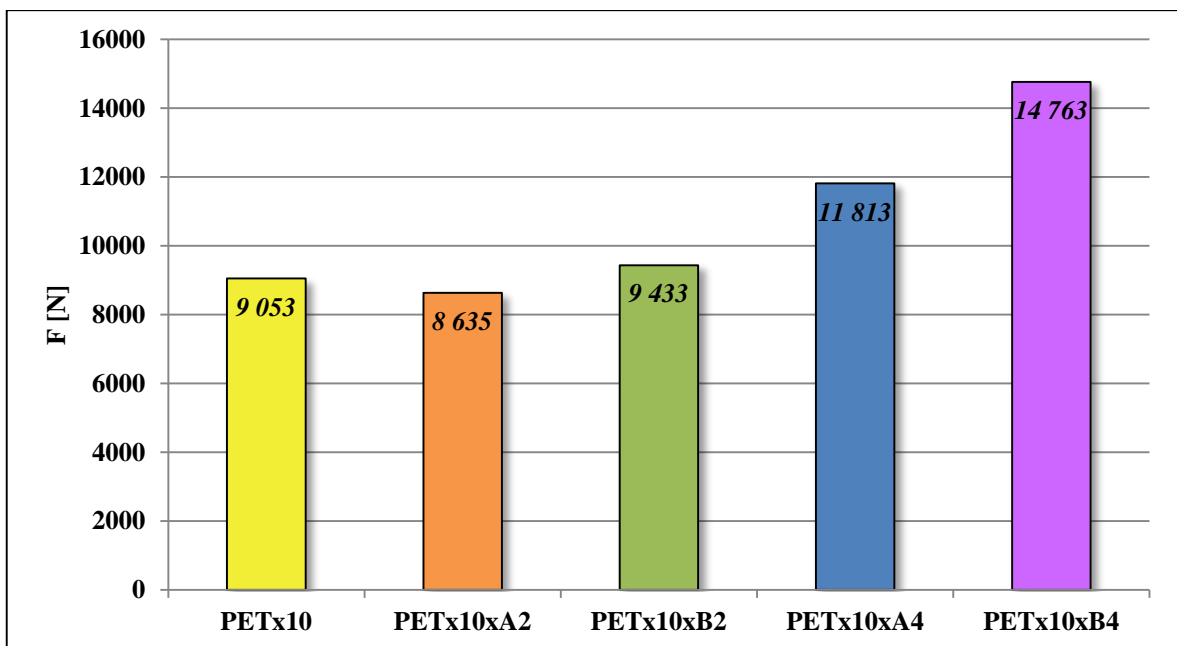
Obr. 101 Grafická interpretace meze pevnosti v tlaku sendvičových konstrukcí s pěnovým jádrem Airex T90.100/10 mm

❖ Únosnost v tlaku sendvičových konstrukcí s pěnovým jádrem T90.100/10 mm

Ze staticky vyhodnocených dat v Tab. 19 je patrné, že u sendvičových konstrukcí s pěnovým materiálem Airex T90.100/10 mm bylo, kromě vyztuženého sendvičového panelu s označením PETx10xA2, zaznamenáno zvýšení únosnosti v tlaku u všech modifikací sendvičových konstrukcí. Nevětší únosnost v tlaku vykazoval sendvičový panel PETx10xB4, který měl hodnotu únosnosti v tlaku 14763 N. Sendvičový panel bez vyztužení (PETx10) měl hodnotu únosnosti v tlaku 9053 N. Zvýšení únosnosti v tlaku v tomto případě bylo o 63,1 %. Sendvičový panel PETx10xA2 měl o 4,6 % menší únosnost v tlaku než nevyztužený sendvičový panel. Únosnost v tlaku sendvičového panelu PETx10xA2 byla 8635 N. Následující Obr. 102 zobrazuje velikost únosnosti v tlaku dle jednotlivých typů vyztužených sendvičových konstrukcí s PET jádry. Je patrné, že vyztužení polymerními žebry o průměru 4 mm ovlivnilo únosnost v tlaku velmi výrazně.

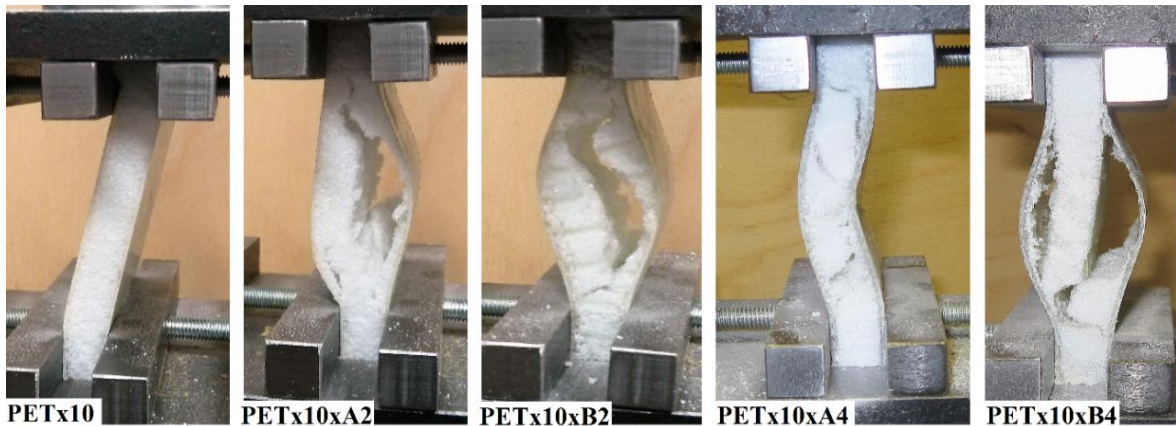
Tab. 19 Únosnost v tlaku sendvičových konstrukcí s pěnovým jádrem Airex T90.100/10 mm

Únosnost v tlaku σ [MPa]							
	\bar{x}	s	MAX	MIN	MED	V [%]	Zlepšení [%]
PETx10	9053	226	9430	8840	8940	2,5	-
PETx10xA2	8635	2091	11800	6030	7955	24,2	-4,6
PETx10xB2	9433	2474	12500	5080	9450	26,2	4,2
PETx10xA4	11813	2675	14800	6630	12650	22,7	30,5
PETx10xB4	14763	1612	17300	12300	15000	10,9	63,1



Obr. 102 Grafická interpretace únosnosti v tlaku u sendvičových konstrukcí s pěnovým jádrem Airex T90.100/10 mm

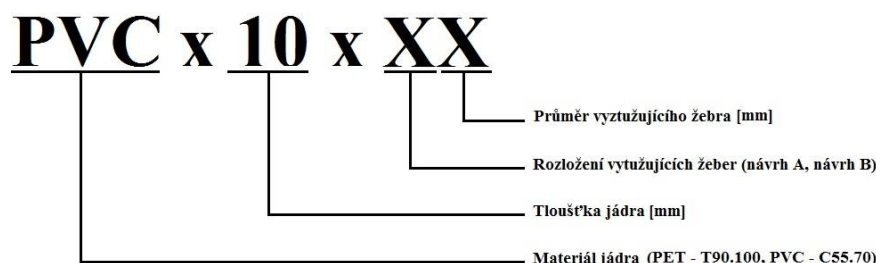
U nevyztuženého sendvičového panelu s pěnovým jádrem Airex T90.100/10 mm došlo ke zvlnění testovacího vzorku. U sendvičových panelů vyztužených polymerními žebry o průměru 2 mm došlo k roztržení pěnového jádra. U vyztužené sendvičové konstrukce se čtvercovým rozložením a průměrem vyztužujících žebor 4 mm došlo k delaminaci vnějších krycích vrstev od pěnového jádra. Jednotlivé poruchy sendvičových panelů jsou zobrazeny na následujícím Obr. 103.



Obr. 103 Poruchy při tlakové zkoušce sendvičových konstrukcí s pěnovým jádrem Airex T90.100/10 mm

10.2.2 Tlaková zkouška při působení bočního tlaku u sendvičových konstrukcí s pěnovým jádrem Airex C70.55/10 mm

Označení sendvičových konstrukcí s pěnovým jádrem Airex C70.55/10 mm:

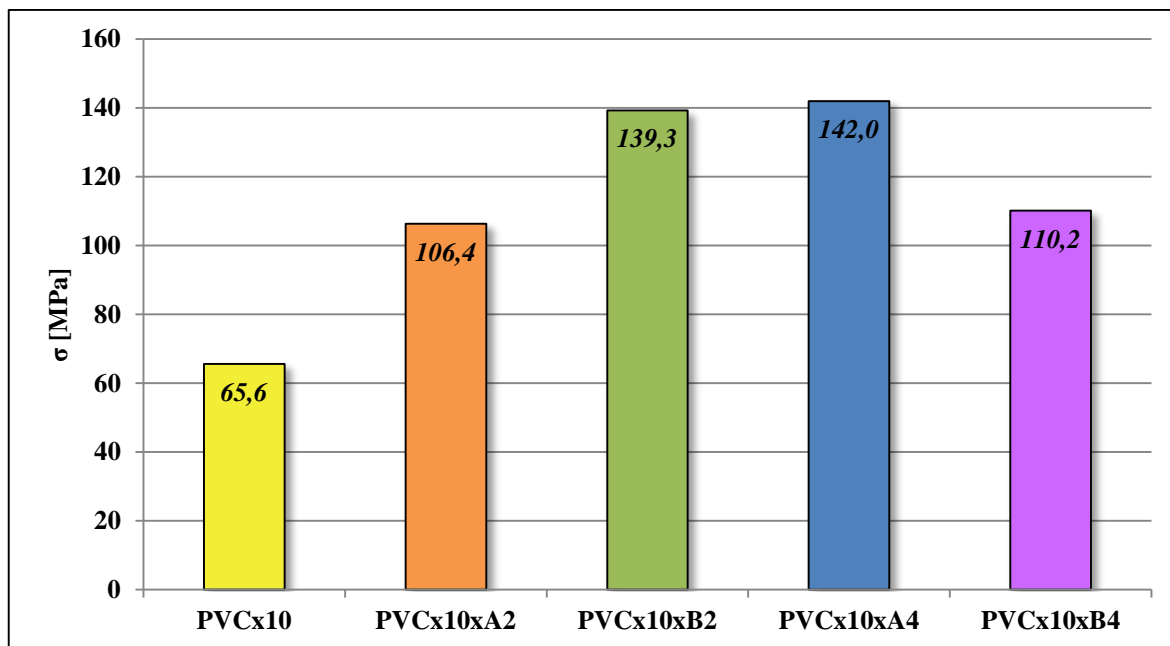


❖ Mez pevnosti v tlaku sendvičových konstrukcí s pěnovým jádrem C70.55/10 mm

V Tab. 20 jsou uvedeny statisticky vyhodnocená data pro mez pevnosti v tlaku sendvičových konstrukcí s pěnovým jádrem Airex C70.55/10 mm. U vyztužených sendvičových konstrukcí došlo oproti nevyztuženému sendvičovému panelu (PVCx10), který měl mez pevnosti 65,6 MPa, ke zlepšení u všech modifikací vyztužení. Největší nárůst meze pevnosti vykazoval sendvičový nosník s označením PVCx10xA4, který měl mez pevnosti 142,0 MPa, což je o 116,4 % zlepšení oproti nevyztuženému sendvičovému panelu. Jednotlivé změny meze pevnosti v důsledku vyztužení jsou zaznamenány v následujícím sloupcovém grafu (Obr. 104).

