

Modifikace sendvičových jader s ohledem na únosnost výsledné struktury

Bc. Tomáš Chovančík

Diplomová práce
2019



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2018/2019

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Tomáš Chovančík**

Osobní číslo: **T17284**

Studijní program: **N3909 Procesní inženýrství**

Studijní obor: **Výrobní inženýrství**

Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Modifikace sendvičových jader s ohledem na únosnost výsledné struktury**

Zásady pro vypracování:

- 1. Vypracování literární rešerše na dané téma**
- 2. Úprava povrchu vybraných polymerních jádrových pěn**
- 3. Výroba sendvičových panelů a příprava zkušebních těles**
- 4. Mechanické zkoušky zkušebních těles a hodnocení soudržnosti vrstev**
- 5. Vyhodnocení výroby a získaných dat spolu se statistickým zpracováním**

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

1. **DAĎOUREK, Karel. Kompozitní materiály – druhy a jejich užití. Vyd. 1. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2007. ISBN 978-80-7372-279-1**
2. **WANBERG, J. Composite Materials Fabrication Handbook 2. Stillwater: Wolfgang Publications Inc., 2010. ISBN 978-1-929133-93-2**
3. **DAVIES, J. M. Lightweight Sandwich Construction, 1st ed. Oxford: Blackwell Science Ltd., 2001. ISBN: 978-0-632-04027-8**
4. **ZENKERT, D. Nordic Industrial Fund, The Handbook of Sandwich Construction. Worcestershire: EMAS Publishing, 1997, ISBN 978-094-7817-961**

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Robert Moučka, Ph.D.**

Externí

Datum zadání diplomové práce: **2. ledna 2019**

Termín odevzdání diplomové práce: **17. května 2019**

Ve Zlíně dne 6. února 2019

L.S.

doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.
děkan

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

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

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

Ve Zlíně

.....

²¹ 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 nevydávající 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.

²² 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).

³¹ 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 užit či poskytnout jinému licenci, není-li to v rozporu s oprávněnými zájmy školy nebo školského či vzdělávacího zařízení.

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

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá modifikací sendvičových jader s ohledem na únosnost výsledné struktury. Práce je rozčleněna na část teoretickou a praktickou. Teoretická část je zaměřena na problematiku sendvičových konstrukcí, jejich složení a výrobu, možnosti modifikace jádra a testování mechanických vlastností. V praktické části jsou popsány použité materiály pro výrobu a samotná výroba sendvičových panelů s různě modifikovanými jádry. Na vyrobených sendvičových panelech byly provedeny ohybové a tlakové zkoušky. V závěru práce jsou porovnány jednotlivě naměřené výsledky zkušebních vzorků a sepsána doporučení pro praxi.

Klíčová slova: sendvičové konstrukce, pěnové jádro, modifikace jádra, vakuová infuze, tříbodový ohyb, boční tlak

ABSTRACT

This thesis deals with the modification of sandwich cores with respect to load capacity of the final structure. The work is divided into a theoretical and a practical part. The theoretical part is focused on issues of sandwich constructions, their composition and production, the possibilities of core modification and testing of mechanical properties. In the practical part the materials used for the production of sandwich panels and the production of sandwich panels with differently modified cores are described. Bending and pressure tests were carried out on the produced sandwich specimens. Individually measured results of tested samples are compared and recommendation for a practice are stated at the end of the work.

Keywords: sandwich construction, foam core, core modification, vacuum infusion, three-point bending, edgewise compression

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Robertovi Moučkovi, Ph.D. za odborné vedení, trpělivost a cenné rady, které mi pomohly při zpracování této diplomové práce.

Dále mé poděkování patří Ing. Ladislavovi Fojtlovi, Ph.D. za cenné rady, ochotný přístup, čas a výpomoc s praktickou částí diplomové práce.

V neposlední řadě patří mé díky především rodině a blízkým, kteří mě podporovali po celou dobu studia.

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

OBSAH

ÚVOD.....	10
I TEORETICKÁ ČÁST.....	11
1 SENDVIČOVÉ KOMPOZITNÍ MATERIÁLY.....	12
1.1 POTAHOVÉ MATERIÁLY	13
1.1.1 Kompozitní krycí materiály	14
1.1.2 Ostatní krycí materiály	19
1.2 JÁDROVÉ MATERIÁLY	20
1.2.1 Pěnové jádrové materiály	20
1.2.2 Voštinové jádrové materiály	22
2 VÝROBNÍ TECHNOLOGIE.....	23
2.1 RUČNÍ KLADENÍ.....	23
2.2 LISOVÁNÍ ZA TEPLA.....	24
2.3 LISOVÁNÍ POMOCÍ VAKUA	25
2.4 TECHNOLOGIE RTM (RESIN TRANSFER MOULDING)	26
2.5 VAKUOVÁ INFUZE	27
2.5.1 Postup výroby vakuové infuze	27
2.5.2 Modifikace pěnového jádra.....	28
3 ZKOUŠKY SENDVIČOVÝCH KONSTRUKCÍ.....	31
3.1 ZKOUŠKA BOČNÍM TLAKEM – EDGEWISE COMPRESSION TEST	31
3.2 ZKOUŠKA ODLUPOVÁNÍ – PEEL TEST.....	32
3.2.1 Zkouška odlupování pomocí navijecího bubnu	32
3.2.2 Zkouška odlupování pomocí tlaku vzduchu	33
3.2.3 Zkouška odlupování pomocí tahu	33
3.3 ZKOUŠKA OHYBEM.....	34
3.3.1 Tříbodová zkouška ohybem	34
3.3.2 Čtyřbodová zkouška ohybem.....	35
4 SHRUTÍ TEORETICKÉ ČÁSTI.....	36
II PRAKTICKÁ ČÁST	37
5 CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE	38
6 MATERIÁLOVÉ SLOŽENÍ SENDVIČOVÝCH PANELŮ	39
6.1 VÝZTUŽ KRYCÍCH POTAHŮ	39
6.2 MATRICE	39
6.3 JÁDROVÝ MATERIÁL AIREX C70.75	40
6.4 MODIFIKACE PĚNOVÉHO JÁDRA	41
6.4.1 Frézování povrchu pěnového jádra	41
6.4.2 Vrtání pěnového jádra	42
6.4.3 Prořezání povrchu pěnového jádra.....	43
7 VÝROBA SENDVIČOVÉHO KOMPOZITNÍHO MATERIÁLU.....	44

7.1	VÝROBA RUČNÍ LAMINACÍ.....	44
7.2	VÝROBA VAKUOVOU INFUZÍ.....	44
7.2.1	Pomocné materiály.....	44
7.2.2	Postup výroby vakuovou infuzí	48
7.3	PŘIPRAVENÉ SENDVIČOVÉ KONSTRUKCE.....	50
7.4	ŘEZÁNÍ ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ	50
7.5	HMOTNOST VYROBENÝCH SENDVIČOVÝCH PANELŮ	52
7.6	VÝROBNÍ VADY ZKUŠEBNÍCH PANELŮ	53
7.6.1	Nedokonalé prosycení	53
7.6.2	Uzavřený vzduch.....	53
8	POUŽITÉ STATISTICKÉ VELIČINY	55
9	MECHANICKÉ TESTOVÁNÍ SENDVIČOVÝCH KONSTRUKCÍ.....	57
9.1	VYHODNOCENÍ TŘÍBODOVÉ ZKOUŠKY OHYBEM	58
9.1.1	Efektivní modul pružnosti v tříbodovém ohybu	58
9.1.2	Únosnost v ohybu u tříbodové zkoušky	60
9.1.3	Poruchy sendvičových konstrukcí u tříbodového ohybu	61
9.2	VYHODNOCENÍ TLAKOVÉ ZKOUŠKY ZA PŮSOBENÍ BOČNÍHO TLAKU	63
9.2.1	Mez pevnosti v tlaku	64
9.2.2	Únosnost v tlaku.....	65
9.2.3	Poruchy sendvičových konstrukcí u tlakové zkoušky	67
9.3	VYHODNOCENÍ MODIFIKACÍ JÁDRA	69
9.4	MIKROSKOPIE ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ.....	69
	ZÁVĚR	74
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	76
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	81
	SEZNAM OBRÁZKŮ	82
	SEZNAM TABULEK.....	85
	SEZNAM PŘÍLOH.....	86

ÚVOD

Vývoj kompozitních materiálů prožívá v dnešní době nebývalý rozmach. Lze říci, že kompozity hrají důležitou roli ve vědě i v praxi. Tyto materiály nacházejí využití jak v leteckém, sportovním, automobilovém průmyslu, tak i v lékařství, stavebnictví aj. Pomocí vrstvení více druhů kompozitů vznikají nové konstrukce se specifickými vlastnostmi.

Vzniklé konstrukce se označují jako sendvičové a skládají se z vnějších krycích vrstev a jádra. Tyto konstrukce lze vyrábět různými technologiemi, nejčastěji se využívá vakuová infuze. Díky svému složení má konstrukce dostatečnou pevnost. Výhodou je především jejich nízká hmotnost, vysoká pružnost a pevnost vztažené právě na hmotnost celku. Oceňují se také jejich tepelné a izolační vlastnosti. Sendvičové materiály, i jejich konstrukce, se neustále vyvíjí a pomocí modifikací dochází ke zdokonalování vlastností stávajících materiálů a struktur. Modifikace jednak zlepšují homogenitu prosycení jádra pryskyřicí, jednak částečně ovlivňují mechanické vlastnosti celé struktury. Vzhledem k těmto vlastnostem mají sendvičové materiály zárnou budoucnost a lze očekávat, že jejich využití bude nadále růst.

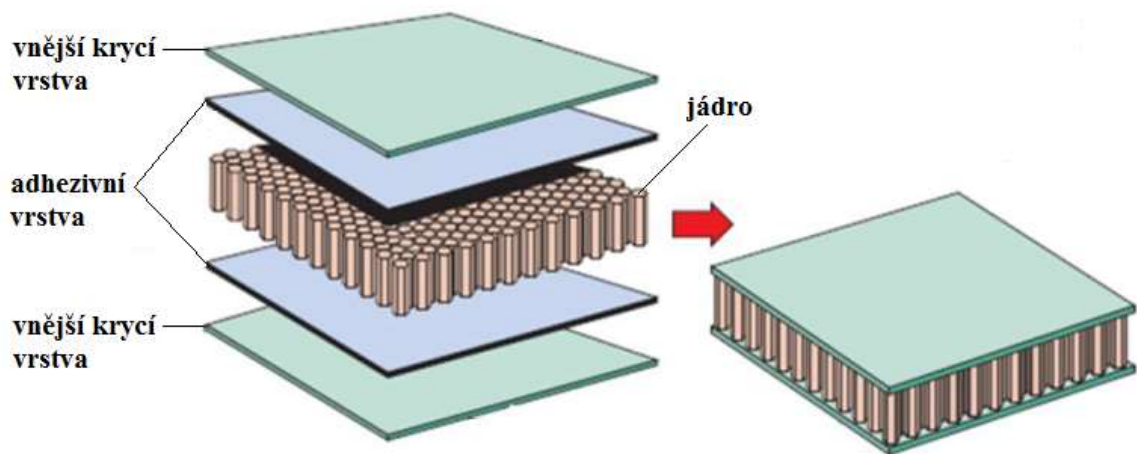
Tato práce je zaměřena na výzkum možností modifikace pěnových jader s ohledem na únosnost výsledné sendvičové struktury. Pěnové jádro je možné modifikovat různými způsoby tak, aby byla podpořena soudržnost sendvičové konstrukce. Mezi hlavní modifikaci pak patří úprava jeho povrchu mechanickým obráběním (např. vrtání, frézování, prořezání).