Tab. 20 Mez pevnosti v tlaku sendvičových konstrukcí s pěnovým jádrem Airex C70.55/10 mm

<i>Mez pevnosti v tlaku σ [MPa]</i>							
	\bar{x}	s	MAX	MIN	MED	V [%]	Zlepšení [%]
PVCx10	65,6	10,9	74,6	38,3	71,7	16,7	-
PVCx10xA2	106,4	21,6	125,5	60,8	117,0	20,3	62,1
PVCx10xB2	139,3	8,6	154,0	125,7	139,1	6,2	112,3
PVCx10xA4	142,0	10,9	158,0	124,5	143,4	7,7	116,4
PVCx10xB4	110,2	18,5	141,7	89,4	105,0	16,8	67,9



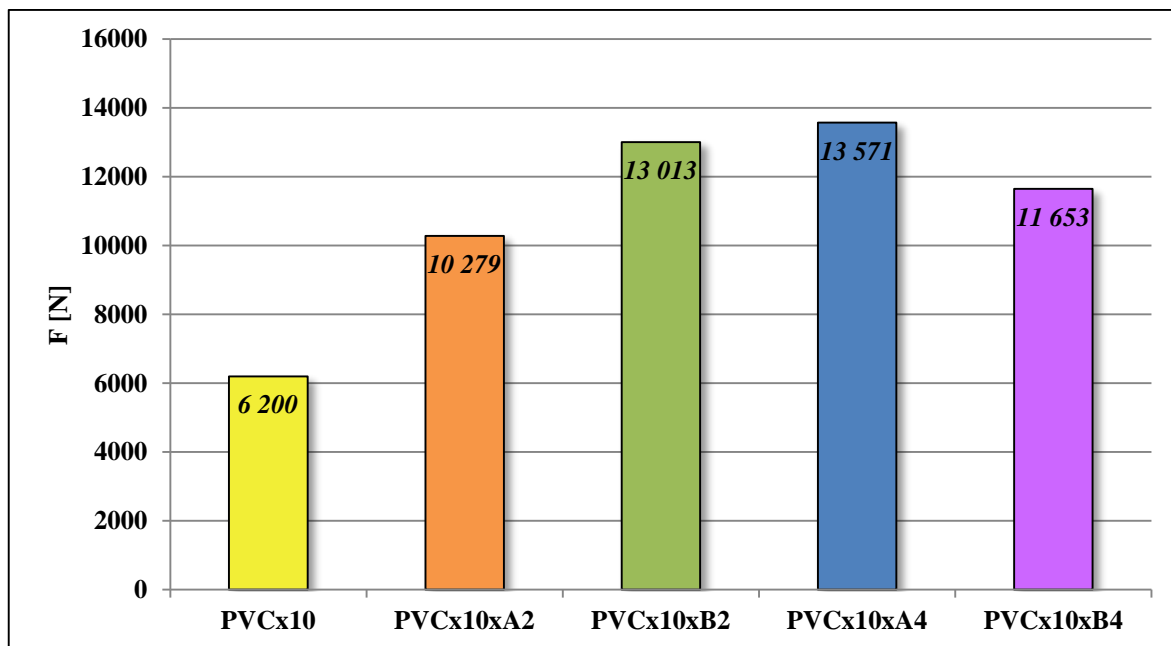
Obr. 104 Grafická interpretace meze pevnosti v tlaku u sendvičových konstrukcí s pěnovým jádrem Airex C70.55/10 mm

❖ Únosnost v tlaku sendvičových konstrukcí s pěnovým jádrem C70.55/10 mm

Statisticky vyhodnocená data únosnosti v tlaku u sendvičových konstrukcí s pěnovým jádrem Airex C70.55/10 mm jsou zaznamenána v Tab. 10. Sendvičový panel bez vyztužení (PVCx10) měl hodnotu únosnosti v tlaku 6200 N. Díky vyztužení polymerními žebry byl zajištěn nárůst únosnosti v tlaku u všech modifikací, z nich největší dosáhl sendvičový panel PVCx10xA4, a to 13571 N, což je o 118,9 % více než původní nevyztužený sendvičový panel. Následující Obr. 105 zobrazuje velikost únosnosti v tlaku jednotlivých typů vyztužení sendvičových konstrukcí a PVC jádrem.

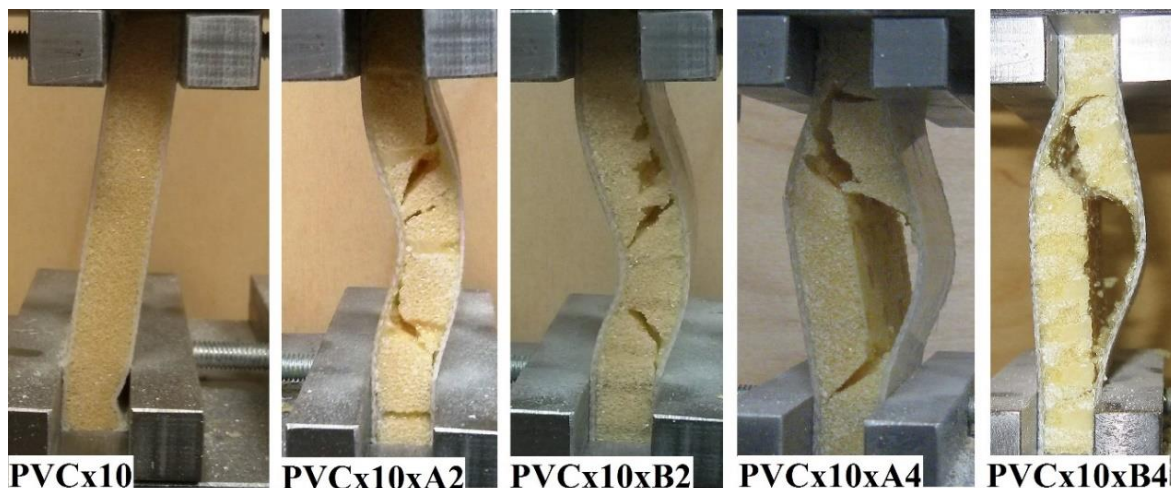
Tab. 21 Únosnost v tlaku sendvičových konstrukcí s pěnovým jádrem Airex C70.55/10 mm

Únosnost v tlaku σ [MPa]							
	\bar{x}	s	MAX	MIN	MED	V [%]	Zlepšení [%]
PVCx10	6200	1030	7000	3660	6675	16,6	-
PVCx10xA2	10279	2031	11900	5760	11100	19,8	65,8
PVCx10xB2	13013	885	14400	11800	12750	6,8	109,9
PVCx10xA4	13571	1044	15100	11900	13700	7,7	118,9
PVCx10xB4	11653	1951	15000	9450	10950	16,8	87,9



Obr. 105 Grafická interpretace únosnosti v tlaku u sendvičových konstrukcí s pěnovým jádrem Airex C70.55/10 mm

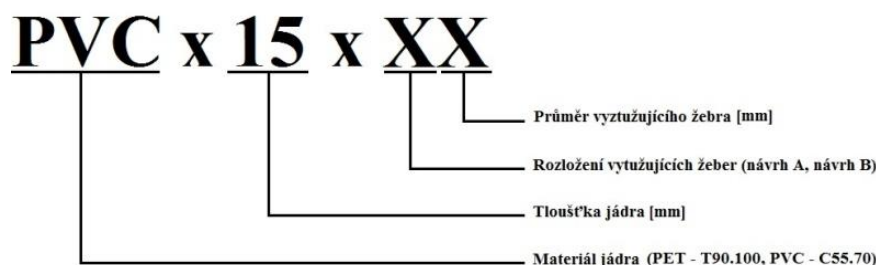
U nevyztuženého sendvičového panelu s pěnovým jádrem Airex C70.55/10 mm došlo ke zvlnění testovacího vzorku. U vyztužených sendvičových panelů polymerními žebry došlo k roztržení pěnového jádra. Poruchy jednotlivých typů sendvičových panelů jsou zobrazeny na následujícím Obr. 106.



Obr. 106 Poruchy při tlakové zkoušce sendvičových konstrukcí s pěnovým jádrem Airex C70.55/10 mm

10.2.3 Tlaková zkouška při působení bočního tlaku u sendvičových konstrukcí s pěnovým jádrem Airex C70.55/15 mm

Označení sendvičových konstrukcí s pěnovým jádrem Airex C70.55/15 mm:

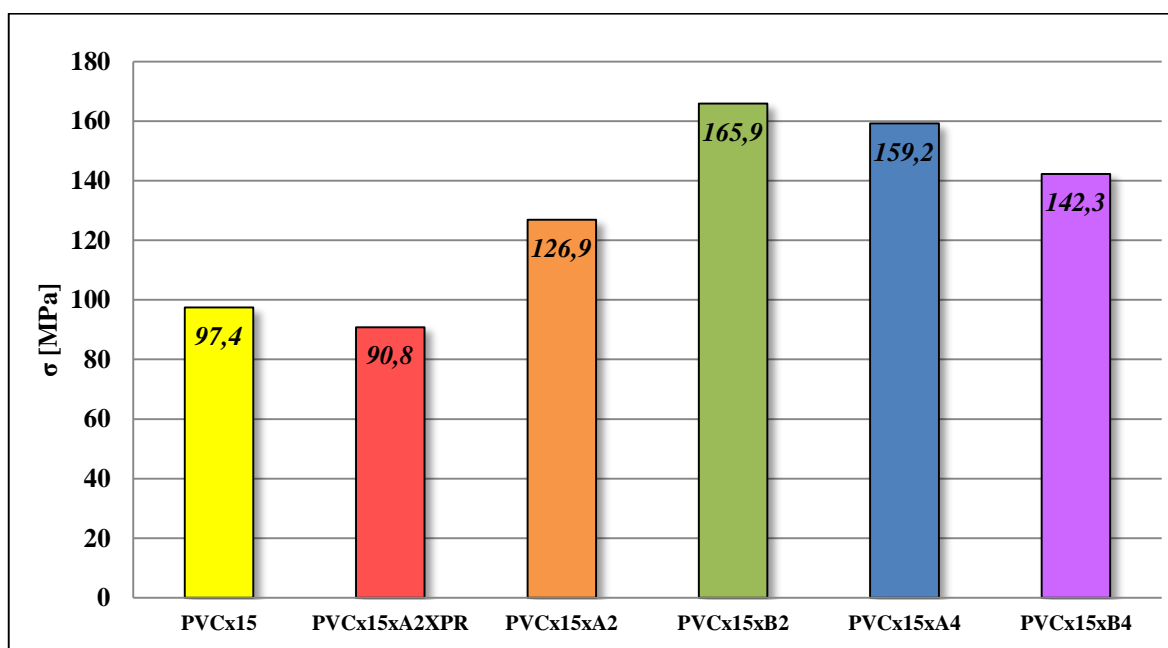


❖ Mez pevnosti v tlaku sendvičových konstrukcí s pěnovým jádrem C70.55/15 mm

V Tab. 22 jsou uvedeny statisticky vyhodnocená data pro mez pevnosti v tlaku sendvičových konstrukcí s pěnovým jádrem Airex C70.55/15 mm. Nevyztužená sendvičová konstrukce (PVCx15) měla mez pevnosti v tlaku 97,4 MPa. U sendvičových konstrukcí vyztužených polymerními žebry bylo zaznamenáno zvýšení meze pevnosti v tlaku, z nichž největší nárůst meze pevnosti v tlaku měla sendvičová konstrukce s označením PVCx15xB2, jejíž hodnota narostla až na 159,2 MPa, což je o 63,4 % více než nevyztužený sendvičový panel. Sendvičový panel, jehož jádro bylo prošívané skleněným vláknem (PVCx15xA2xPR), měl o 6,8% menší mez pevnosti v tlaku, než nevyztužený sendvičový panel. Také byl tento panel srovnáván s vyztuženým sendvičovým panelem bez prošívání (PVCx15xA2), který měl mez pevnosti v tlaku 126,9 MPa a tudíž byla jeho mez pevnosti o 39,7 % vyšší než u sendvičového panelu s prošíváním. Sloupcový graf (Obr. 107) interpretuje jednotlivé změny meze pevnosti v tlaku sendvičových konstrukcí s PVC jádrem.

Tab. 22 Mez pevnosti v tlaku sendvičových konstrukcí s pěnovým jádrem Airex C70.55/15 mm

Mez pevnosti v tlaku σ [MPa]							
	\bar{x}	s	MAX	MIN	MED	V [%]	Zlepšení [%]
PVCx15	97,4	13,9	114,6	68,4	102,2	14,3	-
PVCx15xA2XPR	90,8	12,4	106,3	63,9	90,9	13,6	-6,8
PVCx15xA2	126,9	25,4	159,6	87,1	126,3	20,0	30,2
PVCx15xB2	165,9	5,3	177,8	158,3	166,5	3,2	70,3
PVCx15xA4	159,2	16,3	180,4	131,7	158,0	10,3	63,4
PVCx15xB4	142,3	20,5	173,1	113,3	150,9	14,4	46,1



Obr. 107 Grafická interpretace meze pevnosti v tlaku u sendvičových konstrukcí s pěnovým jádrem Airex C70.55/15 mm

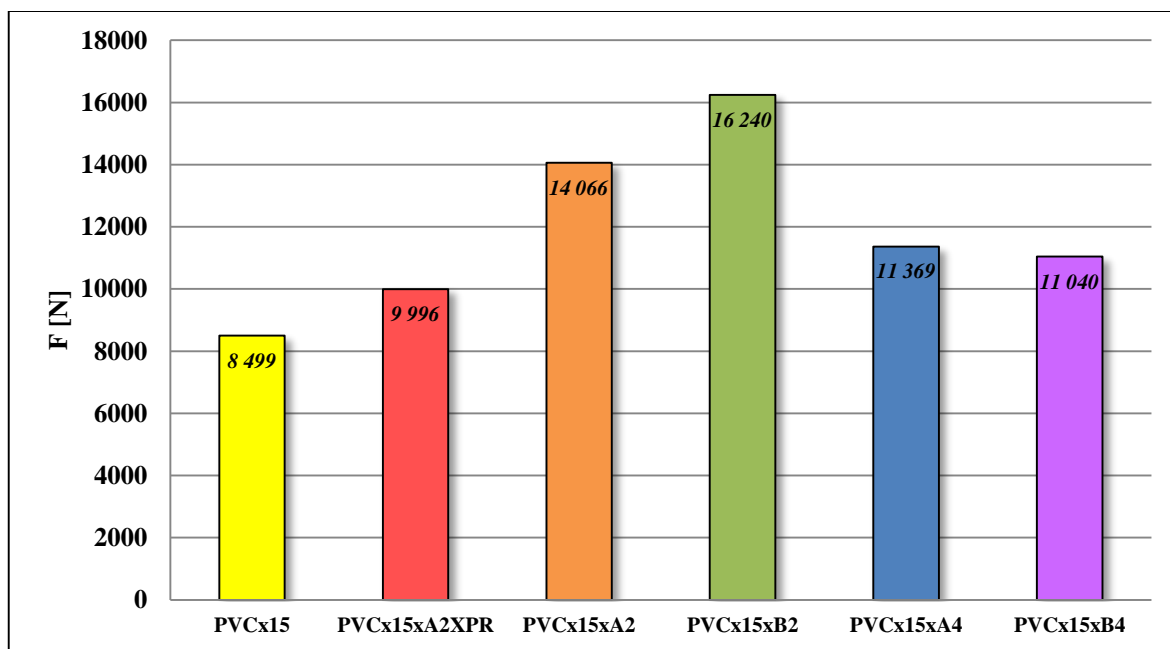
❖ Únosnost v tlaku sendvičových konstrukcí s pěnovým jádrem C70.55/15 mm

V Tab. 23 jsou uvedeny statisticky vyhodnocená data pro únosnost v tlaku sendvičových konstrukcí s pěnovým jádrem Airex C70.55/15 mm. Nevyztužený sendvičový panel (PVCx15) měl hodnotu únosnosti v tlaku 8499 N. Všechny modifikace vyztužení dosáhly větší únosnosti v tlaku, než nevyztužený sendvičový panel. Největší únosností v tlaku disponoval sendvičový panel s označením PVCx10xB2, který měl hodnotu únosnosti v tlaku 16240 N, což je o 91,1 % více než nevyztužený sendvičový panel. Sendvičový panel vyztužený prošitím jádra skleněným vláknem (PVCx15xA2xPR) měl únosnost

v tlaku 9996 N, což je o 40,7 % méně, než vyztužený sendvičový panel bez prošíání (PVCx15xA2), který měl únosnost v tlaku 14066 N. Sloupcový graf (Obr. 108) graficky interpretuje zvyšující se únosnost v tlaku v závislosti na průměru vyztužujícího žebra a také na počtu vyztužujících žebor.

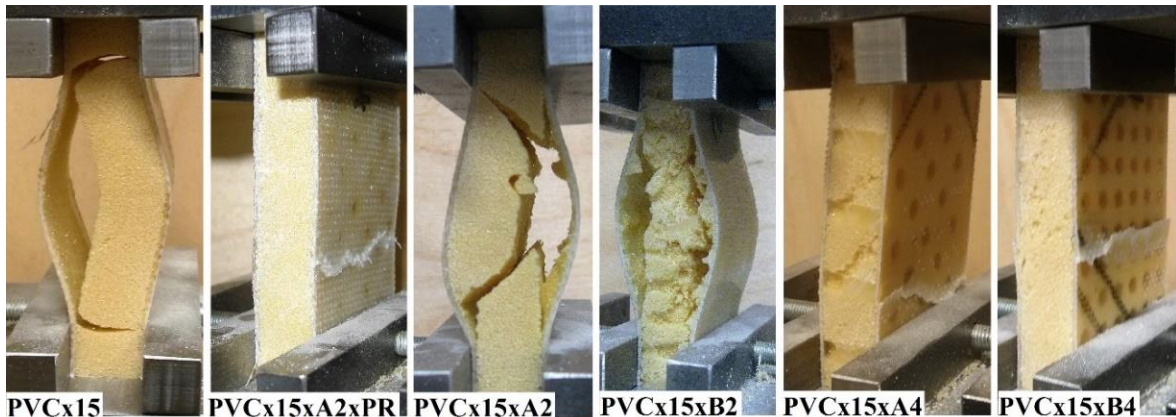
Tab. 23 Únosnost v tlaku sendvičových konstrukcí s pěnovým jádrem Airex C70.55/15 mm

Únosnost v tlaku σ [MPa]							
	\bar{x}	s	MAX	MIN	MED	V [%]	Zlepšení [%]
PVCx15	8499	1271	9560	5890	9090	15,0	-
PVCx15xA2XPR	9996	1362	11700	7030	10050	13,6	65,5
PVCx15xA2	14066	2813	17700	9660	14000	20,0	91,1
PVCx15xB2	16240	522	17400	15500	16300	3,2	33,8
PVCx15xA4	11369	933	12700	9980	11600	8,2	29,9
PVCx15xB4	11040	1188	12400	9150	11300	10,8	17,6



Obr. 108 Grafická interpretace únosnosti v tlaku u sendvičových konstrukcí s pěnovým jádrem Airex C70.55/15 mm

Na Obr. 109 jsou znázorněny poruchy při tlakové zkoušce jednotlivých modifikací sendvičových konstrukcí s pěnovým jádrem Airex C70.55/15 mm. U nevyztuženého sendvičového panelu došlo k delaminaci vnější krycí vrstvy. U sendvičové konstrukce s prošitým pěnovým jádrem došlo k prasknutí vnější krycí vrstvy. Stejná porucha nastala také u sendvičových panelů s průměrem vyztužujících žebek 4 mm. U sendvičových panelů s vyztužujícími žebry o průměru 2 mm došlo k roztržení pěnového jádra.



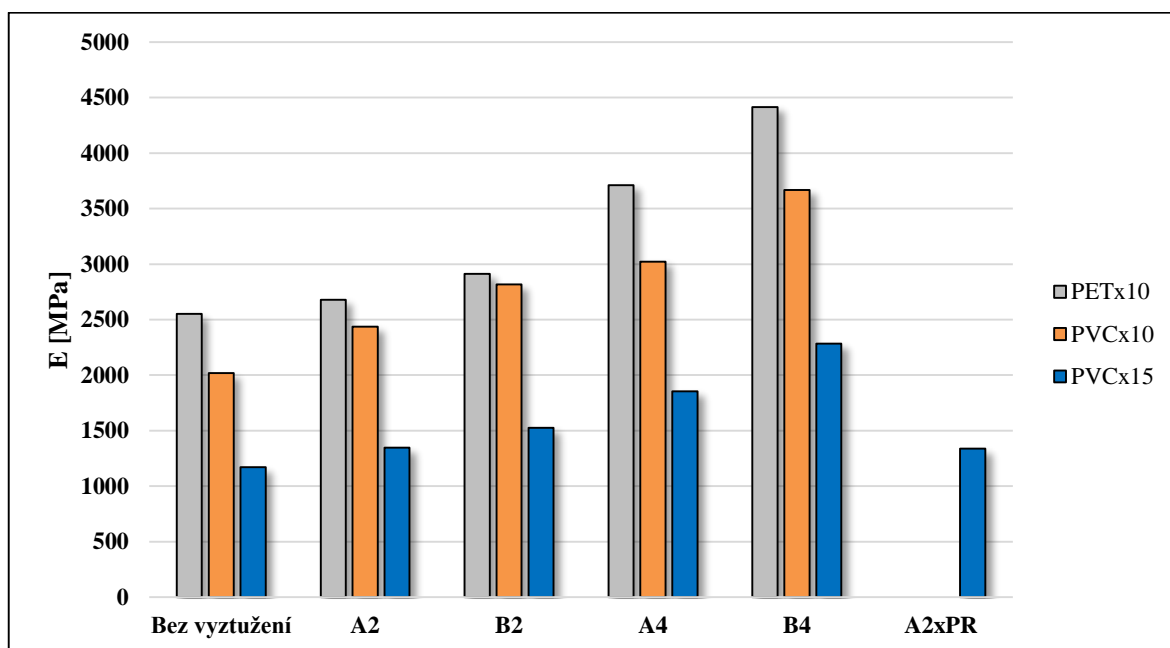
*Obr. 109 Poruchy při tlakové zkoušce sendvičové konstrukce
s pěnovým jádrem Airex C70.55/15 mm*

11 VÝSLEDKY A DISKUZE

11.1 Efekt vyztužení pěnového jádra polymerními žebry při tříbodovém ohybovém zatížení

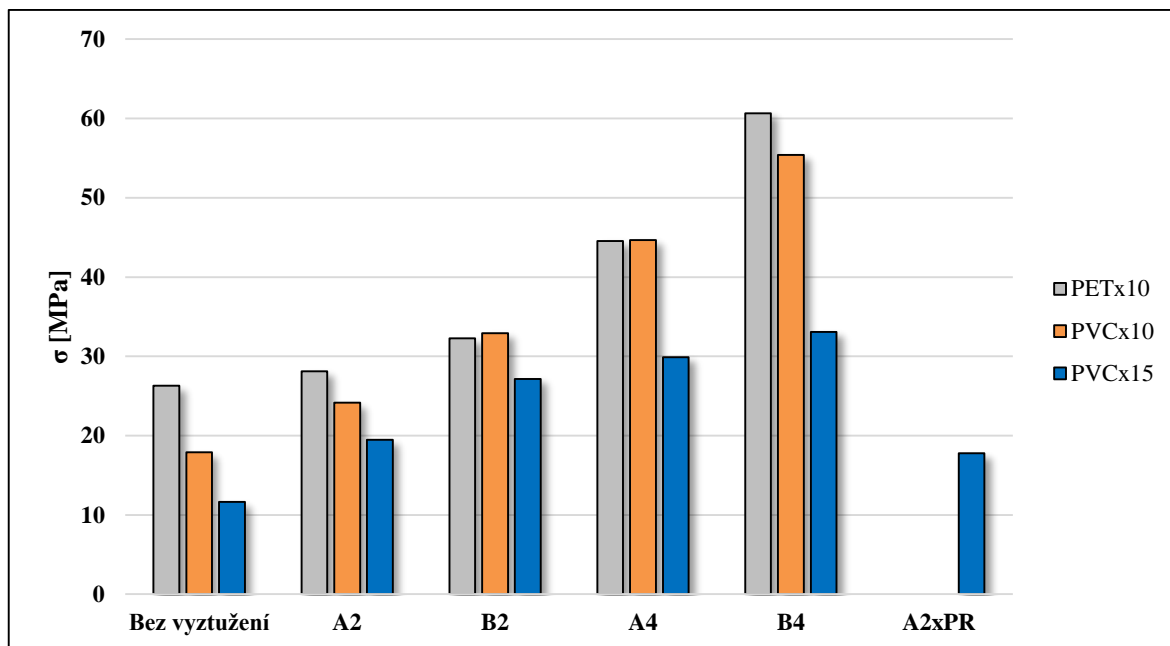
Experimentálním měřením bylo sledováno chování nevyztuženého sendvičového panelu a vyztuženého sendvičového panelu při tříbodovém ohybovém testu.