K získání finálních mechanických vlastností konstrukce se provádějí zkoušky (ohybové, tlakové), při kterých se sledují předem dané cíle, čímž lze určit možné použití dané konstrukce v praxi. Mechanické zkoušky lze provádět zvláště na krycí vrstvě a jádru nebo na kompletní sendvičové konstrukci. Klíčové je však splnění požadovaných vlastností celé konstrukce, čehož lze dosáhnout pouze za předpokladu dobré a spolehlivé vazby mezi jednotlivými komponenty mající za následek správný přenos zatížení.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 SENDVIČOVÉ KOMPOZITNÍ MATERIÁLY

Sendvičové kompozitní materiály řadíme do vrstvených konstrukcí s nízkou hmotností, vysokou ohybovou pevností a tuhostí. Struktura sendvičové konstrukce je vždy shodná, tvoří ji jádro a dvě vnější krycí vrstvy neboli potahy. Jádro je charakteristické nízkou hmotností a pevností, slouží zejména k přenosu smykového zatížení mezi oběma krycími vrstvami. Krycí vrstvy jsou naopak tuhé, pevné a oproti jádru tenké. Potahy mohou být například k jádru pevně spojeny pomocí adhezivní vrstvy v jeden celek (Obr. 1) [1], [2].



Obr. 1 Schéma sendvičové struktury [4]

Výhody sendvičových konstrukcí:

- vysoká ohybová tuhost,
- vzduchotěsnost,
- vysoká nosnost,
- možnost povrchové úpravy krycích vrstev,
- rychlá montáž,
- snadná oprava či výměna při poškození,
- rázová odolnost,
- tepelná a akustická odolnost,
- voděodolná zábrana,
- dlouhá životnost [3].

Nevýhody sendvičových konstrukcí:

- hořlavost jádra (např. pěnového) sendvičové konstrukce,
- creepová deformace,
- deformace jedné strany při vystavení tepelnému zatížení,
- složitá kontrola konstrukce [3].

Sendvičové materiály se využívají v průmyslu a mají široké zaměření. Nejčastěji jsou využívány kvůli snížení hmotnosti finálního výrobku. Své uplatnění nacházejí v leteckém průmyslu, kde jsou využívány primárně díky vysoké ohybové pevnosti, tuhosti a nízké hmotnosti. Používají se jak na výrobu konstrukce letadla, tak i na jednotlivé komponenty, jako jsou vrtule, křídla, dveře aj. Další využití sendvičových materiálů je v průmyslu stavebním, kde jsou využívány kvůli zvukové a tepelné izolaci do stěn, střech, kancelářských přiček apod. Tyto vlastnosti mají zejména sendvičové materiály s pěnovým jádrem. V automobilovém průmyslu jsou využívány kvůli možnosti odlehčení automobilu, vyšší pevnosti a také snížení nároků na údržbu, neboť sendvičové struktury jsou odolné vůči korozi. Nejběžnějšími produkty ze sendvičových konstrukcí jsou dveře, podlahy, či nárazníky. Sendvičové struktury nachází využití i v průmyslu železničním, lodním, či ve sportovním odvětví (výroba lyží, pingpongových pálek, kánoe aj.) [1], [2].

1.1 Potahové materiály

Pro výběr vhodného potahu sendvičové konstrukce je důležité splňovat požadované vlastnosti na konkrétní aplikaci. Hlavním požadavkem je ohybová tuhost, tlaková a tahová pevnost, stabilita, vzhled a kvalita povrchu, odolnost materiálu proti vnějším vlivům. Pro dobrou kvalitu povrchu a jeho odolnost, je vhodné dát nástřik ochranného tmelu a laku na dokončený výrobek [1].

Tloušťky a materiály krycích povrchů lze volit shodné či neshodné. U shodných materiálů vzniká tzv. symetrická konstrukce, která má stabilnější vlastnosti v ohybu (stejná ohybová tuhost), kdežto u neshodné konstrukce neboli nesymetrické, dochází k mírným odlišnostem [5], [6].

1.1.1 Kompozitní krycí materiály

Pro výrobu kompozitního krycího materiálu lze využít mnoho druhů materiálu a jejich podob. Pro dosažení vysoké pevnosti je zapotřebí dobrého spojení systému matrice a výztužného materiálu. K tomuto spojení dochází nejčastěji při prosycování výztužného systému, který je nejčastěji ve formě tkaniny nebo rohože [6].

❖ Matrice

Jednou z důležitých složek pro vytvoření kompozitního krycího potahu je pojivo neboli matrice. Jejím úkolem je vytvořit a udržet tvar kompozitu, ochránit výztužná vlákna vůči vnějšímu prostředí a přenášet namáhání na vlákna. Matrice musí mít vhodnou viskozitu a povrchové napětí, aby dokonale smáčela vlákna [6].

Nejčastěji používané matrice u vláknových kompozitních materiálů jsou termosetické (např. fenolická, epoxidová, polyesterová pryskyřice) a termoplastické (např. polyetylen, polystyren, polyamid, polykarbonát, polyetyleneterefralát) [6].

❖ Výztuž

K hlavním funkcím výztuže v kompozitním materiálu patří zajištění pevnosti, tuhosti, tepelné stability aj. Vlákna výztuže přenášejí až 90 % celkového zatížení kompozitního materiálu. Dle zvoleného typu vlákna zajišťuje výztuž izolaci nebo elektrickou vodivost. Čím delší (spojitější) jsou vlákna, tím je účinek vyšší [6].

➤ Druhy vláknové výztuže

Materiály pro vláknové výztuže odpovídají kompozitním výrobkům. Pramenec je tvořen svazkem, který obsahuje 200–400 vláken. U jednosměrně namáhaných výrobků se používá jednosměrná výztuž. U kompozitů namáhaných ve více směrech se používají rohože, tkaniny a rouna. Při použití tohoto typu výztuže rychle roste tloušťka stěny výrobku a také se zvyšuje odolnost vůči šíření křehkých lomů [6], [7].

- Roving

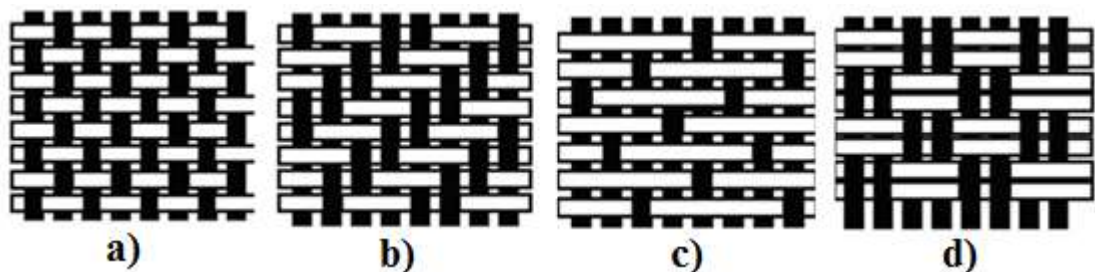
Roving (Obr. 2) je forma výztuže, která má tvar nekonečných vláken a jejich pramenec je navinutý na cívku. Nejčastěji se používá pro výrobu rovingových tkanin, rohoží, stříkaných laminátů a tažených profilů [8], [9].



Obr. 2 Roving [9]

- Tkanina

Výroba tkaniny z rovingů probíhá stejně jako výroba textilií. Tkanina je tkána různým způsobem, a tak se vytváří odlišné vazby (Obr. 3). Prvním druhem je vazba plátnová, která je nejpevnější, ale nejhůře tvarovatelná při kopírování tvarů. Druhá vazba, keprová, se vyznačuje svojí pevností a ohebností při tvarování. Za nejméně pevnou vazbu se považuje atlasová, která ale zaručuje minimální zvlnění, i když má vysoký objem vláken. Jako poslední je vazba košíková, která se u kompozitů používá zřídka, protože je méně stabilní [8].



Obr. 3 Druhy vazeb: a) plátnová, b) keprová, c) atlasová, d) košíková [10]

- Vyztužující rohož

Vyztužující rohož je vyráběna z nasekaných rovingů, naimpregnováním pryskyřicí (tvoří 5–30 hmotnostních procent) a následně tepelně slisována do ploché rohože (Obr. 4). V případě, že se k výrobě používají vlákna kontinuální, nemusí být použito pojivo, vlákna jsou propletena vzájemně [8].



Obr. 4 Vyztužující rohož [9]

➤ Druhy vláken

Nejběžněji využívaná vlákna lze rozdělit do jednotlivých skupin podle materiálu: skelná vlákna, uhlíková vlákna, aramidová vlákna, přírodní vlákna, či kovová vlákna.

- Skelná vlákna

Jedná se o tenká vlákna, která mají pravidelný kruhový průřez a amorfni strukturu. Z toho vyplývá, že vlastnosti skelných vláken jsou totožné v podélném i příčném směru. Příznivou vlastností těchto vláken je nízká hmotnost a nehořlavost. Hustota skelných vláken je přibližně $2,5 \text{ g/cm}^3$. Ze skelných vláken se vyrábí mnoho polotovarů, které se využívají v leteckém a automobilovém průmyslu. Důležitým faktorem je také nízká cena těchto polotovarů, oproti těm, které jsou vyrobeny například z uhlíkových vláken [6], [8], [9].

Skelná vlákna (Obr. 5) se rozdělují, podle aplikace použití, na několik typů označených písmeny: A, C, E, S, M. Vlákna typu A, C se používají, když je zapotřebí vysoké odolnosti proti různým chemikáliím. Pro zachování nízké elektrické vodivosti se používají vlákna typu E. Vlákna typu S mají vysokou pevnost. Skelná vlákna typu M se vyznačují vysokým modulem pružnosti [6].



Obr. 5 Skelné vlákno [9]

- Uhlíková vlákna

Uhlíková vlákna (Obr. 6) se vyznačují především dobrými mechanickými vlastnostmi, nízkou hustotou, elektrickou vodivostí, odolností proti vysokým teplotám a odolností proti korozi. Výhodou těchto vláken je také jejich vysoká pevnost a tuhost. Hustota uhlíkových vláken se pohybuje okolo 2 g/cm^3 . Za nevýhody uhlíkových vláken považujeme vysokou cenu a jejich křehkost [6], [8].



Obr. 6 Uhlíkové vlákno [9]

- Aramidová vlákna

Aramidová vlákna neboli kevlarová (Obr. 7), jsou plastového původu. Degradují po působení UV záření, pohlcují vlhkost (jsou hydrofilní) a mají nízkou pevnost v tlaku. Mezi výhody aramidových vláken patří jejich chemická odolnost, odolnost vůči rázovému namáhání a taky pevnost v tahu. Tento materiál se používá v kompozitních materiálech, ale mimo to se používají jako náhrada za azbest. Vyrábí se z nich neprůstřelné vesty apod. [8], [9].



Obr. 7 Hybridní aramidové vlákno [9]

- Přírodní vlákna

Přírodní vlákna (Obr. 8) se získávají z rostlin a jejich plodů. Základem vláken je celulóza. Mezi tyto rostliny patří vlákna bavlněná, jutová, konopná, lněná, kokosová aj. Za výhody přírodních vláken je považována nízká hustota a rozložitelnost. K nevýhodám se řadí citlivost vláken na vlhkost, nízké mechanické vlastnosti a omezená délka přírodních vláken [8].



Obr. 8 Přírodní vlákno [9]

- Kovová vlákna

Vlákna kovová jsou nejlevnější variantou vyztužujících vláken. Využívají se převážně na zpevnování hliníkových slitin a žáruvzdorných materiálů. Jejich nevýhodou je vysoká hmotnost [8].

❖ **Prepreg**

Výztužná tkanina, která se naimpregnuje nedovytrzenou pryskyřicí, se označuje jako prepreg (Obr 9). Pryskyřice nanesená na tkaninu obsahuje vytvrzovací činidlo a v důsledku toho se prepreg může vložit do formy bez přidání dalších pryskyřic a za zvýšeného tlaku a tepla se vyformuje do daného tvaru ve vyhřívaných lisech nebo v autoklávu na formách. Pokud se požaduje určitá tloušťka výrobku, lze jednotlivé tkaniny na sebe vrstvit. Nejčastější matricí pro prepregy jsou epoxidové, fenolické, vinylové a nenasycené polyesterové pryskyřice. Výztužný systém je volen např. z tkaniny z uhlíkových, skelných nebo aramidových vláken [11].