V následujícím grafu (Obr. 110) jsou srovnány jednotlivé hodnoty efektivního modulu pružnosti. Je patrné, že nejvyšší hodnoty efektivního modulu pružnosti vykazovaly sendvičové konstrukce s pěnovým jádrem Airex T90.100, z nichž největší efektivní modul pružnosti v ohybu měl sendvičový panel s označením PETx10xB4, jehož hodnota efektivního modulu pružnosti byla 4413 MPa. Naopak nejmenší hodnoty efektivního modulu pružnosti vykazovaly sendvičové panely s pěnovým jádrem Airex C70.55.



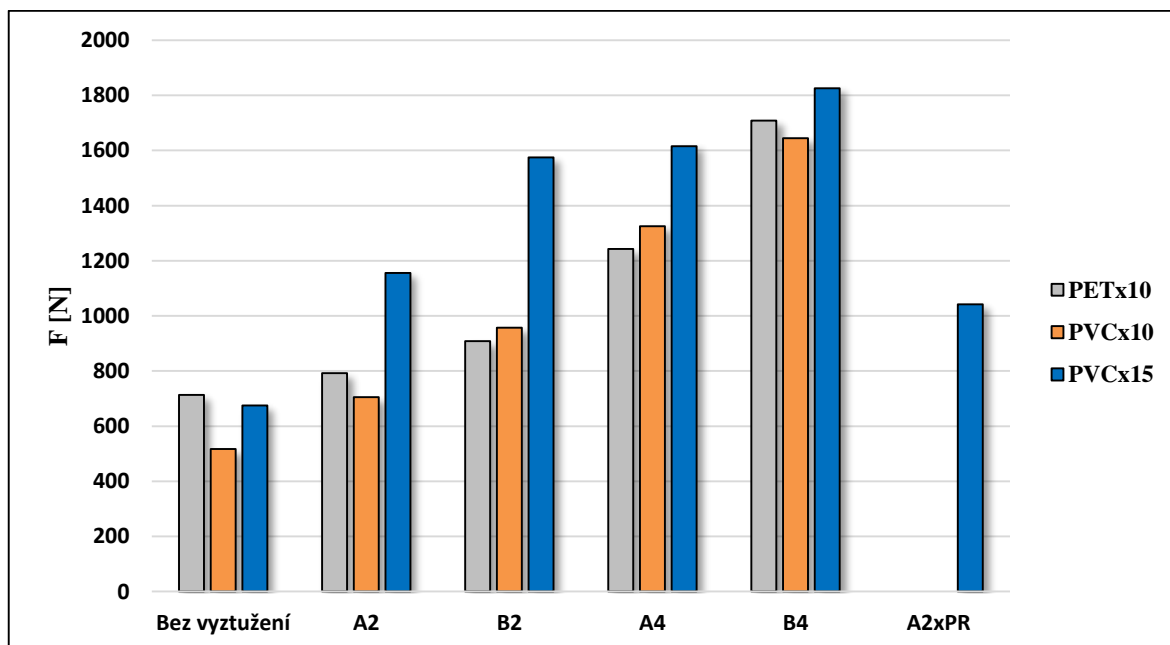
Obr. 110 Grafická interpretace efektivního modulu pružnosti v ohybu všech sendvičových nosníků

Ve sloupcovém grafu (Obr. 111) je názorně vyobrazeno srovnání mezi pevnostmi všech testovaných sendvičových nosníků. Sendvičové konstrukce s pěnovým jádrem Airex C70.55/10 mm vykazovaly téměř shodné napětí meze pevnosti v ohybu se sendvičovými panely s pěnovým jádrem Airex T90.100, které vykazovaly největší hodnoty meze pevnosti v ohybu. Největší mez pevnosti v ohybu vykazoval sendvičový panel s označením PETx10xB2 jeho hodnot meze pevnosti byla 60,6 MPa.



Obr. 111 Grafická interpretace meze pevnosti v ohybu všech sendvičových panelů

Jak je znázorněno v následujícím sloupcovém grafu (Obr. 112), největší únosnost v ohybu vykazoval sendvičový panel s pěnovým jádrem Airex C70.55/ 15 mm. Největší únosnost v ohybu měl sendvičový panel s označením PVCx15xB4, který vykazoval únosnost v ohybu 1826 N.

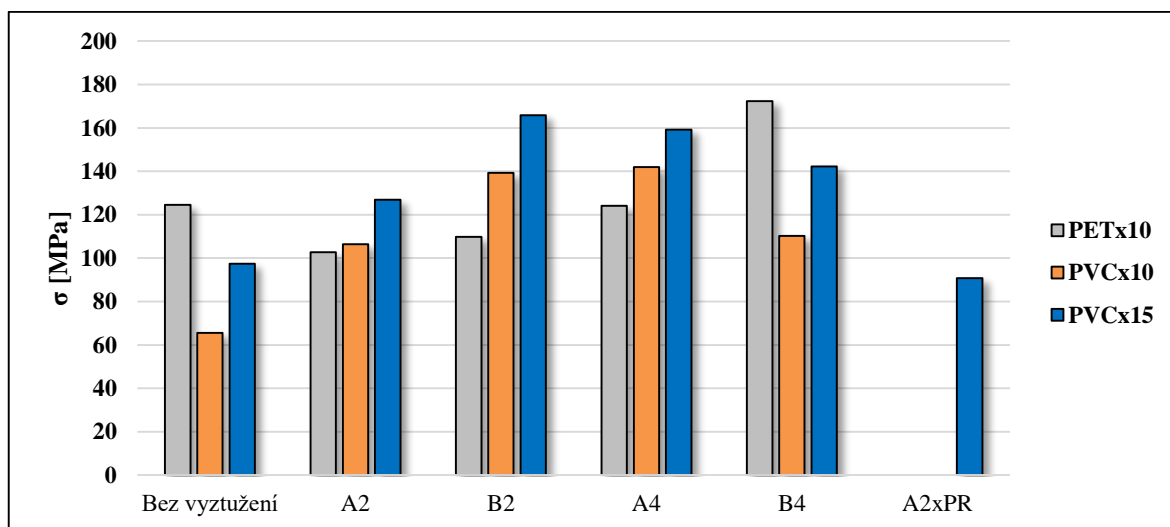


Obr. 112 Grafická interpretace únosnosti v ohybu všech sendvičových panelů

11.2 Efekt vyztužení pěnového jádra u tlakové zkoušky při působení bočního tlaku

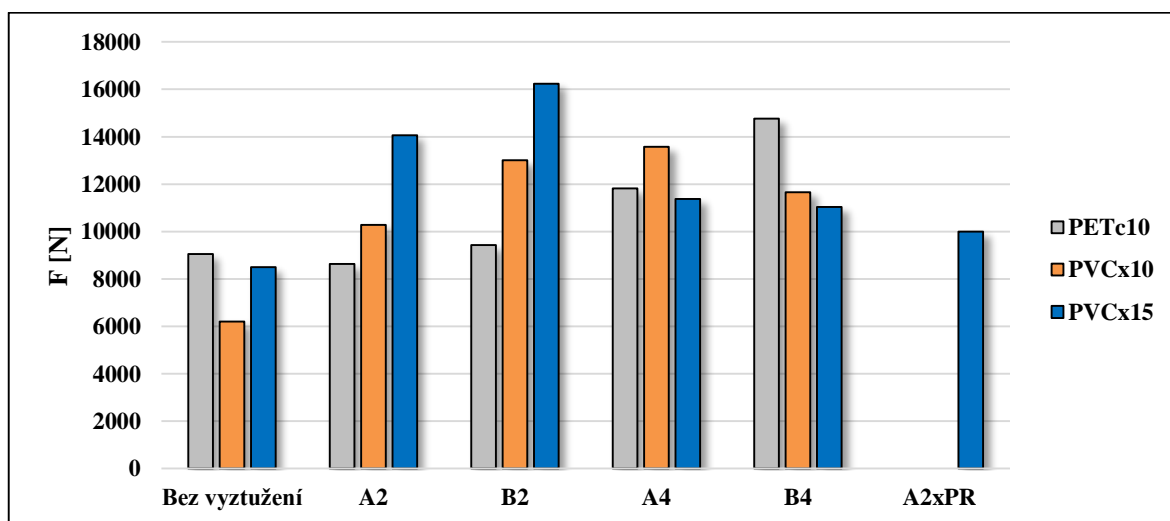
Bylo sledováno chování nevyztuženého sendvičového panelu a vyztuženého sendvičového panelu u tlakové zkoušky při působení bočního tlaku.

V následujícím grafu (Obr. 113) je znázorněno srovnání hodnot meze pevnosti jednotlivých sendvičových panelů. Největší mez pevnosti v tlaku vykazoval sendvičový panel s označením PETx10xB4, jehož hodnota meze pevnosti v tlaku byla 172,3 MPa.



Obr. 113 Grafická interpretace meze pevnosti v tlaku všech sendvičových panelů

Sloupcový graf (Obr. 114) zobrazuje srovnání hodnot únosnosti v tlaku všech modifikací sendvičových konstrukcí. Největší únosnost v tlaku vykazoval sendvičový panel s označením PVCx15xB2, který měl hodnotu únosnosti v tlaku 16240 N.



Obr. 114 Grafická interpretace únosnosti v tlaku všech sendvičových panelů

ZÁVĚR

Cílem diplomové práce byl výzkum možnosti vyztužení pěnového jádra v sendvičových konstrukcích polymerními žebry. Úkolem bylo zjistit, jaký vliv na vlastnosti bude mít vyztužení pěnového jádra sendvičové konstrukce a porovnat tyto vlastnosti se sendvičovou konstrukcí bez vyztužení pěnového jádra.

Do pěnových materiálů byly připraveny otvory pro polymerní vyztužující žebra. Sendvičové panely bez vyztužení, které sloužili jako etalonový materiál, byly vyrobeny ruční laminací a poté stlačeny pod fólií. Sendvičové konstrukce s vyztuženým pěnovým jádrem byly vyrobeny vakuovou infuzí, díky čemuž vznikly v pěnovém jádru vyztužující žebra. Vyztužující žebra vznikly vytvrzením epoxidové pryskyřice, která se také používala jako matrice pro kompozitové vnější krycí vrstvy. Dále byl vyroben jeden sendvičový panel, jehož pěnové jádro bylo prošito rovingem skleněných vláken. Celkem bylo vyrobeno šestnáct modifikací sendvičových konstrukcí, u kterých se dále testovaly vlastnosti.

Vyrobené testovací tělesa sendvičových konstrukcí podstoupily třibodovou ohybovou zkoušku a tlakovou zkoušku za působení bočního tlaku. Při ohybovém testování se stanovovaly hodnoty mechanických vlastností, mezi které patří modul pružnosti v ohybu, mez pevnosti v ohybu a únosnost v ohybu. Z výsledků zkoušky bylo vypořádováno, že se všechny jmenované hodnoty mechanických vlastností, vlivem vyztužení pěnového jádra, velmi efektivně zvyšují. Největší zlepšení mechanických vlastností oproti sendvičové konstrukci bez vyztužení bylo zaznamenáno u sendvičových konstrukcí, které měly největší průměr žebor a rozložení polymerních žebor bylo co nejhustější. U těchto sendvičových konstrukcí se velmi značně zvýšil modul pružnosti v ohybu, mez pevnosti v ohybu i únosnost v ohybu v průměru.

Z tlakové zkoušky při působení bočního tlaku se zjišťovaly hodnoty meze pevnosti v tlaku a únosnosti v tlaku. U materiálu pěnového jádra Airex T90.100 bylo zjištěno, že vyztužení malými průměry vyztužujících žebor zhoršilo mechanické vlastnosti v tlaku oproti nevyztužené sendvičové konstrukci. Vyztužení většími průměry vyztužujících žebor přineslo zlepšení mechanických vlastností v tlaku. U sendvičových konstrukcí s pěnovým jádrem Airex C70.55 bylo zjištěno zlepšení mechanických vlastností v tlaku u všech modifikací vyztužení polymerními žebry. Nejlepší vlastnosti v tlaku vykazoval sendvičový panel, který měl malý průměr vyztužujících žebor, ale hustější rozložení, jehož mez

pevnosti v tlaku a únosnost v tlaku se ve srovnání se sendvičovým panelem bez vyztužení zlepšily téměř dvojnásobně, spolu se sendvičovým panelem, který měl řidší rozložení vyztužujících žeber s větším průměrem, jehož mez pevnosti v tlaku a únosnost v tlaku se zlepšila více jak dvojnásobně.

Z celkových výsledků lze usoudit, že vyztužující žebra v pěnovém jádru sendvičové konstrukce velmi efektivně zlepšují vlastnosti ve srovnání se sendvičovou konstrukcí, jejich pěnové jádro bylo bez vyztužení. Je nutné však podotknout, že vyztužující žebra mají nepříznivý vliv na hmotnost vyztužených sendvičových konstrukcí. U sendvičových panelů s malými průměry vyztužujících žeber není nárůst hmotnosti příliš razantní. U sendvičových panelů s většími vyztužujícími žebry je nárůst hmotnosti téměř dvojnásobný. Je také potřeba zvládnout samotnou technologii výroby pomocí vakuové infuze, neboť je velmi náročná. V technické praxi by bylo bezpochyby dosaženo ještě příznivějších vlastností, jelikož by došlo zajisté k výrobě zcela bez chyb a suchých míst.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] PETRAS, Achilles. *Design of Sandwich Structures*. Cambridge, 1998. Dizertační práce. Cambridge University.
- [2] Sendvičové konstrukce. In: *MM spektrum* [online]. 2001 [cit. 2016-02-03]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/sendvicove-konstrukce.htm>
- [3] KOINMO – CREATING OPPORTUNITIES BETWEEN EUROPE AND ASIA. *2nd shipment of Aluminium Honeycomb Roof project* [online]. [cit. 2016-03-07]. Dostupné z: <http://www.koinmo.com/index.php?section=news&cmd=details&newsid=50>
- [4] *DIAB guide to core and sandwich* [online]. 2012 [cit. 2016-03-07]. Dostupné z: http://www.diabgroup.com/~media/Files/Manuals-Guides/DIAB-guide-to-Core-and-sandwich_P1r2-locked.pdf
- [5] Hexel. *HexWeb HONEYCOMB SANDWICH DESIGN TECHNOLOGY* [online]. [cit. 2016-03-07]. Dostupné z: http://www.hexcel.com/Resources/DataSheets/Brochure-Data-Sheets/Honeycomb_Sandwich_Design_Technology.pdf
- [6] FORM. *Výroba sendvičových panelů* [online]. [cit. 2016-03-07]. Dostupné z: <http://www.form-composite.com/sendvicove-panely>
- [7] DAVIES, J. *Lightweight sandwich construction*. Malden, MA: Blackwell Science, 2001, xiv, 370 p. ISBN 0-632-04027-0.
- [8] NORDIC INDUSTRIAL FUND. ED.: D. ZENKERT. *The handbook of sandwich construction*. Cradley Heath, West Midlands: Engineering Materials Advisory Services Ltd. (EMAS), 1997. ISBN 0947817964.
- [9] JANČÁŘ, Josef. *Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitů*. 1. vyd. Brno: VUT, 2003, 194 s. ISBN 80-214-2443-5.
- [10] DAŘOUREK, Karel. *Kompozitní materiály - druhy a jejich užití*. Vyd. 1. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2007, 114 s. ISBN 978-80-7372-279-1.
- [11] Fibtex Co.,Ltd. *Gypsum Roving* [online]. 2007 [cit. 2016-03-07]. Dostupné z: <http://www.fiberglass.name/newsinfo.asp?ArticleID=69>
- [12] BOKATECH Composite Solutions. *BOKATECH/PRODUKTY* [online]. 2012 [cit. 2016-03-07]. Dostupné z: <http://www.bokatech.cz/produkty/>

- [13] BUCŇÁK, Ondřej. *ANALÝZA SENDVIČOVÝCH STRUKTUR METODOU KONEČNÝCH PRVKŮ* [online]. Brno, 2014 [cit. 2016-03-07]. VUT Brno. Vedoucí práce Ing. MICHAL MALIŠ, Ph.D.
- [14] *DEFINICE, HISTORIE A POUŽITÍ KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ U LODÍ, LETADEL AUTOMOBILŮ A V KOSMICKÉ TECHNICE* [online]. [cit. 2016-02-03]. Dostupné z: <http://mujweb.cz/zkorinek/historie.pdf>
- [15] EHRENSTEIN, Gottfried W. *Polymerní kompozitní materiály*. V ČR 1. vyd. Praha: Scien-tia, 2009, 351 s. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [16] SKOČOVSKÝ, Petr, Peter PALČEK, Radomila KONEČNÁ a Ladislav VÁRKOLY. *Konstrukční materiály*. Žilinská univerzita v Žilině, 2000. ISBN 9788071006084.
- [17] Ústav materiálových věd a inženýrství. *Kompozitní materiály* [online]. Brno [cit. 2016-03-07]. Dostupné z: <http://ime.fme.vutbr.cz/images/umvi/vyuka/bum/prednasky/11-BUM%20-%20kompozitni%20materialy.pdf>
- [18] Fibre Glast. *What Are Prepregs?* [online]. [cit. 2016-02-03]. Dostupné z: http://www.fibreglast.com/product/about-prepregs/Learning_Center
- [19] 5M. *SEMIPREG / PREPREG* [online]. [cit. 2016-02-03]. Dostupné z: <http://www.5m.cz/cz/semipreg-prepreg-1/>
- [20] TopDřevo.cz. *Překližky PDP* [online]. 2013 [cit. 2016-03-07]. Dostupné z: <http://www.topdrevo.cz/?preklizky-pdp,7>
- [21] DŘEVO Spirit Of Angmar & Bithynie. *BALSA (Ochroma pyramidale)* [online]. [cit. 2016-02-03]. Dostupné z: <http://prace-se-drevem.spibi.cz/Drevo-Druhy-Balsa.html>
- [22] NauticEXPO. *Kuiper Dutch Marine Panels* [online]. 2016 [cit. 2016-03-07]. Dostupné z: <http://www.nauticexpo.com/prod/kuiper-dutch-marine-panels/product-28939-365832.html>
- [23] 56SPACES. *Cork* [online]. 2016 [cit. 2016-03-07]. Dostupné z: <http://www.56spaces.com/cork-flooring/cork-flooring-2/>
- [24] Hexel. *HexWeb™ Honeycomb Attributes and Properties* [online]. 1999 [cit. 2016-03-07]. Dostupné z: http://www.hexcel.com/Resources/DataSheets/Brochure-Data-Sheets/Honeycomb_Attributes_and_Properties.pdf

- [25] *Global Honeycomb Sandwich Market Size, Trends and Forecast 2014 - 2021* [online]. 2015 [cit. 2016-02-03]. Dostupné z: <https://www.linkedin.com/pulse/global-honeycomb-sandwich-market-size-trends-forecast-shilpa-arora>
- [26] Posterus. *Bunkové telesá – Penové materiály II. Výroba bunkových telies* [online]. 2010 [cit. 2016-02-03]. Dostupné z: <http://www.posterus.sk/?p=7871>
- [27] THE ROYAL SOCIETY Publishing. *Multifunctional periodic cellular metals* [online]. 2005 [cit. 2016-03-07]. Dostupné z: <http://rsta.royalsocietypublishing.org/content/364/1838/31>
- [28] Posterus. *Bunkové telesá – Penové materiály I. Úvod, štruktúra, aplikácie* [online]. 2010 [cit. 2016-03-07]. Dostupné z: <http://www.posterus.sk/?p=7861>
- [29] MALLICK, P.K. a S NEWMAN. *Composite Materials Technology: Processes and Properties*. Hanser Gardner Pubns, 1991. ISBN 978-3446156845.
- [30] KNOT, Tomáš. *CNC obrábění a technologie přípravy tvarově složitých sendvičových jader*. Zlín, 2011. Bakalářská práce. UTB ve Zlíně.
- [31] WiseGEEK. *What is a Polystyrene Foam?* [online]. [cit. 2016-02-03]. Dostupné z: <http://www.wisegeek.com/what-is-a-polystyrene-foam.htm>
- [32] NetComposites. *PVC Foam* [online]. [cit. 2016-02-03]. Dostupné z: <http://www.netcomposites.com/guide-tools/guide/core-materials/pvc-foam>
- [33] Armacell. *PET Foams - The Lightweight Core For Strong Structures* [online]. 2016 [cit. 2016-03-07]. Dostupné z: <http://www.armacell-core-foams.com/www/armacell/INETArmacell.nsf/standard/DC2C5D13EA92BD46802576E200526C26>
- [34] CompositesWorld. *Getting To The Core Of Composite Laminates* [online]. 2003 [cit. 2016-03-07]. Dostupné z: <http://www.compositesworld.com/articles/getting-to-the-core-of-composite-laminates>
- [35] Gurit. *GUIDE TO COMPOSITES* [online]. 2016 [cit. 2016-03-07]. Dostupné z: <http://www.gurit.com/guide-to-composites.aspx>
- [36] HAVEL Composites. *Technologie jejich popis a schémata* [online]. [cit. 2016-02-03]. Dostupné z: <http://www.havel-composites.com/clanky/4-Technologie/76-Technologie-jejich-popis-a-schemata.html>

- [37] Kompozity - Doc. Ing. Zdeněk Kořínek, CSc. *Technologie* [online]. [cit. 2016-03-07]. Dostupné z: <http://mujweb.cz/zkorinek/technologie.pdf>
- [38] PERFORMANCE COMPOSITES Inc. *Vacuum Infusion Process (VIP) Guide* [online]. [cit. 2016-03-07]. Dostupné z: <http://www.performancecomposites.com/about-composites-technical-info/125-resin-vacuum-infusion.html>
- [39] RUSNÁKOVÁ Soňa. *Přednášky z předmětu zpracovatelské inženýrství kompozitů T5ZIK*; FT UTB. 2012
- [40] M.A.T. *Vacuum Assisted Infusion* [online]. 2006 [cit. 2016-03-07]. Dostupné z: <http://www.mat.com.tr/vacuum-assisted-infusion>
- [41] Vacmobiles.com. *What is resin infusion (or vacuum infusion)?* [online]. 2012 [cit. 2016-03-07]. Dostupné z: http://www.vacmobiles.com/resin_infusion.html
- [42] ŠUBA, Oldřich. *Dimenzování a navrhování výrobků z polymerů*. Vyd. 3. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2010, 112 s. ISBN 978-80-7318-948-8.
- [43] *Flatwise compression and flexural behavior of foam core and polymer pin-reinforced foam core composite sandwich panels* [online]. 2014, , 7 [cit. 2016-02-03]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0020740314002690>
- [44] *Enhanced mechanical performance of foam core sandwich composites with through the thickness reinforced core*[online]. 2015, , 9 [cit. 2016-02-03]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/journal/13598368>
- [45] *Plastics Engineering: Composites 2015 Reinforced plastics build bridges-and more*. 2015, (5).
- [46] CompositesWorld. *Aiming infusion at the application* [online]. 2013 [cit. 2016-03-07]. Dostupné z: <http://www.compositesworld.com/articles/aiming-infusion-at-the-application>
- [47] *Mechanické vlastnosti* [online]. [cit. 2016-02-03]. Dostupné z: http://www.ateam.zcu.cz/mechanicke_vlastnosti.pdf
- [48] ASTM C297 / C297M-15, *Standard Test Method for Flatwise Tensile Strength of Sandwich Constructions*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015
- [49] ASTM C273 / C273M-11, *Standard Test Method for Shear Properties of Sandwich Core Materials*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2011