Mezi přednosti prepregu patří jeho spojení matrice a výztužného systému v přesném poměru. Po vytvrzení má prepreg nízkou hmotnost, vysokou pevnost a tuhost, kvalitní povrch a dobrou tvarovatelnost. Nevýhodou je krátká doba a teplota skladovatelnosti

($-20\text{ }^{\circ}\text{C}$) a vysoká cena. Pro zamezení slepení jednotlivých vrstev při skladování se na obě strany prepregu přikládá separační fólie z PE [11].



Obr. 9 Prepreg [11]

1.1.2 Ostatní krycí materiály

- Kovové krycí materiály

Pro krycí potahy lze zvolit kovové materiály, které se nejčastěji vyskytují ve formě plechů. Plechy jsou voleny především kvůli jejich vysoké pevnosti, tuhosti, nízké ceně, odolnosti proti nárazu a pro jejich kvalitní povrch, který je odolný vůči korozi. Nežádoucími faktory je vysoká hmotnost, složitá výroba komplikovaných tvarů a možnost použití pouze vybraných druhů lepidel při výrobě. Pevnost a tuhost potahu závisí na hustotě zvoleného materiálu. Vzory plechových potahů jsou vyobrazeny na Obr. 10 [9], [13].



Obr. 10 Kovový krycí materiál [9]

- Dřevěná překližka

Dřevěné překližované desky neboli překližky (Obr. 11) se skládají z lichého počtu vrstev loupáných, či krájených dýh. Vrstvy jsou na sebe kladeny kolmo, a to materiálu dodává

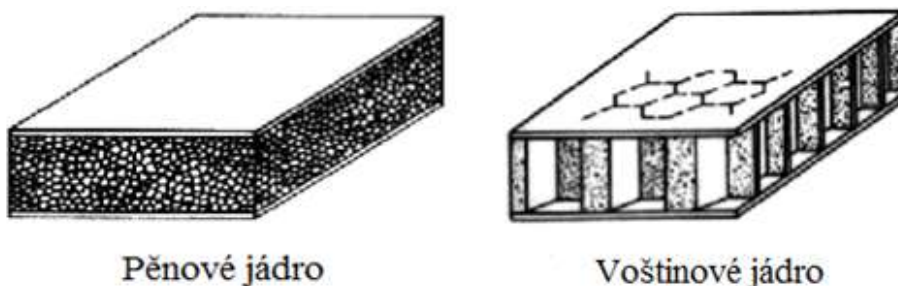
lepší tvarovou a rozměrovou stálost. Překližované desky jsou cenově výhodné, ale mají velmi nízkou pevnost, tuhost a nedoporučují se do vlhkého prostředí, dále jsou velmi hořlavé. Pro výrobu tohoto materiálu se nejčastěji používá dubové, bukové, smrkové a borovicové dřevo [14], [36].



Obr. 11 Dřevěná překližka [14]

1.2 Jádrové materiály

Jádra sendvičových struktur jsou vyráběna z různých materiálů (Obr. 12). Materiál a tloušťka jádra jsou voleny podle toho, jaké má sendvičová konstrukce požadované vlastnosti. Materiál je posuzován na základě smykových vlastností, hustoty, odolnost vůči vlhkosti, tepelně a zvukově izolačním vlastnostem. Hmotnost finálního sendvičového panelu závisí na hustotě jádra, tloušťkou a typem materiálu jsou ovlivněny izolační vlastnosti. Jádro musí mít dostatečnou pevnost a smykovou tuhost, protože sendvičové panely jsou především namáhány ohybem [15].



Obr. 12 Typy konstrukcí jádrových materiálů [16]

1.2.1 Pěnové jádrové materiály

Využití pěnových materiálů v dnešní době vzrůstá, důvodem častého využití je především dobrá zvuková i tepelná izolace a variabilita struktury jádra při změně výrobního procesu.

Díky tomu je možné z jednoho druhu materiálu vyrobit houževnaté nebo tuhé jádro [1], [20].

Pěnové jádrové materiály (Obr. 13) jsou dvoufázovými buněčnými materiály, kde první fáze je polymer a druhá plyn (tzv. nadouvadlo). Buňky pěny mají strukturu uzavřenou a samotnou nebo otevřenou a propojenou. Na základě typu buněk lze vyvodit vlastnosti pěny. Pěny s uzavřenými buňkami mají vyšší pevnost, ale špatnou absorpci zvuku. Otevřené buňky jsou také schopny absorbovat více vody [1], [20], [23], [39].



Obr. 13 Ukázka pěnového jádrového materiálu [17]

❖ Polyetylenterefralátová jádra – PET

Pěny PET se vyznačují výbornou odolností proti únavě, vysokou pevností i při nízké hmotnosti, tepelnou stabilitou, snadnou zpracovatelností a dobrými mechanickými vlastnostmi. PET pěna má hustotu v rozmezí 60–200 kg/m³ a buňky pěny mají strukturu uzavřenou, díky čemuž mají minimální absorpci vlhkosti. Tyto pěny lze zpracovávat všemi technologiemi, které se používají na výrobu sendvičových konstrukcí. Pěny lze obrábět do libovolných tvarů [18], [19].

❖ Polyvinylchloridová jádra – PVC

PVC pěna je jednou z nejvíce vyráběných a využívaných plastů na světě. Hlavními důvody je univerzálnost materiálu a schopnost odpuzovat vodu. PVC pěna má hustotu v rozmezí 30–400 kg/m³. Tento druh pěny se u sendvičové konstrukce vyskytuje ve dvou typech, PVC pěna lineární a PVC pěna zesíťovaná. Nevýhodou lineární pěny je, že za zvýšených teplot měkne, výhodou je její houževnatost a tažnost. Zesíťované pěny jsou chemicky odolné a samozhášivé, mají také vyšší tuhost a pevnost, ale jsou křehké [20], [23].

Jádra z PVC pěny se využívají v dopravním průmyslu jako kryty, vnitřní stěny kontejnerů nebo ve větrných elektrárnách [20].

❖ Styren-akrylonitrilová jádra – SAN

Tyto pěnová jádra mají uzavřenou buňkovou strukturu. Dobře absorbují nárazy, což je způsobené houževnatostí a pružností. Hustota SAN pěny je v rozmezí 50–160 kg/m³. Vyznačují se svou dobrou odolností proti působení tepla a chemickou stabilitou. Ostatními vlastnostmi se podobají PVC jádrům, proto je SAN jádra mnohdy nahrazují [20].

1.2.2 Voštinové jádrové materiály

Voštinová jádra je možné získat v různých materiálových variantách. Většinou to jsou lepenkové a papírové voštiny, které se vyrábí v různém rozmezí pevnosti. Voština je tvořena z tvarových buněk, např. čtverec, obdélník, vlnky (Flex-core). Nejčastěji je využíván šestiúhelník (Obr. 14). Pevnost struktury závisí na stabilitě stěny voštiny. Nevhodnou vlastností u voštiny je, že musí být použita lepidla s vysokou lepivostí (např. epoxidová), protože voštiny mají malou přilnavost plochy k vnějším vrstvám (mají malou kontaktní plochu) [15], [21].

Voštinová jádra lze vyrobit z mnoha materiálů, např. dřevo, hliník, termoplasty, ocel, či vláknové materiály. Pro zvětšení plochy pro přilepení vnější vrstvy (potahu), lze vyplnit jednotlivé buňky pěnou, a tím dojde ke stabilizaci stěn voštiny, zvýšení tepelných a akustických izolačních vlastností a celkovému zlepšení vlastností mechanických. Na druhou stranu dojde ke zvýšení hmotnosti výsledného sendvičového panelu. Voštiny lze zpracovat do libovolných ploch [1], [21], [22].



Obr. 14 Ukázka aramidového voštinového jádra [22]

2 VÝROBNÍ TECHNOLOGIE

Sendvičové konstrukce se vyrábí mnoha způsoby. Zvolené technologie výroby ovlivňují výsledné vlastnosti výrobku a zároveň cenu finálního produktu. Pro zvolení vhodné metody výroby je důležité zohlednit následující faktory:

- složitost dílce (tvar a velikost),
- sériovost dílce,
- požadovaná hmotnost a pevnost,
- kvalita povrchu,
- zvolené materiály [15], [24].

2.1 Ruční kladení

Ruční kladení je jednou z nejstarších a nejjednodušších metod výroby sendvičových konstrukcí. Tento způsob se používá hlavně při výrobě prototypů, rozměrných výrobků a pro výrobu malých sérií. Nevýhodou této technologie je její časová náročnost a nutnost odborně zaškolených pracovníků [25].

Pro výrobu je zapotřebí správně připravit formu a aplikovat na ni separátor, který usnadní vyjmutí finálního výrobku z formy. Poté se nanáší gel-coatová vrstva, díky které je vytvořena hladká pohledová strana výrobku a zároveň tato vrstva plní ochrannou funkci. Tato metoda výroby probíhá tzv. kladením za mokra, kdy se pryskyřice nanáší stříkáním, či roztíráním a do ní se vkládá rohož nebo tkanina výztužného systému (Obr. 15). Tento úkon je opakován, dokud se nezíská požadovaná tloušťka materiálu. Při metodě ručního kladení vznikají vzduchové bubliny, které negativně působí na mechanické vlastnosti. Pro eliminaci vzduchových bublin se používá drážkový váleček, ten zároveň zajišťuje lepší prosycení výztuže pryskyřicí. Pokud je cílem mít výrobek v co největší kvalitě, je možné toho dosáhnout pomocí stlačení všech vrstev podtlakem za pomoci pružné fólie [1], [6], [25].

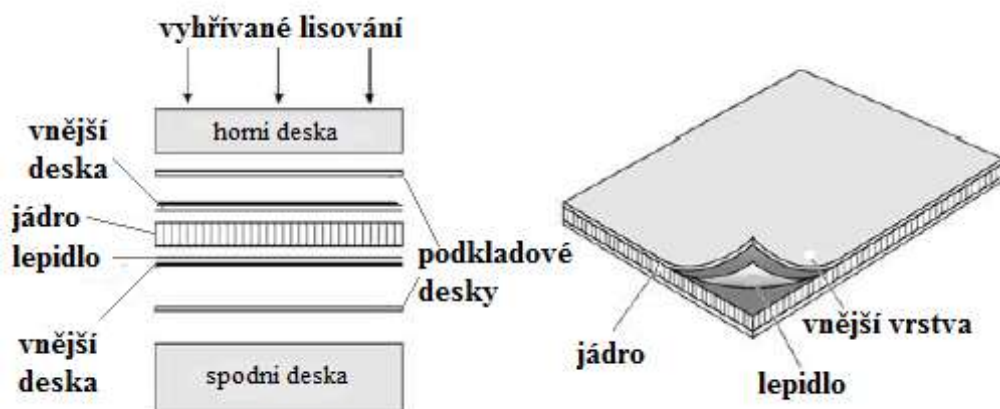


Obr. 15 Ruční kladení [24]

2.2 Lisování za tepla

Sendvičová struktura je složena ze dvou vnějších vrstev (nejčastěji prepregy nebo tenké kovové plechy), které jsou v případě plechů za pomoci lepidla spojeny s jádrem. Následně jde tato sestava do vyhřívaného lisu, kde je vložena mezi podkladové desky a zalisována (Obr. 16). Tento proces probíhá za zvýšené teploty a tlaku ve dvou a vícedílných formách, které jsou vyrobeny z kovu a mají chromovaný, či leštěný povrch. Tato technologie je využívána převážně ve velkosériové výrobě pro malé a středně velké díly [6].

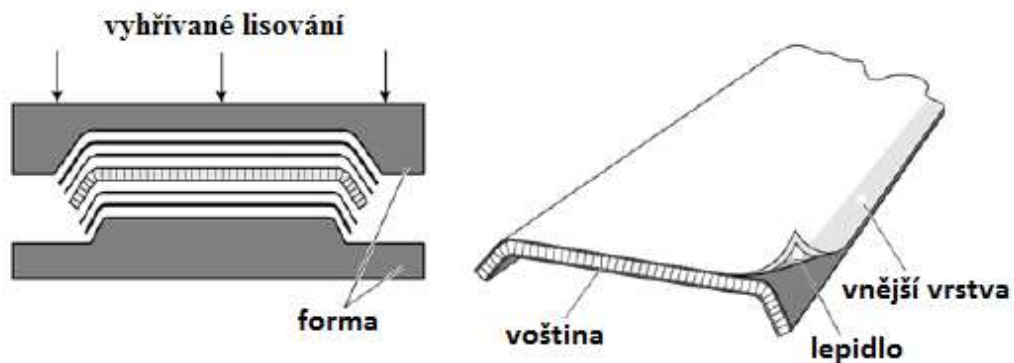
Mezi výhody této technologie se řadí krátká doba výrobního cyklu, možnost automatizace výroby a kvalitně vyrobený výrobek. Nevýhodou je finanční náročnost formy a samotného lisu [26].



Obr. 16 Lisování za tepla [26]

Lisování lze provádět i v uzavřené formě, tato metoda se využívá pro výrobky, na které je kladen požadavek na vysokou jakost povrchu a rozměrovou přesnost. Pro dosažení

požadované teploty a tlaku k vytvrzení se používá vnější působení tlaku a vyhřívaný nástroj (Obr. 17), nebo nevyhřívaný nástroj umístěný v peci, či lisu [6].

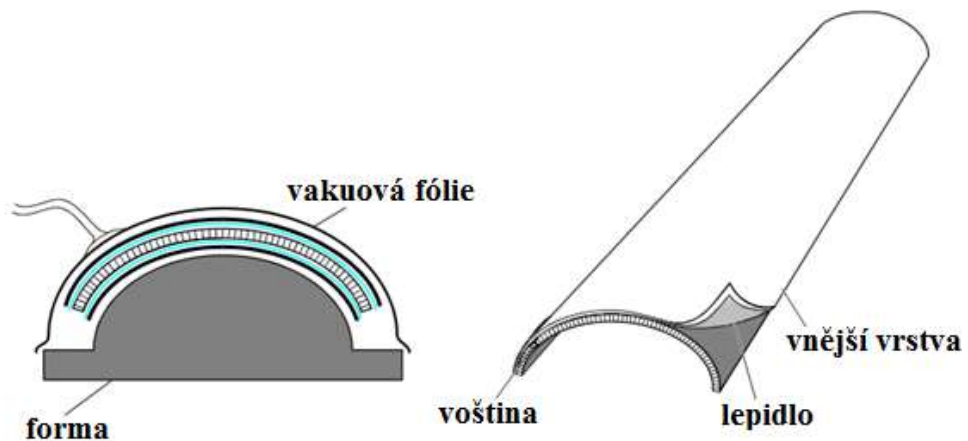


Obr. 17 Vytvrzování v uzavřené formě [26]

2.3 Lisování pomocí vakua

U tohoto typu technologie výroby se používá jednodílná forma, někdy lze použít i formu dvoudílnou, která je využita pro získání hladkého povrchu na obou stranách výrobku. Za působení vakua se ze sendvičové konstrukce odstraní vzduchové bubliny. Aby bylo vakuum vytvořeno, je potřebné použít vakuovou fólii a vývěvu, díky které vznikne tlak na vrchní části a uzavře celý systém. Mezi další pomocné materiály patří separační fólie, těsnění a odsávací tkanina. Pomocí separační fólie dochází k jednoduššímu vyjmutí výrobku a oddělení pomocných materiálů od výrobku. Těsnění systému je provedeno těsnicími páskami, které zajistí vzduchotěsný spoj. Odsávací tkanina slouží při odsávání vzduchu ze systému a pomáhá absorbovat přebytečnou pryskyřici přes separační fólii. Výsledný systém je uložen do vytvrzovací pece nebo autoklávu neboli vyhřívané tlakové komory, ve které se nastaví požadovaná teplota, tlak a vakuové cykly tak, aby došlo ke stabilizaci a vytvrzení pryskyřice v kompozitech [27].

Mezi výhody lisování pomocí vakua (Obr. 18) patří využití technologie pro malé a střední série, nízké pořizovací náklady na vakuovou pumpu, oboustranně hladké výsledné výrobky s dobrými mechanickými vlastnostmi. Za nevýhody lze považovat vytvrzování za zvýšené teploty [41].

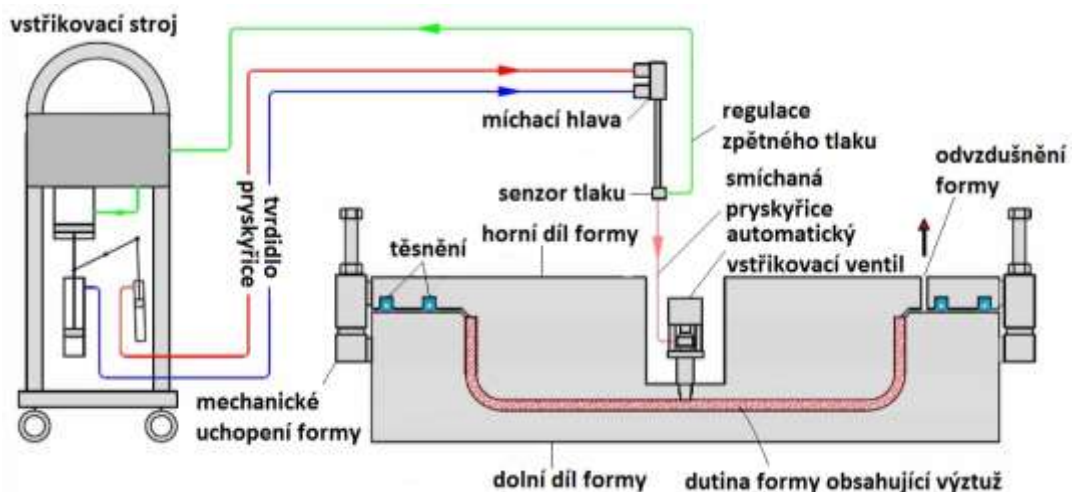


Obr. 18 Lisování pomocí vakua [27]

2.4 Technologie RTM (Resin Transfer Moulding)

V technologii RTM neboli vysokotlakém vstřikování (Obr. 19), se ukládá výztuž (rohož nebo tkanina) do dvoudílné formy zároveň s jádrem. Následně dochází k separaci a uzavření formy. Poté se pryskyřice vstřikuje do pracovního prostoru. V momentě, kdy začne pryskyřice vytékat z ventilačních otvorů, přestává se pryskyřice vstřikovat a dochází k vytvrzování, to probíhá za pokojové teploty nebo za zvýšené teploty. Při použití vakua dochází k odstranění vzduchu z formy a urychlení procesu (tzv. lehké RTM) [1], [13].

K hlavním výhodám RTM technologie se řadí vysoký obsah výztuže v objemu, eliminace vzduchových bublin, rozměrová stálost a uzavření formy, které zabraňuje možným únikům výparů během vytvrzování. Mezi nevýhody RTM technologie patří vysoká pořizovací cena formy, požadavky na kvalitu formy a nutnost zabezpečit vysoké tlaky během vstřikování [13].



Obr. 19 RTM technologie [28]

2.5 Vakuová infuze

Pro vakuovou infuzi je důležitý podtlak, který zajišťuje, aby byla výztuž a jádro prosyceno pryskyřicí. Prosycování vakuovou infuzí se používá pro malé a střední série. Výztuž je používána v různých formách a z různých materiálů, např. tkanin z uhlíkových/aramidových/skleněných vláken nebo ze speciálních prošivaných rohoží. Veškeré materiály, které utváří sendvičovou konstrukci, se pokládají na jednodílnou formu, kde je před transportem pryskyřice vytvořeno vakuum. Prosycování probíhá pod fólií, jedná se tedy o uzavřený systém. Tato metoda je vhodná pro konstrukce, u kterých jsou zakomponovány jádrové materiály a dochází tak k vytvoření sendvičové struktury. Nejběžnější jsou pěnová jádra, případně jádra přírodní, např. korková. Tato technologie se nepoužívá pro voštinová jádra [6], [29], [35].

V této technologii se využívají pomocné materiály, které se kladou do jednodílné formy. Po ukončení výroby se z pomocných materiálů, mezi které se řadí odtrhová tkanina, rozváděcí tkanina, odsávací rohož a vakuová fólie (utěsněna těsnicí páskou), stává odpad [24], [35].

Výhody vakuové infuze:

- vysoká kvalita finálního výrobku,
- pevnost a tuhost výrobku,
- velkoplošné výrobky,
- chemická a tepelná odolnost,
- minimální množství dutin [29].

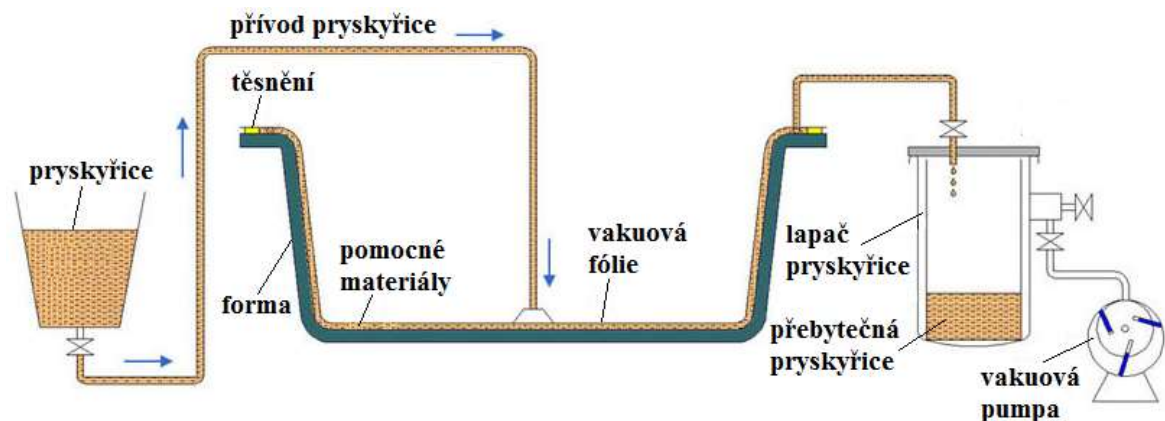
Nevýhody vakuové infuze:

- vysoké požadavky na zkušenosti pracovníka,
- vysoké pořizovací náklady,
- obtížná recyklace,
- náročná výroba [29].

2.5.1 Postup výroby vakuové infuze

Pro výrobu vakuové infuze se používají jednodílné formy, do které se postupně vkládá suchá výztuž a pomocné materiály. Pomocí vaku (nejčastěji ze silikonového kaučuku) nebo polymerní fólie je zabezpečen vzduchotěsně uzavřený prostor. Po navrstvení

materiálů se vytvoří podtlak, z formy se odsaje vzduch a dojde k jejich slisování. Pryskyřice se do formy přivádí systémem hadic a je rozváděna pomocí rozváděcí tkaniny a účinkem vakua. Přebytečná pryskyřice se odsává z formy do vrstvy odsávací, která je vyrobena z polymerních vláken, které snášejí teplotu u vytvrzování. Následně dochází k síťování pryskyřice, které probíhá za běžných atmosférických podmínek. Princip této technologie je schematicky uveden na Obr. 20 [29].



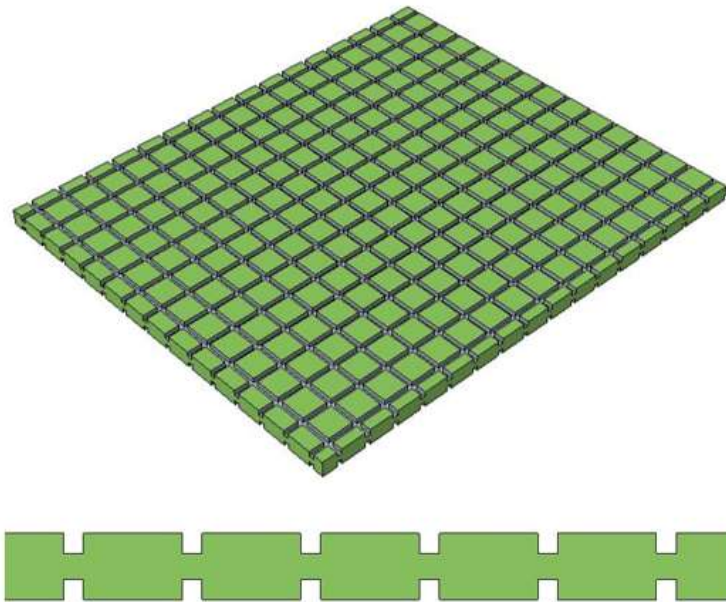
Obr. 20 Princip vakuové infuze [30]

2.5.2 Modifikace pěnového jádra

Pěnové jádro pro výrobu sendvičových panelů lze různě modifikovat, např. frézováním, vrtáním nebo prořezáváním, kdy tyto modifikace umožňují lepší tok pryskyřice po celém povrchu jádra. Díky tomu u takto modifikovaných jader není třeba pro rozvod pryskyřice používat průtoková média, např. rozvodné sítě, čímž se snižuje finanční a časová náročnost výroby. Před výrobou sendvičového panelu musí být povrch pěnového jádra očištěn [43].