- [50] ASTM C393 / C393M-11e1, *Standard Test Method for Core Shear Properties of Sandwich Constructions by Beam Flexure*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2011
- [51] *Zkouška pevnosti o ohybu* [online]. [cit. 2016-02-03]. Dostupné z: http://www.person.vsb.cz/archivcd/FMMI/ZPKM/Multimedia/kap3_2/animace/zkouška%20pevnosti%20v%20ohybu.swf
- [52] Hexel. *HexPly® Prepreg Technology* [online]. [cit. 2016-03-07]. Dostupné z: http://www.hexcel.com/Resources/DataSheets/Brochure-Data-Sheets/Prepreg_Technology.pdf
- [53] ČSN EN ISO 6603-1. *Plasty - Stanovení chování tuhých plastů při víceosém rázovém namáhání - Část 1: Neinstrumentovaná rázová zkouška*. Litvínov: Český normalizační institut, 2000.
- [54] ASTM C364 / C364M-07(2012), *Standard Test Method for Edgewise Compressive Strength of Sandwich Constructions*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012
- [55] *Přírodovědecká fakulta UJEP v Ústí nad Labem* [online]. [cit. 2016-05-05]. Dostupné z: <http://physics.ujep.cz/~inastoup/lib/exe/fetch.php?media=statistika1.pdf>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

σ	Napětí [MPa]
W	Šířka zkušební vzorku [mm]
L	Délka zkušební vzorku [mm]
t	Tloušťka zkušební vzorku [mm]
M	Ohybový moment [N.mm]
F	Zatěžující síla [N]
W	Modul průřezu [mm ³]
t _f	Tloušťka vnější krycí vrstvy [mm]
m	Hmotnost [g]
E	Modul pružnosti [MPa]
\bar{x}	Aritmetický průměr [-]
s	Směrodatná odchylka [-]
MAX	Maximální hodnota [-]
MIN	Minimální hodnota [-]
MED	Medián [-]
V	Variační koeficient [-]

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1 Ukázka sendvičové struktury [3]</i>	12
<i>Obr. 2 Srovnání sendvičové konstrukce s I-nosníkem [4]</i>	13
<i>Obr. 3 Příklad použití sendvičové konstrukce [6] a) použití v dopravním průmyslu, b) použití při stavbě hal</i>	13
<i>Obr. 4 Roving [11]</i>	16
<i>Obr. 5 Vyztužující rohož [12]</i>	16
<i>Obr. 6 Druhy vazeb tkaniny [13] a) plátňová vazba, b) keprová vazba, c) atlasová vazba</i>	17
<i>Obr. 7 Příklad skleněných vláken</i>	18
<i>Obr. 8 Uhlíkové vlákno</i>	19
<i>Obr. 9 Příklad skladby symetrického laminátu [17]</i>	21
<i>Obr. 10 Ukázka prepregu [19]</i>	22
<i>Obr. 11 Dřevěná překližka</i>	22
<i>Obr. 12 Typy tvaru jádra sendvičové konstrukce [7]</i>	23
<i>Obr. 13 Příklad sendvičové konstrukce s balsovým jádrem [22]</i>	24
<i>Obr. 14 Korek [23] a) výroba korku, b) korkové jádro, c) struktura korku</i>	24
<i>Obr. 15 Ukázka sendvičové konstrukce s voštinovým jádrem [15]</i>	25
<i>Obr. 16 Vybrané tvary buněk voštinových materiálů [24] a) šestihranná buňka, b) buňka OX-core, c) buňka Flex-core</i>	26
<i>Obr. 17 Výroba voštin tvarováním [27]</i>	27
<i>Obr. 18 Výroba voštin metodou HOBE [27]</i>	28
<i>Obr. 19 Výroba voštin skládáním pásů [27] a) čtvercová voština, b) trojúhelníková voština</i>	28
<i>Obr. 20 Ukázka buňkové struktury [29] a) Otevřené buňky, b) Uzavřené buňky</i>	29
<i>Obr. 21 a) Ruční kladení, b) Stříkání laminátů [35]</i>	32
<i>Obr. 22 Výroba sendvičové konstrukce lisováním ve vyhřívaném lisu [5]</i>	35
<i>Obr. 23 Výroba sendvičové konstrukce vytvrzováním v uzavřené formě [5]</i>	36
<i>Obr. 24 Výroba sendvičové konstrukce vytvrzováním ve vakuové peci [5]</i>	36
<i>Obr. 25 sestava pro vakuovou infuzi [37]</i>	37
<i>Obr. 26 Výroba trupu lodi vakuovou infuzí [40]</i>	38
<i>Obr. 27 Princip vakuové infuze [41]</i>	40
<i>Obr. 28 Srovnání nevyztužené stěny a sendvičové konstrukce [42]</i>	41

<i>Obr. 29 Jednostranné vyztužení žebry [42]</i>	42
<i>Obr. 30 Typy jednostranného vyztužení [42]</i>	42
<i>Obr. 31 Symetrické vyztužení [42]</i>	42
<i>Obr. 32 Typy symetrického vyztužení [42]</i>	43
<i>Obr. 33 Vyztužení sendvičové konstrukce polymerními kolíky [43]</i>	44
<i>Obr. 34 Vyztužení sendvičové konstrukce prošíáním jádra vlákny [44]</i>	44
<i>Obr. 35 Vyztužení sendvičové konstrukce prokládáním pásů jádra vyztužující tkaninou [46]</i>	45
<i>Obr. 36 Kombinace více technologií vyztužení sendvičové konstrukce [45]</i>	46
<i>Obr. 37 Tahová zkouška sendvičového panelu [8]</i>	48
<i>Obr. 38 Smyková zkouška sendvičového panelu [8]</i>	48
<i>Obr. 39 Tříbodová ohybová zkouška sendvičového panelu [42, 52]</i>	50
<i>Obr. 40 Čtyřbodová ohybová zkouška sendvičového panelu [42]</i>	51
<i>Obr. 41 Rázová zkouška sendvičového panelu [53] 1-zkušební těleso, 2-polokulová narázová plocha, 3-podpěra pro zkušební těleso, 4-upínací kroužek, 5- základna, 6-držák tlouku, 7-systém pro přidržení a uvolnění tlouku, 8-vodící lišta tlouku, 9-tlouk o známé hmotnosti, 10-akustická izolace</i>	51
<i>Obr. 42 Tlaková zkouška sendvičového panelu [8]</i>	52
<i>Obr. 43 Typy porušení sendvičové konstrukce při tlakové zkoušce [5] a) vzpěr, b) zvlnění, c) zvlnění vnější krycí vrstvy a zborcení jádra, d)zvlnění vnější krycí vrstvy</i>	53
<i>Obr. 44 Model rozložení návrhu A s průměrem vyztužujících žeber 4 mm</i>	56
<i>Obr. 45 Model rozložení návrhu A s průměrem vyztužujících žeber 2 mm</i>	57
<i>Obr. 46 Model rozložení návrhu B s průměrem vyztužujících žeber 4 mm</i>	57
<i>Obr. 47 Model rozložení návrhu B s průměrem vyztužujících žeber 2 mm</i>	58
<i>Obr. 48 Vyztužující skleněná tkanina Aeroglass 200 g/m²</i>	59
<i>Obr. 49 Skladba kompozitní vnější krycí vrstvy</i>	59
<i>Obr. 50 Pryskyřice Biresin CR82 a tvrdidlo CH80-1</i>	60
<i>Obr. 51 Tvrdidlo Biresin CH80-1 a pryskyřice Biresin CR80</i>	61
<i>Obr. 52 Pěnové jádro Airex T90.100</i>	62
<i>Obr. 53 Pěnové jádro Airex C70.55</i>	63
<i>Obr. 54 Tvorba CNC programu</i>	65
<i>Obr. 55 Nařezané polotovary pěnového jádra</i>	66

<i>Obr. 56</i>	<i>Výroba otvorů pro vyztužující žebra v pěnovém jádru sendvičové konstrukce</i>	66
<i>Obr. 57</i>	<i>Pěnové jádra s připravenými otvory pro vyztužující žebra</i>	66
<i>Obr. 58</i>	<i>Připravené pěnové jádro pro prošívání skleněným vláknem</i>	67
<i>Obr. 59</i>	<i>Prošité pěnové jádro skleněným vláknem</i>	67
<i>Obr. 60</i>	<i>Připravené vrstvy skleněné tkaniny</i>	68
<i>Obr. 61</i>	<i>Zavakuovaný sendvičový panel pod pružnou fólií po ruční laminaci</i>	69
<i>Obr. 62</i>	<i>Odtrhová tkanina</i>	69
<i>Obr. 63</i>	<i>Distribuční síťka</i>	70
<i>Obr. 64</i>	<i>Vakuová fólie</i>	70
<i>Obr. 65</i>	<i>Těsnicí páska</i>	71
<i>Obr. 66 a)</i>	<i>Hadice pro přívod matrice, b) spirálová hadice</i>	71
<i>Obr. 67</i>	<i>Konektor RIC</i>	72
<i>Obr. 68</i>	<i>Rezervoár matrice</i>	72
<i>Obr. 69</i>	<i>Vakuová vývěva</i>	73
<i>Obr. 70</i>	<i>Princip výroby sendvičové konstrukce s vyztuženým pěnovým jádrem [43]</i>	73
<i>Obr. 71</i>	<i>Naskládané vrstvy sendvičové konstrukce</i>	74
<i>Obr. 72</i>	<i>Slisovaná sendvičová konstrukce připravená pro vakuovou infuzi</i>	74
<i>Obr. 73</i>	<i>Průběh vakuové infuze a) Odstranění kleští z nasávací hadice, b) Začátek prosycování výtzuže matricí, c) Prosycování výtzuže matricí, d) Prosycený sendvičový panel připraven k vytvrzování</i>	75
<i>Obr. 74</i>	<i>Vyrobený sendvičový panel</i>	76
<i>Obr. 75</i>	<i>Grafická interpretace hmotnosti vyrobených sendvičových panelů</i>	77
<i>Obr. 76</i>	<i>Řezání sendvičových konstrukcí na testovací vzorky</i>	77
<i>Obr. 77</i>	<i>Vyrobené testovací vzorky</i>	77
<i>Obr. 78</i>	<i>Uzavřený vzduch v místě polymerního žebra</i>	78
<i>Obr. 79</i>	<i>Špatně prosycená vnější krycí vrstva</i>	78
<i>Obr. 80</i>	<i>Univerzální zkušební stroj ZWICK 1456</i>	80
<i>Obr. 81</i>	<i>Schéma tříbodové ohybové zkoušky</i>	81
<i>Obr. 82</i>	<i>Tříbodová ohybová zkouška sendvičové konstrukce s pěnovým jádrem Airex T90.100/10 mm</i>	82
<i>Obr. 83</i>	<i>Grafická interpretace efektivního modulu pružnosti v ohybu sendvičových konstrukcí s pěnovým jádrem Airex T90.100/10 mm</i>	83

<i>Obr. 84 Grafická interpretace meze pevnosti v ohybu u sendvičových konstrukcí s pěnovým jádrem Airex T90.100/10 mm</i>	<i>84</i>
<i>Obr. 85 Grafická interpretace závislosti meze pevnosti na deformaci v ohybu sendvičových konstrukcí s pěnovým jádrem Airex T90.100/10 mm</i>	<i>85</i>
<i>Obr. 86 Grafická interpretace únosnosti v ohybu u sendvičových konstrukcí s pěnovým jádrem Airex T90.100/10 mm</i>	<i>86</i>
<i>Obr. 87 Poruchy při ohybové zkoušce sendvičových konstrukcí s pěnovým jádrem Airex T90.100/10 mm</i>	<i>87</i>
<i>Obr. 88 Třibodová ohybová zkouška sendvičové konstrukce s pěnovým jádrem Airex C70.55/10 mm</i>	<i>88</i>
<i>Obr. 89 Grafická interpretace modulu pružnosti v ohybu u sendvičových konstrukcí s pěnovým jádrem Airex C70.55/10 mm.....</i>	<i>89</i>
<i>Obr. 90 Grafická interpretace meze pevnosti v ohybu u sendvičových konstrukcí s pěnovým jádrem Airex C70.55/10 mm.....</i>	<i>90</i>
<i>Obr. 91 Grafická interpretace závislosti meze pevnosti na deformaci v ohybu sendvičových konstrukcí s pěnovým jádrem Airex C70.55/10 mm.....</i>	<i>91</i>
<i>Obr. 92 Grafická interpretace únosnosti v ohybu u sendvičových konstrukcí s pěnovým jádrem Airex C70.55/10 mm.....</i>	<i>92</i>
<i>Obr. 93 Poruchy při ohybové zkoušce sendvičových konstrukcí s pěnovým jádrem Airex C70.55/10 mm.....</i>	<i>93</i>
<i>Obr. 94 Třibodová ohybová zkouška sendvičové konstrukce s pěnovým jádrem Airex C70.55/15 mm</i>	<i>94</i>
<i>Obr. 95 Grafická interpretace efektivního modulu pružnosti v ohybu u sendvičových konstrukcí s pěnovým jádrem Airex C70.55/15 mm</i>	<i>96</i>
<i>Obr. 96 Grafická interpretace meze pevnosti v ohybu u sendvičových konstrukcí s pěnovým jádrem Airex C70.55/15 mm.....</i>	<i>97</i>
<i>Obr. 97 Grafická interpretace závislost meze pevnosti na deformaci v ohybu sendvičových konstrukcí s pěnovým jádrem Airex C70.55/15 mm.....</i>	<i>98</i>
<i>Obr. 98 Grafická interpretace únosnosti v ohybu u sendvičových konstrukcí s pěnovým jádrem Airex C70.55/15 mm.....</i>	<i>99</i>
<i>Obr. 99 Poruchy při ohybové zkoušce sendvičových konstrukcí s pěnovým jádrem Airex C70.55/15 mm.....</i>	<i>100</i>
<i>Obr. 100 Schéma tlakové zkoušky při působení bočního tlaku.....</i>	<i>101</i>

<i>Obr. 101 Grafická interpretace meze pevnosti v tlaku sendvičových konstrukcí s pěnovým jádrem Airex T90.100/10 mm</i>	<i>103</i>
<i>Obr. 102 Grafická interpretace únosnosti v tlaku u sendvičových konstrukcí s pěnovým jádrem Airex T90.100/10 mm</i>	<i>104</i>
<i>Obr. 103 Poruchy při tlakové zkoušce sendvičových konstrukcí s pěnovým jádrem Airex T90.100/10 mm</i>	<i>105</i>
<i>Obr. 104 Grafická interpretace meze pevnosti v tlaku u sendvičových konstrukcí s pěnovým jádrem Airex C70.55/10 mm.....</i>	<i>107</i>
<i>Obr. 105 Grafická interpretace únosnosti v tlaku u sendvičových konstrukcí s pěnovým jádrem Airex C70.55/10 mm.....</i>	<i>108</i>
<i>Obr. 106 Poruchy při tlakové zkoušce sendvičových konstrukcí s pěnovým jádrem Airex C70.55/10 mm.....</i>	<i>108</i>
<i>Obr. 107 Grafická interpretace meze pevnosti v tlaku u sendvičových konstrukcí s pěnovým jádrem Airex C70.55/15 mm.....</i>	<i>110</i>
<i>Obr. 108 Grafická interpretace únosnosti v tlaku u sendvičových konstrukcí s pěnovým jádrem Airex C70.55/15 mm.....</i>	<i>111</i>
<i>Obr. 109 Poruchy při tlakové zkoušce sendvičové konstrukce s pěnovým jádrem Airex C70.55/15 mm.....</i>	<i>112</i>
<i>Obr. 110 Grafická interpretace efektivního modulu pružnosti v ohybu všech sendvičových nosníků</i>	<i>113</i>
<i>Obr. 111 Grafická interpretace meze pevnosti v ohybu všech sendvičových panelů</i>	<i>114</i>
<i>Obr. 112 Grafická interpretace únosnosti v ohybu všech sendvičových panelů</i>	<i>114</i>
<i>Obr. 113 Grafická interpretace meze pevnosti v tlaku všech sendvičových panelů</i>	<i>115</i>
<i>Obr. 114 Grafická interpretace únosnosti v tlaku všech sendvičových panelů</i>	<i>115</i>

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1 Popis vyztužující tkaniny</i>	59
<i>Tab. 2 Vlastnosti pryskyřice Biresin CR82 a tvrdidla Biresin CH80-1 [Příloha PI]</i>	60
<i>Tab. 3 Vlastnosti pryskyřice Biresin CR 80 a tvrdidla Biresin CH80-1 [Příloha PII]</i>	61
<i>Tab. 4 Vlastnosti pěnového jádra Airex T90.100 [Příloha PIII]</i>	62
<i>Tab. 5 Vlastnosti pěnového jádra Airex C70.55 [Příloha PIV]</i>	63
<i>Tab. 6 Modifikace vyztužených sendvičových konstrukcí</i>	64
<i>Tab. 7 Hmotnost vyrobených sendvičových konstrukcí - m [g/m²].....</i>	76
<i>Tab. 8 Technické parametry univerzálního zkušebního stroje ZWICK 1456</i>	80
<i>Tab. 9 Efektivní modul pružnosti v ohybu sendvičových konstrukcí s pěnovým jádrem Airex T90.100/10 mm</i>	83
<i>Tab. 10 Mez pevnosti v ohybu sendvičových konstrukcí s pěnovým jádrem Airex T90.100/10 mm.....</i>	84
<i>Tab. 11 Únosnost v ohybu sendvičových konstrukcí s pěnovým jádrem Airex T90.100/10 mm.....</i>	86
<i>Tab. 12 Efektivní modul pružnosti v ohybu sendvičových konstrukcí s pěnovým jádreem Airex C70.55/10 mm</i>	89
<i>Tab. 13 Mez pevnosti v ohybu sendvičových konstrukcí s pěnovým jádrem Airex C70.55/10 mm</i>	90
<i>Tab. 14 Únosnost v ohybu sendvičových konstrukcí s pěnovým jádrem Airex C70.55/10 mm</i>	92
<i>Tab. 15 Efektivní modul pružnosti v ohybu sendvičových konstrukcí s pěnovým jádreem Airex C70.55/15 mm</i>	95
<i>Tab. 16 Mez pevnosti v ohybu sendvičových konstrukcí s pěnovým jádrem Airex C70.55/15 mm</i>	97
<i>Tab. 17 Únosnost v ohybu sendvičových konstrukcí s pěnovým jádrem Airex C70.55/15 mm</i>	99
<i>Tab. 18 Mez pevnosti v tlaku sendvičových konstrukcí s pěnovým jádrem Airex T90.100/10 mm.....</i>	102
<i>Tab. 19 Únosnost v tlaku sendvičových konstrukcí s pěnovým jádrem Airex T90.100/10 mm.....</i>	104
<i>Tab. 20 Mez pevnosti v tlaku sendvičových konstrukcí s pěnovým jádrem Airex C70.55/10 mm</i>	106

<i>Tab. 21 Únosnost v tlaku sendvičových konstrukcí s pěnovým jádrem Airex C70.55/10 mm</i>	<i>107</i>
<i>Tab. 22 Mez pevnosti v tlaku sendvičových konstrukcí s pěnovým jádrem Airex C70.55/15 mm</i>	<i>110</i>
<i>Tab. 23 Únosnost v tlaku sendvičových konstrukcí s pěnovým jádrem Airex C70.55/15 mm</i>	<i>111</i>

SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha PI Pyskyřice Biresin CR82
- Příloha PII Pyskyřice Biresin CR80
- Příloha PIII Pěnové jádro Airex T90.100
- Příloha PIV Pěnové jádro Airex C70.55
- Příloha PV CD disk s diplomovou prací ve formátu .pdf

PŘÍLOHA P I: PRSKYŘICE BIRESIN CR82

Product Data Sheet
Version 07 / 2010

Biresin® CR82 Composite resin system

Tooling & Composites

Areas of Application

- For wet lay-up, pultrusion and filament winding processing
- Specially for applications when curing temperatures of ≥ 75 °C can not be implemented

Product Benefits

- Approved by Germanischer Lloyd for the production of components
- One resin with four hardeners with different reactivity
- Uniform mixing ratio of 100 : 27
- The reactivity can be adapted by mixing the hardeners
- Because of optimized mixed viscosity good impregnation and good non draining properties
- Glass transition temperatures up to 80°C dependent on curing conditions

Description

- Basis Two-component-epoxy-system
- Resin **Biresin® CR82**, epoxy resin, translucent
- Hardener **Biresin® CH80-1**, amine, colourless to yellowish
- Hardener **Biresin® CH80-2**, amine, colourless to yellowish
- Hardener **Biresin® CH80-6**, amine, colourless to yellowish
- Hardener **Biresin® CH80-10**, amine, colourless to yellowish

Physical Data	Resin		Hardener			
	Biresin® CR82	Biresin® CH80-1	Biresin® CH80-2	Biresin® CH80-6	Biresin® CH80-10	
Individual Components						
Viscosity, 25°C	mPas	1,600	50	45	< 10	< 10
Density, 25°C	g/ml	1.11	1.00	0.99	0.95	0.95
Mixing ratio	in parts by weight	100	27			
			Mixture			
Potlife, 100 g / RT, approx. values	min	50	80	220	330	
Mixed viscosity, 25°C, approx. values	mPas	740	600	400	390	

Processing

- The material and processing temperatures should be from 18 to 35°C.
- With the hardeners **Biresin® CH80-1** and **Biresin® CH80-2** demoulding after room temperature curing is possible.
- With the hardeners **Biresin® CH80-6** and **Biresin® CH80-10** curing at 45°C before demoulding is recommended dependent on components.
- To clean brushes or tools immediately Sika Reinigungsmittel 5 is recommended.
- Additional informations are available in "Processing Instructions for Composite Resins".