❖ Frézování povrchu pěnového jádra

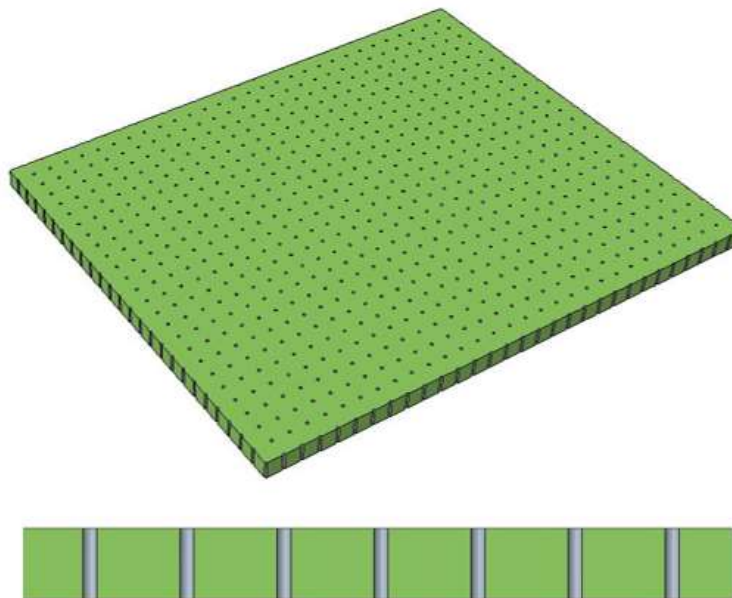
Vzniklé drážky na povrchu pěnového jádra zaručují celistvý a rychlý průtok pryskyřice po povrchu jádra a dochází k lepšímu odvedení vzduchu z formy. Křížové drážkování je další volba, která se většinou používá u vakuové infuze, aby se zabránilo vzniku suchých míst. Do pěnového jádra lze frézovat z obou stran. Vzniklé drážky mají šířku 2-3 mm a jsou od sebe vzdálené maximálně 50 mm, aby nedošlo ke vzniku suchých míst. Úpravy jádra jsou patrné na 3D modelu (Obr. 21) [43].



Obr. 21 Ukázka vyfrézovaného pěnového jádra

❖ Vrtání pěnového jádra

Další modifikací jádra je vrtání (Obr. 22). Otvory jsou vrtány tradičními vrtáky do maximálního průměru 2,5 mm ve vzdálenosti maximálně 32 mm od sebe a zajišťují kvalitnější dopravu pryskyřice na obou stranách pěnového jádra. Rozmístění otvorů v jádře je ve tvaru čtverce nebo kosočtverce [42].

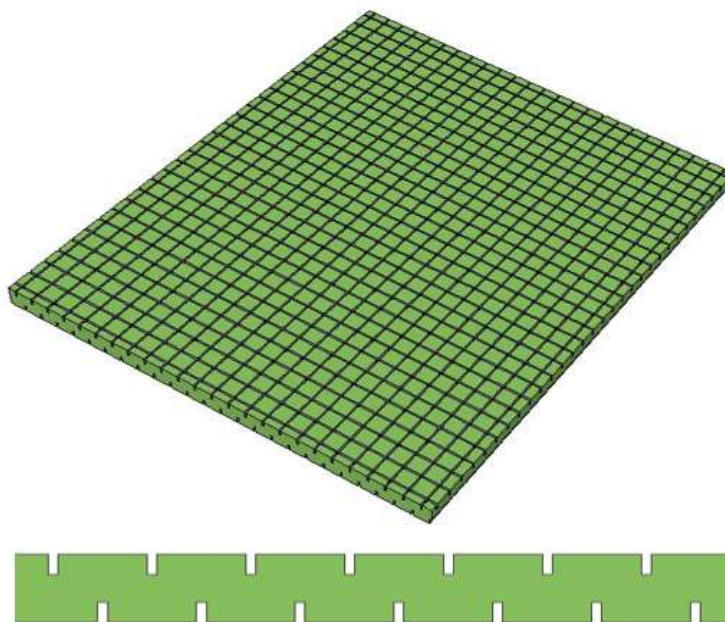


Obr. 22 Ukázka vyvrtaného pěnového jádra

❖ Prořezání povrchu pěnového jádra

Pro prořezání pěnového jádra se používá nůž nebo jiný ostrý předmět, kterým je povrch jádra prořezán z obou stran tak, aby drážky nebyly nad sebou, ale aby byly posunuty

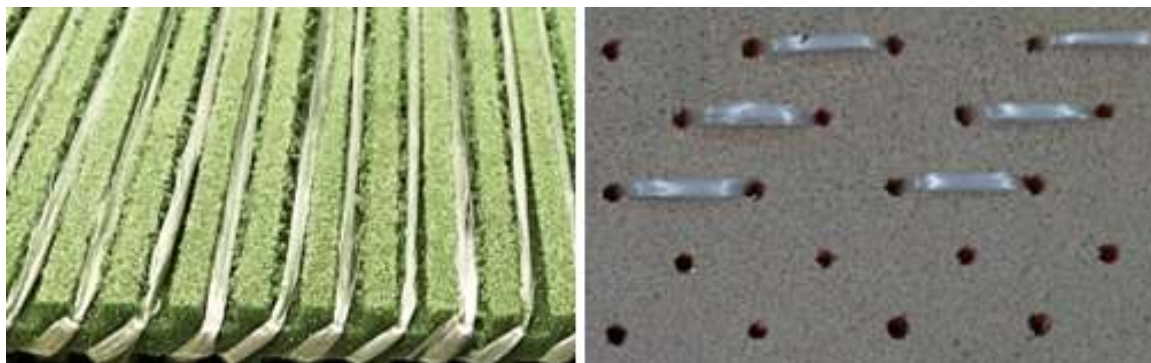
o polovinu šířky mřížky (Obr. 23). To napomáhá proudění pryskyřice na obě strany jádra a vytváří rovnoměrnou distribuci pryskyřice v celém jádru. Hloubka vzniklé drážky je až 60 % tloušťky pěnového jádra. Díky tenké šířce řezu dochází k menšímu vstřebávání a pomalejšímu toku pryskyřice než např. u frézování [42].



Obr. 23 Ukázka prořezaného pěnového jádra

❖ Vyztužení pěnového jádra

Vyztužování pěnového jádra, které zajišťuje vyztužení celé sendvičové konstrukce, zlepšuje mechanické vlastnosti jádra a vazbu (soudržnost) vnějších vrstev a jádra. Vyztužení skelným rovingem probíhá ručně, případně může být i automatizováno, kdy skelný roving je umístěn do vyfrézovaných drážek či otvorů v pěnovém jádru (Obr. 24) [12].



Obr. 24 Vyztužení pěnového jádra skelným rovingem [41]

3 ZKOUŠKY SENDVIČOVÝCH KONSTRUKCÍ

Pro zjištění finálních vlastností zkoumaného materiálu je zapotřebí provést mechanické zkoušky, které určí vhodnost materiálu a použití v praxi. Během zkoumání mechanických vlastností se sledují dané cíle. Nejdůležitějším cílem je získání dat, které jsou dále zpracovány konstruktéry, poté se zjištěné mechanické vlastnosti používají pro podložení kvality materiálu a také mohou být využity při výstupní kontrole. Zvolený způsob testování by měl simulovat reálné zatěžování výrobku [31], [32].

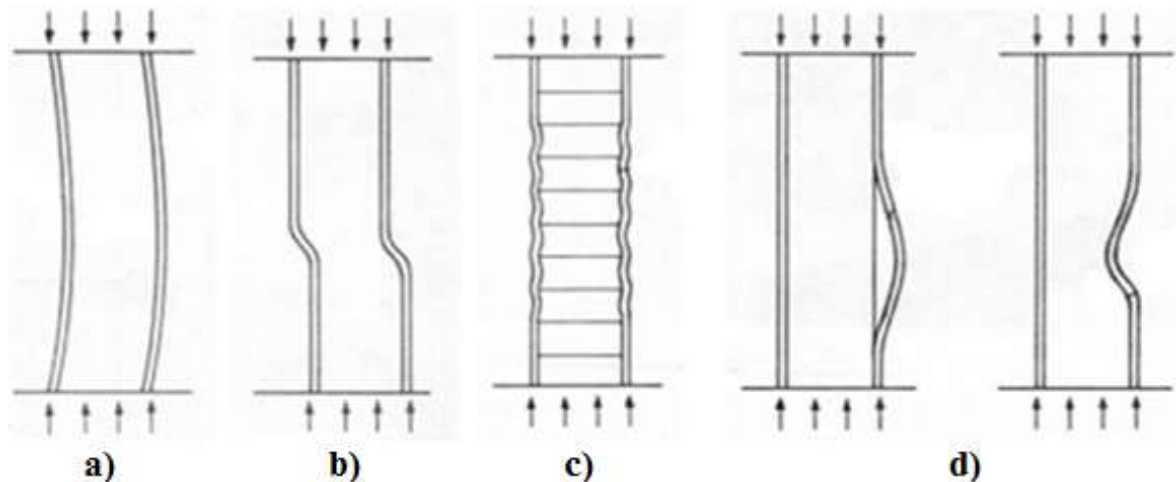
Zkoušky lze provést samostatně pouze pro krycí vrstvy, jádro nebo kompletní sendvičovou konstrukci. Je důležité, aby celá konstrukce splňovala požadované vlastnosti a aby byla vazba mezi jednotlivými komponenty spolehlivá a přenášela potřebné zatížení [31].

3.1 Zkouška bočním tlakem – Edgewise Compression Test

Pomocí tlakové zkoušky se posuzuje únosnost sendvičové konstrukce. Tato zkouška se provádí dle americké normy ASTM C364/C364M-07 [33].

Princip této zkoušky je vyvození takové síly, která postupně narůstá a dochází k namáhání vzorku na vzpěr. Pro dosažení správného výsledku je zapotřebí uložit testovaný vzorek tak, aby osa vzorku byla rovnoběžná se směrem zatěžování. Následně dochází k postupnému růstu tlakového zatížení, přičemž síla je přenášena na panel pomocí lepené či sevřené krajní podpěry. Pomocí tohoto testu jsou zjištěny maximální zatěžující síly, které se používají do vzorce k výpočtu únosnosti vnějších vrstev v sendvičové struktuře neboli pevnosti v tlaku [1], [33].

Tlaková zkouška způsobuje mnoho typů porušení, které se dělí do skupin. Jednotlivé možné poruchy sendvičových panelů jsou uvedeny níže (Obr. 25). Sleduje se, zdali dojde k poruše potahu (zvlnění, separace od jádra) nebo samotného jádra (ztráta stability, smyková porucha) [1], [33].



Obr. 25 Typy tlakového porušení: a) vzpěr, b) zvlnění a porucha jádra, c) zvlnění vnějších vrstev, d) zvlnění vnějších vrstev a porucha jádra [34]

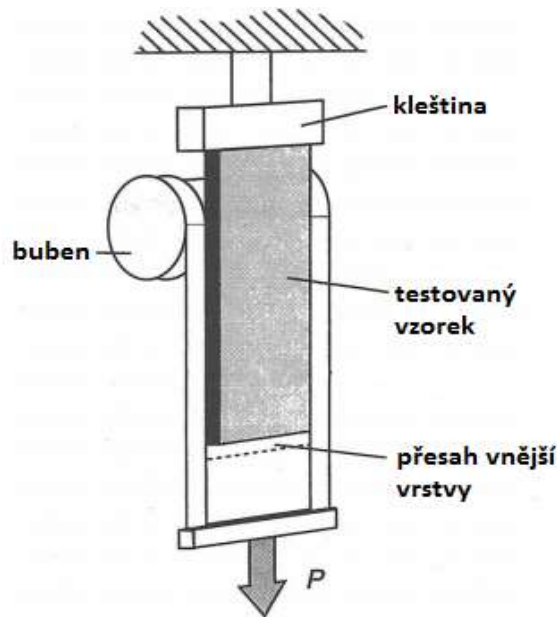
3.2 Zkouška odlupování – Peel test

Pro srovnání soudržnosti spoje mezi jádrem a vnější vrstvou sendvičové struktury se používá zkouška odlupování, pro kterou jsou definované zkušební podmínky. Tuto zkoušku lze provádět více metodami [35].

3.2.1 Zkouška odlupování pomocí navíjecího bubnu

Tento způsob odlupování se používá zvláště pro sendvičové struktury s tenkou vnější vrstvou. Doporučené rozměry vzorků jsou; šířka 76 mm, délka 305 mm (vč. 25 mm přesahu na koncích vnější plochy). Důležitým kritériem zkoušky je, že zkoumaný vzorek se nesmí ohýbat, dokud se odlupuje vnější vrstva. Ze síly, která je potřebná pro oddělení jádra od vnější vrstvy a z ohybu krycí vrstvy, se vypočítá krouticí moment. Veškeré parametry zkoušky jsou uvedeny v normě ASTM D 1781 [34], [35].

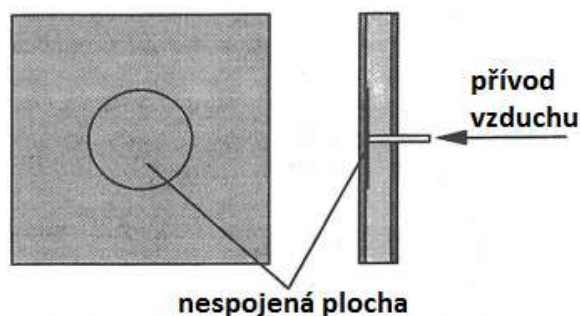
Během testování je sendvičový vzorek upnut za horní plochu v kleštině a spodní plocha je upnuta k bubnu (Obr. 26). Za konstantní rychlosti je vzorek postupně zatěžován tahem a následně se stanovuje odolnost vůči odlupování v délce cca 150 mm [34], [35].



Obr. 26 Odlupování navíjecím bubnem [37]

3.2.2 Zkouška odlupování pomocí tlaku vzduchu

Pro provedení zkoušky odlupování (peel test), neboli zkoušky odlupování pomocí tlaku vzduchu (Obr. 27), je zapotřebí vzorek, který má ve středu vnesenou kruhovou delaminaci. Mezi spodní plochou krycího potahu a povrchem jádra je tenká teflonová vrstva (fólie), pomocí které je vytvořena počáteční delaminace. Následně je do sendvičové struktury zavedena trubička, jíž se do struktury přivádí vzduch pod tlakem. Tlak vzduchu lze regulovat pomocí ventilu. Hodnota tlaku se zaznamená ve chvíli, kdy dochází k odlupování vnější vrstvy od jádra [35].



Obr. 27 Odlupování pomocí tlaku vzduchu [37]

3.2.3 Zkouška odlupování pomocí tahu

Při této zkoušce dochází k odlupování vnější vrstvy sendvičové struktury pomocí tahové síly (Obr. 28). K ocelové desce je uchycena spodní vnější vrstva a vrchní vrstva je

odlupována. Pro lepší uchycení vzorku k zařízení, je důležité mít vytvořený přesah vnější vrstvy. Do přesahu je vyvrtán otvor, do kterého je zaveden trn, případně se nalepí patka. Trnem je taženo, čímž dochází k odlupování vnější vrstvy sendvičové struktury [35].



Obr. 28 Odlupování pomocí tahu [37]

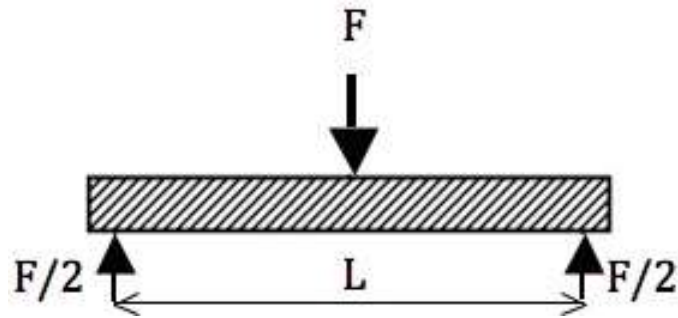
3.3 Zkouška ohybem

Ke stanovení ohybové a smykové tuhosti konstrukce, smykové pevnosti jádra, pevnosti v tahu a tlaku krycí vrstvy nebo modulu pružnosti slouží ohybová zkouška. Pomocí této zkoušky jsou zjištěny i základní informace o celkové pevnosti sendvičového materiálu (vazba mezi vnější vrstvou a jádrem). Pevnost je výrazně ovlivněna polohou vláken k neutrální rovině. Vyvinutý ohybový moment vyvolá tah na horních vláknech a tlak na vláknech spodních [6], [35].

Zkouška se provádí na trhacím stroji, kdy jsou podpěry vzorku uloženy na otočných válečkách tak, aby nebylo bráněno pohybu tyče a následnému deformování. Zkoušku ohybem lze provádět za pokojové či zvýšené teploty, jak uvádí norma ASTM C393/C393M-11 [6], [35], [45].

3.3.1 Tříbodová zkouška ohybem

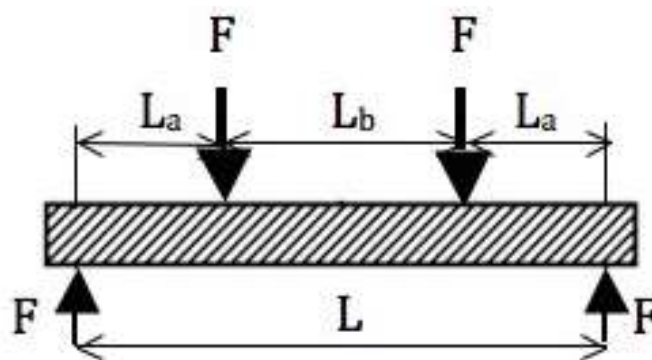
U tříbodového ohybu je vzorek podepřen ve dvou bodech, uprostřed nichž je zatěžován silou potřebnou ke konstantní rychlosti deformace (Obr. 29). Tato síla působí na střed délky vzorku z vrchní strany tak dlouho, dokud nedojde k přelomení či předem stanovené deformaci. Ve středu délky vzorku je definován bod lomu [35].



Obr. 29 Třibodová zkouška ohybem [38]

3.3.2 Čtyřbodová zkouška ohybem

Tato metoda se od třibodového zatížení odlišuje tím, že na zkušební vzorek působí zatěžující síla ve dvou bodech (Obr. 30). Díky dvěma středovým trnům dochází k nižšímu tlakovému napětí než u třibodového ohybu. V tomto případě je ohybový moment vyvolán pomocí dvou symetricky rozloženým břemenům, díky kterým ohybový moment lineárně roste (od nuly až po maximální hodnotu, která je pod zatěžujícím břemenem), kdy mezi shodnými zatěžujícími silami je ohybový moment shodný [35].



Obr. 30 Čtyřbodová zkouška ohybem [38]

4 SHRUTÍ TEORETICKÉ ČÁSTI

V teoretické části jsou uvedeny informace získané z odborné literatury, které popisují sendvičové kompozitní materiály, výrobní technologie a mechanické zkoušky sendvičových konstrukcí.

První část se zaměřuje na sendvičové kompozitní materiály, složené z jádra a dvou krycích vrstev (potahů), které jsou k sobě pevně spojeny. Nejčastěji se používají kompozitní krycí materiály a pěnové jádro. Tato kombinace bude použita i v praktické části u výroby zkušebních vzorků.

Další část je zaměřena na výrobní technologie. Mezi výrobní technologie řadíme např. ruční kladení, lisování, technologie RTM a vakuovou infuzi. Zvolená technologie ovlivňuje výsledné vlastnosti výrobku i finální cenu produktu. Při využití pěnového jádra se nejčastěji používá metoda vakuové infuze, pomocí které lze získat vysoce kvalitní finální výrobky, a proto bude tato metoda využívána i v praktické části. Dále jsou zde uvedeny i modifikace pěnového jádra, které zabezpečují lepší průtok pryskyřice po celém povrchu jádra.

V poslední kapitole teoretické části jsou popsány zkoušky sendvičových konstrukcí. Pomocí zkoušek lze zjistit finální vlastnosti materiálů a jejich následnou vhodnost pro použití v praxi. Získané data ze zkoušek se následně zpracovávají a způsoby, kterým jsou testovány, simulují reálné zatížení výrobku. Zkoušky se provádějí samostatně pro krycí vrstvy a jádro, nebo pro kompletní sendvičovou konstrukci.

II. PRAKTICKÁ ČÁST

5 CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE

Cílem diplomové práce je zjistit vliv modifikace pěnového jádra na únosnost sendvičové struktury. Za tímto účelem budou vyrobeny a mechanicky testovány zkušební vzorky. Hlavními zkouškami budou zkouška tříbodovým ohybem a tlaková zkouška za působení bočního tlaku. Naměřená data budou statisticky vyhodnocena a na základě výsledků dojde k porovnání jednotlivých typů modifikací s ohledem na únosnost celé sendvičové struktury.

Postup praktické části:

- volba materiálového složení,
- návrh typů modifikací pěnového jádra,
- výroba sendvičových struktur a příprava zkušebních těles,
- tříbodová zkouška ohybem,
- tlaková zkouška za působení bočního tlaku,
- mikroskopické pozorování.

6 MATERIÁLOVÉ SLOŽENÍ SENDVIČOVÝCH PANELŮ

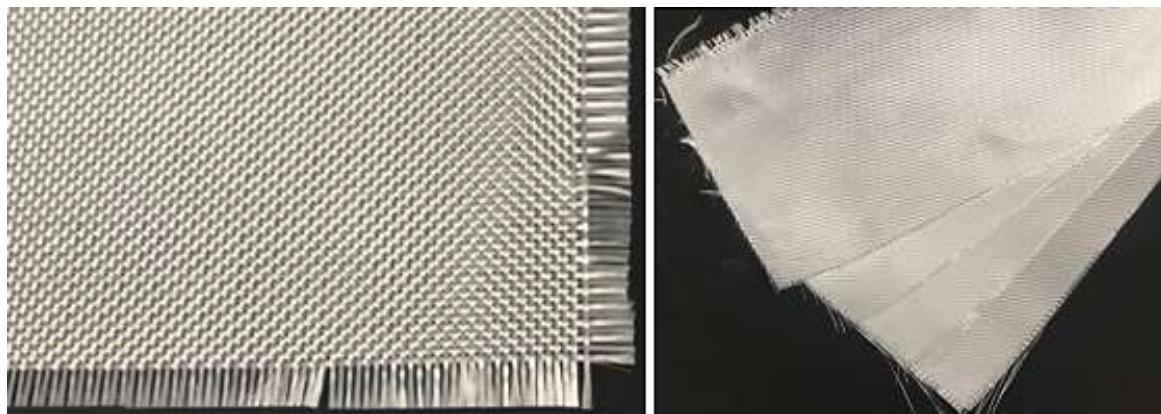
Testované zkušební sendvičové kompozitní panely byly připraveny z krycích panelů, které se skládají z vyztužujících vláken prosycených pryskyřicí a pěnového jádra.