PŘÍLOHA P II: PRYSKYŘICE BIRESIN CR80

Product Data Sheet
Version 07 / 2010

Biresin® CR80 Composite resin system

Areas of Application

- For infusion and injection processing
- Specially for applications when curing temperatures of $\geq 75^\circ\text{C}$ can not be implemented
- The hardeners **Biresin® CH80-1** und **CH80-2** can be applied for the manufacture of smaller parts in hand lay-up processing too

Product Benefits

- Approved by Germanischer Lloyd for the production of components
- One resin with four hardeners with different reactivity
- Uniform mixing ratio of 100 : 30
- The reactivity can be adapted by mixing the hardeners
- Because of low mixed viscosity fast infiltration of dry fabrics and nonwovens
- Glass transition temperatures up to 80°C dependent on curing conditions

Description

- Basis Two-component-epoxy-system
- Resin **Biresin® CR80**, epoxy resin, tranlucent, unfilled
- Hardener **Biresin® CH80-1**, amine, colourless to yellowish
- Hardener **Biresin® CH80-2**, amine, colourless to yellowish
- Hardener **Biresin® CH80-6**, amine, colourless to yellowish
- Hardener **Biresin® CH80-10**, amine, colourless to yellowish

Physical Data	Resin		Hardener			
	Biresin® CR80	Biresin® CH80-1	Biresin® CH80-2	Biresin® CH80-6	Biresin® CH80-10	
Individual Components						
Viscosity, 25°C	mPas	900	50	45	< 10	< 10
Density, 25°C	g/ml	1.13	1.00	0.99	0.95	0.95
Mixing ratio	in parts by weight	100	30			
		Mixture				
Potlife, 100 g / RT, approx. values	min		45	80	190	330
Mixed viscosity, 25°C, approx. values	mPas		400	350	230	210

Processing

- The material and processing temperatures should be 18 - 35°C .
- With the hardeners **Biresin® CH80-1** and **Biresin® CH80-2** demoulding after room temperature curing is possible.
- With the hardeners **Biresin® CH80-6** and **Biresin® CH80-10** curing at 45°C before demoulding is required dependent on components.
- To clean brushes or tools immediately Sika Reinigungsmittel 5 is recommended.
- Additional informations are available in "Processing Instructions for Composite Resins".



PŘÍLOHA P III: PĚNOVÉ JÁDRO AIREX T90.100

AIREX[®]



AIREX[®] T90

GF--TDS-022

The Fire Resistant Structural Foam

DATA SHEET 01.2016 - Replaces 05.2015

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
Baltek 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

AIREX BALTEK BANOVA

MECHANICAL PROPERTIES							
Typical properties for AIREX® T90		Unit (metrical)	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	3.5 3.2
Compressive modulus perpendicular to the plane	ISO 844	N/mm ²	Average <i>Minimum</i>	50 35	85 75	115 100	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		610	610	610	610
	Length ²⁾	mm ± 5		1220	1005	1220	1220
	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 1220 mm, alternative length 2440 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 F16-101	Flammability	M2	M1	M1	M1
	NF F16-101	Smoke density	F1	F1	F1	F1
Rail	EN 45545-2		HL3 achievable; Certification depending on sandwich design			
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

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.

GF-TDS-014

MECHANICAL PROPERTIES							
Typical properties for AIREX® T90		Unit (imperial)	Value ¹⁾	T90.60	T90.100	T90.150	T90.210
Density	ISO 845	lb/ft ³	Average <i>Typ. range</i>	4.1 3.7 - 4.4	6.8 6.6 - 7.2	9.1 8.7 - 9.4	13 12.5 - 13.7
Compressive strength perpendicular to the plane	ISO 844	psi	Average <i>Minimum</i>	116 102	203 174	319 290	508 464
Compressive modulus perpendicular to the plane	ISO 844	psi	Average <i>Minimum</i>	7'250 5'075	12'330 10'875	16'680 14'500	24'650 21'025
Tensile strength perpendicular to the plane	ASTM C297	psi	Average <i>Minimum</i>	218 174	319 232	392 319	435 350
Tensile modulus perpendicular to the plane	ASTM C297	psi	Average <i>Minimum</i>	12'325 10'150	17'400 13'050	24'650 20'300	32'630 26'100
Shear strength	ISO 1922	psi	Average <i>Minimum</i>	67 58	116 102	174 160	268 215
Shear modulus	ISO 1922	psi	Average <i>Minimum</i>	1'740 1'520	2'900 2'610	4'350 3'770	7'250 6'380
Shear elongation at break	ISO 1922	%	Average <i>Minimum</i>	25 15	10 5	8 4	5 3
Thermal conductivity at 50°F	EN 12667	Btu.in/ hr.ft ² .F	Average	0.257	0.243	0.263	0.312
Standard sheet	Width ²⁾	in ± 0.2		48	48	48	48
	Length ²⁾	in ± 0.2		96	96	96	96
	Thickness	in ± 0.02		¼ to 4	¼ to 4	¼ to 4	¼ to 4

Finishing Options, other dimensions and closer tolerances upon request

¹⁾ Minimum values acc. DNV definition; test sample thickness 20 mm (¾") except thermal conductivity 50mm (2")

²⁾ Alternative width 24", alternative length 48" (39 ½" for T92.110)

Fire performance	Standard		T90.60	T90.100	T90.150	T90.210
Aircraft	FAR/CS 25.853/ABD0031	Flammability	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	Flammability	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 F16-101	Flammability	M2	M1	M1	M1
	NF F16-101	Smoke density	F1	F1	F1	F1
Rail	EN 45545-2		HL3 achievable; Certification depending on sandwich design			
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

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.

GF-TDS-014

PŘÍLOHA P IV: PĚNOVÉ JÁDRO AIREX C70.55

AIREX[®]

AIREX[®] C70



GF-TDS-006

Universal Structural Foam

DATA SHEET 07.2011 - Replaces 08.2010

DESCRIPTION



AIREX[®] C70 is a closed cell, cross-linked polymer foam that combines excellent stiffness and strength to weight ratios with superior toughness.

It is non-friable, contains no CFC's, has negligible water absorption, and provides an excellent resistance to chemicals. The fine cell structure offers an excellent bonding surface.

Compatible with most resins and manufacturing processes **AIREX[®] C70** is ideally suited as a core material for a wide variety of sandwich structures subjected to both static and dynamic loads. Thanks to its unique lightness (properties vs. density) C70 is the material of choice for applications where lightweight is a priority.

CHARACTERISTICS

- Outstanding strength and stiffness to weight ratios
- Good impact strength
- Low resin absorption
- High fatigue resistance
- Good fire performance (self-extinguishing)
- High sound and thermal insulation
- Good styrene resistance

APPLICATIONS

- **Marine:** Hulls, decks, bulkheads, superstructures, interiors
- **Road and Rail:** Roof panels, interiors, floors, doors, partition walls, side skirts, front-ends
- **Wind energy:** Rotor blades, nacelles, turbine generator housings
- **Aircraft and Aerospace:** Interiors, radomes, galley carts, general aviation (fuselage and wing)
- **Recreation:** Skis, snowboards, surfboards, wakeboards, canoes, kayaks
- **Industrial:** Tooling, tanks, ductwork, containers, covers

PROCESSING

- Contact molding (hand/spray)
- Vacuum infusion
- Resin injection (RTM)
- Adhesive bonding
- Pre-preg processing
- Thermoforming

www.airexbaltekbanova.com

Europe | Middle East | India | Africa
Airex AG
5643 Sins, Switzerland
T +41 41 799 66 00 | F +41 41 799 66 60
corematerials@3AComposites.com

North America | South America
Baltek 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 96 006 | F +86 21 338 27 298
corematerial.s.asia@3AComposites.com

AIREX BALTEK BANOVA

MECHANICAL PROPERTIES

Typical properties for AIREX® C70		Unit (metrical)	Value ¹⁾	C70.40	C70.48	C70.55	C70.75	C70.90	C70.130	C70.200	C70.250
Density	ISO 845	kg/m ³	Average Typ. range	40	48 43 - 55	60 54 - 69	80 72 - 92	100 90 - 115	130 120 - 150	200 180 - 250	250 225 - 288
Compressive strength perpendicular to the plane	ISO 844	N/mm ²	Average Minimum	0.45	0.60 0.50	0.90 0.75	1.45 1.10	2.0 1.7	3.0 2.6	5.2 4.5	6.6 5.3
Compressive modulus perpendicular to the plane	DIN 53421	N/mm ²	Average Minimum	41	48 35	69 55	104 80	130 110	170 145	280 240	350 280
Tensile strength in the plane	ISO 527 1-2	N/mm ²	Average Minimum	0.70	0.95 0.8	1.3 1.0	2.0 1.6	2.7 2.2	4.0 3.0	6.0 4.8	7.5 5.5
Tensile modulus in the plane	ISO 527 1-2	N/mm ²	Average Minimum	28	35 28	45 35	66 50	84 65	115 95	175 140	230 160
Shear strength	ISO 1922	N/mm ²	Average Minimum	0.45	0.55 0.50	0.85 0.70	1.2 1.0	1.7 1.4	2.4 2.1	3.5 3.2	4.7 3.8
Shear modulus	ASTM C393	N/mm ²	Average Minimum	13	16 14	22 18	30 24	40 34	54 45	75 68	95 78
Shear elongation at break	ISO 1922	%	Average Minimum	8	10 8	16 10	18 10	23 12	30 20	30 20	30 20
Thermal conductivity at room temperature	ISO 8301	W/m.K	Average	0.031	0.031	0.031	0.033	0.035	0.039	0.048	0.056
Standard sheet	Width	mm ± 5		1330	1270	1150	1020	950	850	750	700
	Length	mm ± 5		2850 ²⁾	2730 ²⁾	2450 ²⁾	2180	2050	1900	1600	1500
	Thickness	mm ± 0.5		5 to 80	5 to 70	5 to 70	3 to 88	3 to 80	5 to 50	5 to 40	5 to 40
Color				light green	violet	yellow	green	red	blue	brown	green

Finishing Options, other dimensions and closer tolerances upon request

¹⁾ Minimum values acc. DNV definition: test sample thickness 20 mm except tensile properties (10 mm) and compressive modulus (40 mm)

²⁾ Half size plane sheets for thickness ≤ 8 mm

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.

GF-TDS-006

MECHANICAL PROPERTIES

Typical properties for AIREX® C70	Unit (imperial)	Value ¹⁾	C70.40	C70.48	C70.55	C70.75	C70.90	C70.130	C70.200	C70.250
Density	lb/ft ³	Average <i>Typ. range</i>	2.5 2.7 - 3.4	3.0 2.7 - 3.4	3.7 3.4 - 4.3	5.0 4.5 - 5.7	6.2 5.6 - 7.2	8.1 7.5 - 9.4	12.5 11.2 - 12.5	15.6 14 - 18
Compressive strength perpendicular to the plane	psi	Average <i>Minimum</i>	65 73	87 73	130 109	210 160	290 247	435 377	745 653	960 769
Compressive modulus perpendicular to the plane	psi	Average <i>Minimum</i>	5'947 100	7'000 5'075	10'000 7'975	15'080 11'600	18'850 15'950	24'650 21'025	40'600 34'900	50'800 40'600
Tensile strength in the plane	psi	Average <i>Minimum</i>	100 116	138 116	190 145	290 232	390 319	580 435	870 696	1'090 798
Tensile modulus in the plane	psi	Average <i>Minimum</i>	4'060 65	5'100 4'060	6'530 5'075	9'600 7'250	12'200 9'425	16'680 13'775	25'400 20'300	33'400 23'200
Shear strength	psi	Average <i>Minimum</i>	65 1'900	80 72.5	123 102	175 145	247 203	348 305	510 464	680 551
Shear modulus	psi	Average <i>Minimum</i>	1'900 8	2'320 2'030	3'190 2'610	4'350 3'480	5'802 4'930	7'830 6'525	10'900 9'860	13'780 11'310
Shear elongation at break	%	Average <i>Minimum</i>	8 8	10 8	16 10	18 10	23 12	30 20	30 20	30 20
Thermal conductivity at room temperature	BTU.in/ft ² .hr.°F	Average	0.21	0.21	0.21	0.23	0.24	0.27	0.33	0.39
Standard sheet	Width	mm ± 5	1330	1270	1150	1020	860	750	700	700
	Length	mm ± 5	2850 ²⁾	2730 ²⁾	2450 ²⁾	2180	2050	1900	1600	1500
	Thickness	mm ± 0.5	5 to 80	5 to 70	5 to 70	3 to 68	3 to 60	5 to 50	5 to 40	5 to 40
Color		light green	violet	yellow	green	red	blue	brown	green	green

Finishing Options, other dimensions and closer tolerances upon request

¹⁾ Minimum values acc. DNV definition; test sample thickness 20 mm (¾") except tensile properties 10 mm (½") and compressive modulus 40 mm (1 ½")

²⁾ Half size plane sheets for thickness ≤ 8 mm (0.315")

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.