6.1 Výztuž krycích potahů

Výztuží kompozitního laminátu, který byl použit na vnější krycí vrstvu sendvičového panelu, byla zvolena tkanina ze skelných vláken s vazbou plátňovou. Zvolená tkanina byla dodána firmou Havel Composites CZ s.r.o. Tato výztužná tkanina byla kladena ve 4 vrstvách po obou stranách panelu. Výsledná tloušťka krycí vnější vrstvy byla cca 1 mm. Vlastnosti tkaniny jsou uvedeny v Tab. 1 a její vzhled je zachycen na Obr. 31 [Příloha PI].

Tab. 1 Vlastnosti dodané vyztužující skelné tkaniny
[Příloha PI]

Plošná hmotnost [g/m²]	220 ± 15
Šířka [cm]	100 ± 1
Skladovací teplota [°C]	22
Vazba	plátňová



Obr. 31 Vyztužující skelná tkanina

6.2 Matrice

Sendvičové panely byly vyráběny dvěma způsoby, ruční laminací a vakuovou infuzí. Pro obě možnosti byla volena pryskyřice Biresin CR80 a tužidlo Biresin CH80-2 (Obr. 32).

Pryskyřice má nízkou viskozitu a díky tomu materiál rychle zatéká a výborně prosycuje tkaninu. Vhodným tvrdidlem k této pryskyřici je Biresin CH80-2, které bylo použito i v případě vyráběných panelů. Vlastnosti obou použitých materiálů jsou uvedeny v následující tabulce (Tab. 2) [Příloha PII].

Tab. 2 Vlastnosti epoxidové pryskyřice Biresin CR80 a tvrdidla Biresin CH80-2 [Příloha PII]

	Biresin CR80	Biresin CH80-2
<i>Viskozita [mPa.s]</i>	900	45
<i>Hustota [g/ml]</i>	1,13	0,99
<i>Mísicí hmotnostní poměr</i>	100	30
<i>Doba zpracovatelnosti směsi [min]</i>	80	
<i>Viskozita směsi [mPa.s]</i>	350	



Obr. 32 Pryskyřice a tvrdidlo

6.3 Jádrový materiál Airex C70.75

Pro sendvičové konstrukce bylo zvoleno pěnové jádro typu PVC pěna Airex C70.75.

Polymerní PVC pěna Airex C70.75 se vyznačuje uzavřenými buňkami a kombinací excelentní pevnosti a tuhosti při vztažení na hmotnost této pěny (Obr. 33). Je chemicky odolná a kompatibilní s velkou částí pryskyřic a obvyklými zpracovatelskými postupy. Minimálně absorbuje pryskyřici a vodu, nedrolí se. Pro sendvičové panely bylo použito pěnové jádro s tloušťkou 10 mm. Vybrané vlastnosti pěny jsou uvedeny v Tab. 3 [44] [Příloha PIII].

Tab. 3 Vlastnosti pěnového jádra Airex C70.75
[Příloha PIII]

	Airex C70.75
<i>Hustota [kg/m³]</i>	80
<i>Pevnost v tlaku [MPa]</i>	1,45
<i>Modul pružnosti v tlaku [MPa]</i>	104
<i>Pevnost v tahu [MPa]</i>	2
<i>Modul pružnosti v tahu [MPa]</i>	66
<i>Pevnost ve smyku [MPa]</i>	1,2
<i>Modul pružnosti ve smyku [MPa]</i>	30



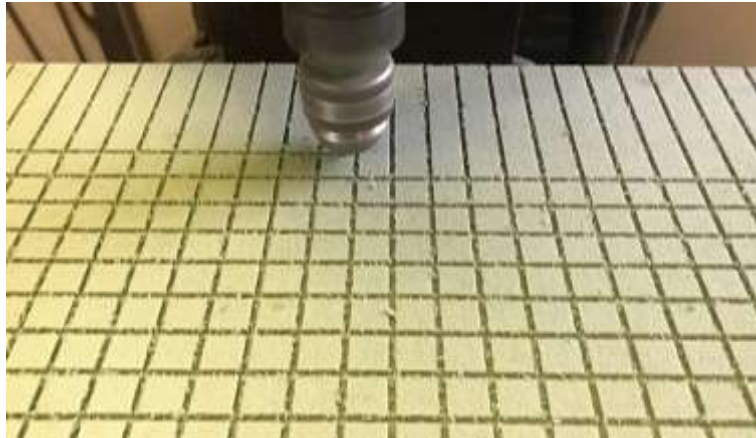
Obr. 33 Pěnové jádro Airex C70.75

6.4 Modifikace pěnového jádra

Pro sendvičové konstrukce byly připraveny tabule pěny o rozměrech 400×350 mm. Celkem bylo připraveno devět pěnových tabulí, které byly následně různě modifikovány. Provedené modifikace jsou uvedeny v následujících podkapitolách.

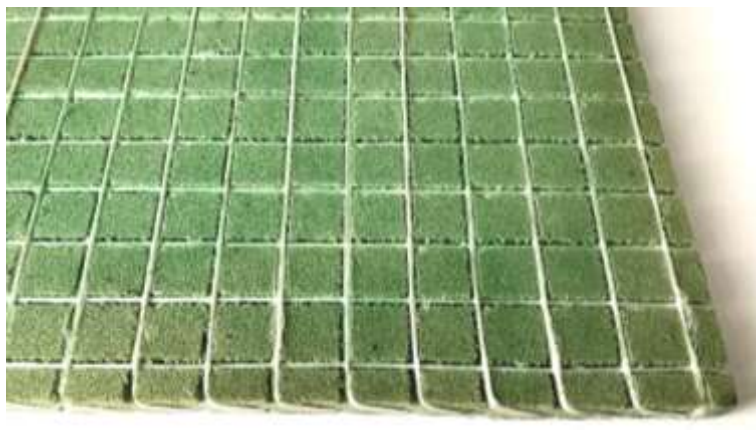
6.4.1 Frézování povrchu pěnového jádra

Frézování pěnového jádra probíhalo ručně na frézce, kdy jádro bylo na upínací stůl připevněno oboustrannou páskou kvůli zabezpečení stability a zamezení jeho pohybu. Po obou stranách pěnového jádra byly vytvořeny drážky o šířce 3 mm, frézované do hloubky 3 mm. Rozteč mezi jednotlivými drážkami, vytvořenými v obou osách (X i Y) byla rovna 15 mm. Průběh výroby je zachycen na Obr. 34. Z obou stran byla vyfrézována mřížka o rozměrech 15×15 mm frézou o průměru 3 mm.



Obr. 34 Frézování drážek do pěnového jádra

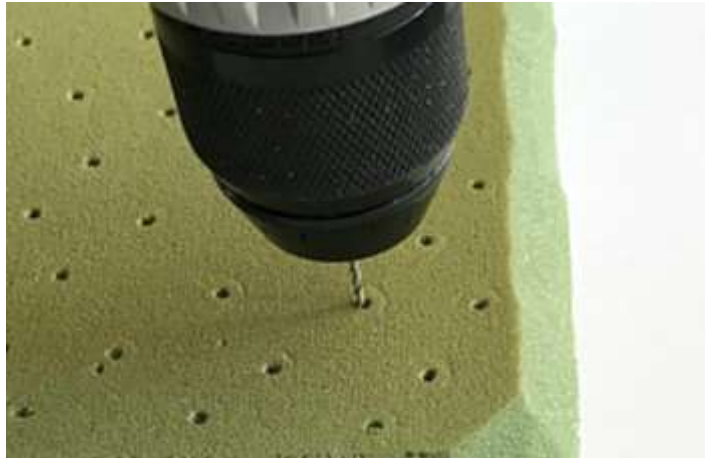
U jednoho frézovaného jádra bylo dále vytvořeno vyztužení pomocí skelného rovingu, který byl uložen do daných drážek (Obr. 35).



Obr. 35 Propletení pěnového jádra

6.4.2 Vrtání pěnového jádra

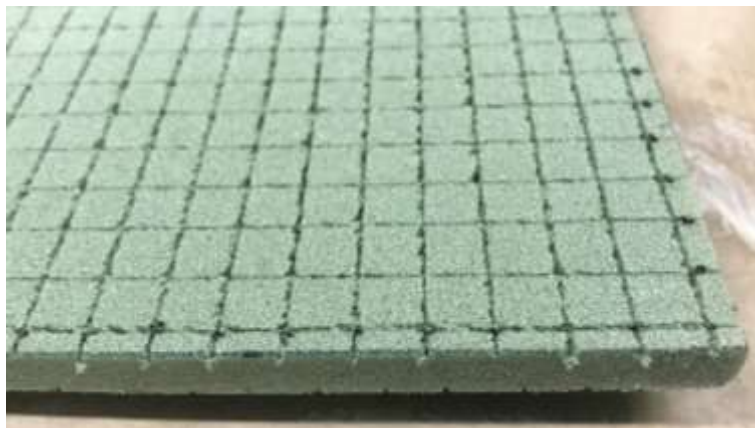
Na povrchu pěnového jádra se rozvrhly body, které následně tvoří síť otvorů, jimiž proudící pryskyřice penetruje z horní do dolní krycí vrstvy. Body byly na jádru rozvrženy kosočtverečně pod úhlem 60° ve vzdálenosti 15 mm od sebe. Vrtání probíhalo na stojanové vrtačce s vrtákem o průměru 1,5 mm (Obr. 36).



Obr. 36 Vrtání otvorů do pěnového jádra

6.4.3 Prořezání povrchu pěnového jádra

Na povrchu pěnového jádra byla rozměřena síť, která byla následně prořezána zalamovacím nožem z obou stran. Vzniklé drážky na povrchu jádra utvořily mřížku, jak lze vidět na Obr. 37. Drážky nebyly nad sebou, ale byly vůči sobě posunuty o polovinu vzdálenosti rozteče. Touto modifikací byly upraveny dvě jádra, kdy u prvního byla vyřezaná mřížka s mezerami 10×10 mm a u druhého mřížka s mezerami 20×20 mm.



Obr. 37 Prořezání pěnového jádra

7 VÝROBA SENDVIČOVÉHO KOMPOZITNÍHO MATERIÁLU

Pro přípravu zkušebních sendvičových panelů byly použity dvě základní technologie, a to ruční laminace a vakuová infuze.

7.1 Výroba ruční laminací

První technologií, kterou byly vzorky vyrobeny, byla ruční laminace. Nejdříve byla na požadovaný rozměr nastříhána výztužná tkanina, která následně tvořila krycí panely sendvičové konstrukce. Do konstrukce bylo použito jádro z PVC pěny, které nebylo upraveno.

Následně, co byly výztuže nastříhané, došlo k přípravě formy, čímž se rozumí její očištění a upravení vhodným separátorem. Pro separaci byl použit separační vosk Oskar's M 700/C-WAX, který byl nanesen ve třech vrstvách a následně vyleštěn. Poté byla připravena matrice tvořená směsí pryskyřice a tvrdidla v hmotnostním poměru 100:30. Nastříhané výztuže byly kladeny na jádro ve čtyřech vrstvách, na každou vrstvu byla ručně nanesena matrice pomocí válečku a přebytečná pryskyřice a vzduch byly vytlačeny rýhovaným válečkem. Pro získání co nejkvalitnějších panelů byla na naskládané materiály položena odtrhová tkanina a odsávací rohož, přes které byla umístěna vakuová fólie, díky které byl pomocí vakuové vývěvy odsán vzduch, a došlo ke stlačení jednotlivých vrstev. Následovalo vytvrzení sendvičové konstrukce za pokojové teploty po dobu 24 hodin. Výroba byla dokončena odformováním sendvičové konstrukce.

Výroba vzorků pomocí ruční laminace byla provedena, ale během měření těchto vzorků se ukázalo, že nebyly vyrobeny kvalitně, a proto nebude porovnána v konečném vyhodnocení.

7.2 Výroba vakuovou infuzí

Tato technologie byla použita pro výrobu všech typů modifikací pěnového jádra. Následující podkapitoly popisují použité materiály a zvolený výrobní postup.

7.2.1 Pomocné materiály

Pro výrobu sendvičových konstrukcí pomocí vakuové infuze je zapotřebí použít řadu pomocných materiálů, které však po ukončení výroby a odformování výrobku přechází na odpad.

❖ *Odrhová tkanina*

Odrhová tkanina (Obr. 38), vyráběna nejčastěji z nylonu, je kladena jako první na suchou výztuž. Usnadňuje oddělení pomocných materiálů, které jsou na ni kladeny, od povrchu výrobku. Vytváří texturovaný a čistý povrch, jenž je vhodný pro následné technologické operace, např. lepení, laminování, povrchové úpravy.



Obr. 38 Odrhová tkanina

❖ *Distribuční síť*

Pokud je během vakuové infuze zapotřebí pryskyřici rozvést rychleji a s lepším tokem, používá se distribuční síť (Obr. 39). Ta zabezpečuje optimální distribuci pryskyřice po celém povrchu dílce a tím zaručuje větší pevnost. Pro ještě lepší a rychlejší tok pryskyřice lze distribuční síť použít ve více vrstvách.

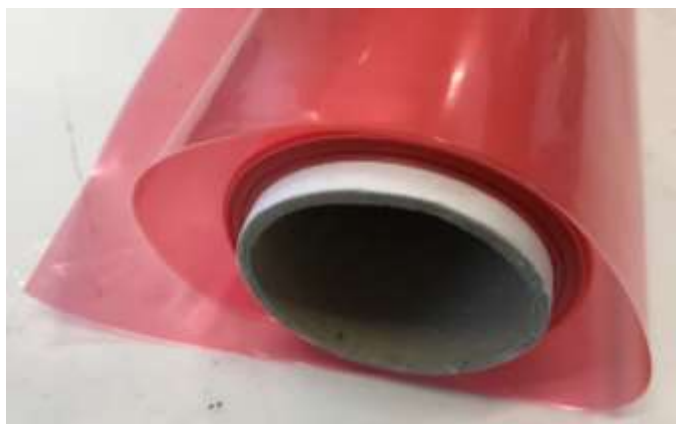


Obr. 39 Distribuční síť

❖ *Vakuová fólie*

Pro rovnoměrné rozložení tlaku po povrchu kompozitní struktury a ke stlačení jednotlivých vrstev materiálů a pomocných materiálů se používá vakuová fólie (Obr. 40). Fólie se nejčastěji vyrábí z polyamidu nebo polyethylenu, je odolná proti přetržení a je flexibilní.

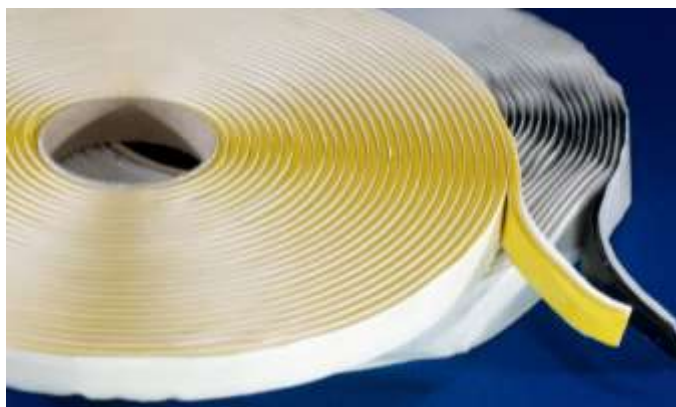
Pro použití fólie při vakuové infuzi je zapotřebí, aby překryla všechny pomocné materiály, a proto se její velikost volí o 30-40 % větší než samotný výrobek.



Obr. 40 Vakuová fólie

❖ *Těsnicí páska*

Těsnicí páska vytváří vzduchotěsný spoj mezi vakuovou fólií a formou. Dále se používá k utěsnění prostoru mezi konektorem a přívodní hadicí. Povrch, na který je páska lepena, musí být důkladně očištěn. Druh těsnicí pásky se volí dle teploty vytvrzování (Obr. 41).



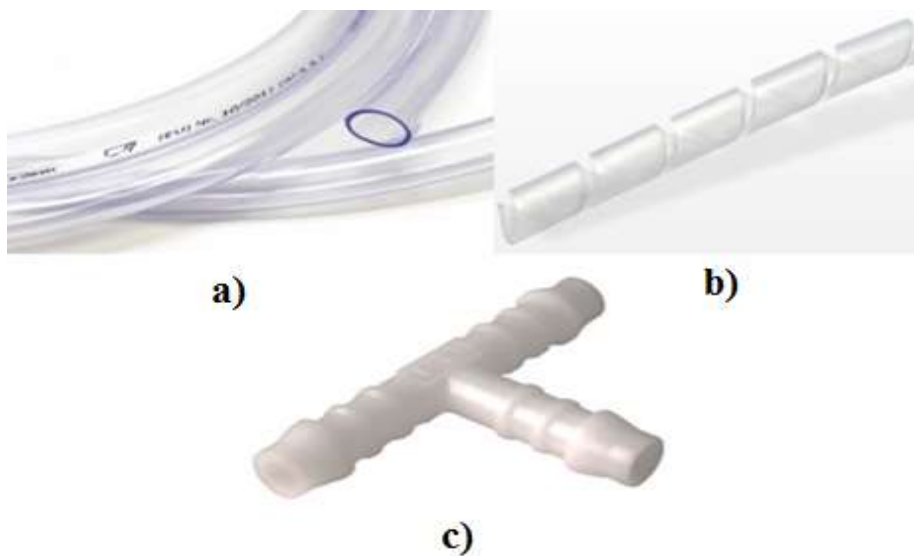
Obr. 41 Těsnicí páska

❖ *Hadice a konektor*

Pro dopravu pryskyřice a odvod vzduchu z formy se používají pružné hadice. Lze je také využít pro odvod přebytečné pryskyřice. Hadice je tepelně a chemicky odolná a nejčastěji se vyrábí z PE, případně PVC. Při výrobě pomocí vakuové infuze se používají dva typy hadic:

- a) Hadice pro přívod matrice, která současně slouží také k odvodu vzduchu (Obr. 42 a)
- b) Spirálová hadice se využívá pro lepší rozvod pryskyřice do špatně dostupných míst (Obr. 42 b)

K propojení jednotlivých hadic mezi sebou se používá tzv. konektor (Obr. 43 c). Nejčastěji se vyrábí z polyetylenu. Tento typ propojení je velmi efektivní a cenově úsporný.



Obr. 42 a) hadice pro přívod matrice, b) spirálová hadice, c) konektor

❖ Rezervoár

Pro zachycování přebytečné pryskyřice se využívá přepadová nádoba, tzv. rezervoár (Obr. 43). Ten je umístěn mezi vývěvu a formu a zabraňuje vniku pryskyřice do vývěvy a případnému znehodnocení vývěvy. Na rezervoár lze umístit měřák podtlaku (manometr).



Obr. 43 Rezervoár

❖ Vakuová vývěva

Vývěva odsává vzduch z formy a tím vytváří vakuum (Obr. 44). Díky vakuu dochází k odsávání pryskyřice a její dopravě do formy. Následně je přebytečná pryskyřice odsávána do rezervoáru. Pro vytvoření vakuové infuze je zapotřebí podtlaku 0,8-1 bar.



Obr. 44 Vakuová vývěva

7.2.2 Postup výroby vakuovou infuzí

Prvním krokem pro výrobu sendvičových materiálů pomocí vakuové infuze je důkladné očištění a naseparování formy. Separace byla prováděna separačním voskem Oskar's M 700/C-WAX, který byl nanesen ve třech vrstvách a následně přešetěn po celém povrchu. Následně se skelná vyztužující tkanina nastříhala na požadované rozměry a byla položena na naseparovanou formu ve čtyřech vrstvách v orientaci $0^{\circ}/90^{\circ}/0^{\circ}/90^{\circ}$ (Obr. 45). Poté bylo na vrstvy položeno jádro a další čtyři vrstvy skelné tkaniny.

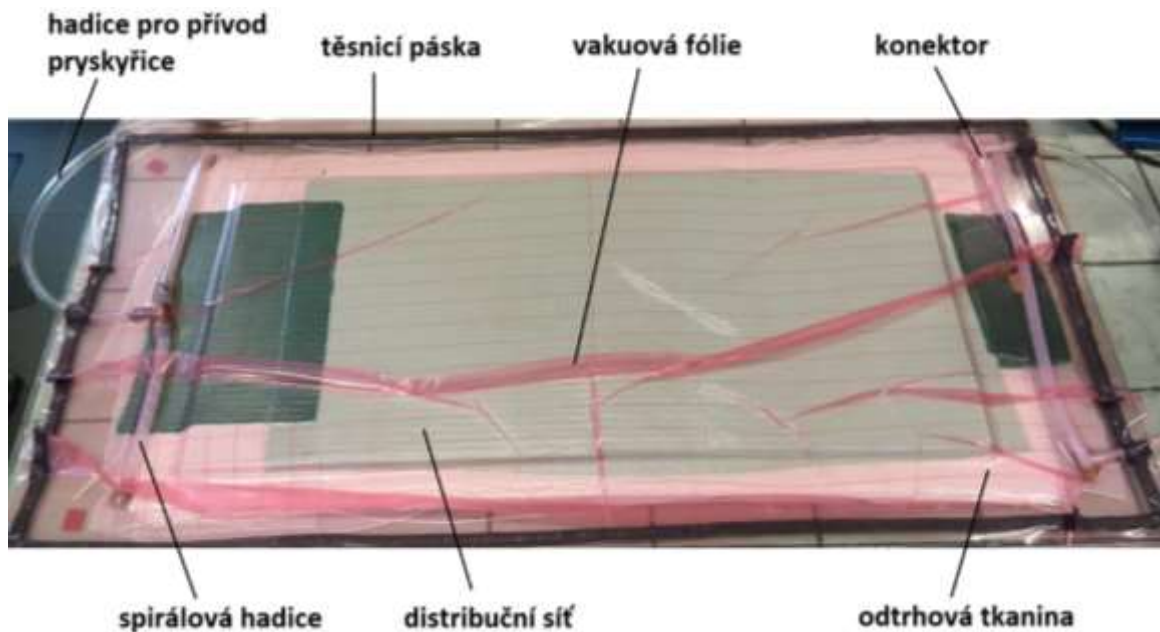
Dalším krokem bylo pokládání pomocných materiálů. Nejprve byla položena odtrhová tkanina na poslední vrstvu vyztužující tkaniny. Na odtrhovou tkaninu se umístila distribuční síťka, která zabezpečuje kvalitnější tok pryskyřice.



Obr. 45 Naskládané jednotlivé vrstvy

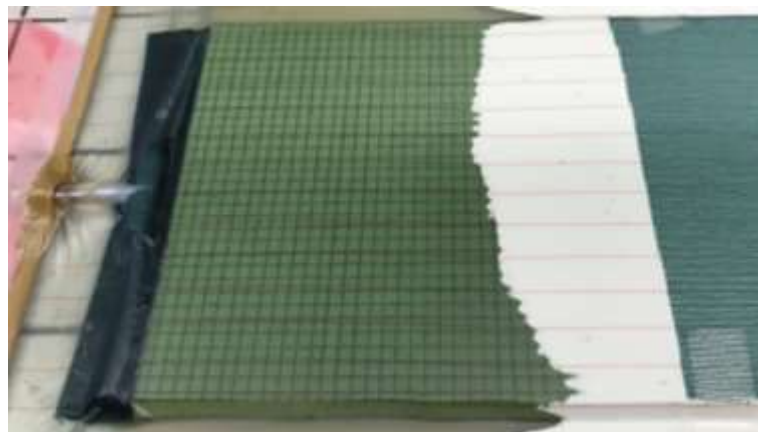
Po obou bocích byla umístěna spirálová hadice, která byla přichycena k formě pomocí těsnicí pásky a její funkcí je odvod přebytečné pryskyřice z formy. Spirálová hadice byla konektorem ve tvaru „T“ spojena s hadicí pro přívod matrice.

Vzniklá konstrukce byla následně zakryta vakuovou fólií, která byla pomocí těsnicí pásky připevněna k formě (Obr. 46). Její rozměr byl větší než přichystané vrstvy pro vakuovou infuzi proto, aby zůstala nenapnutá a při tom zakryla všechny vrstvy.



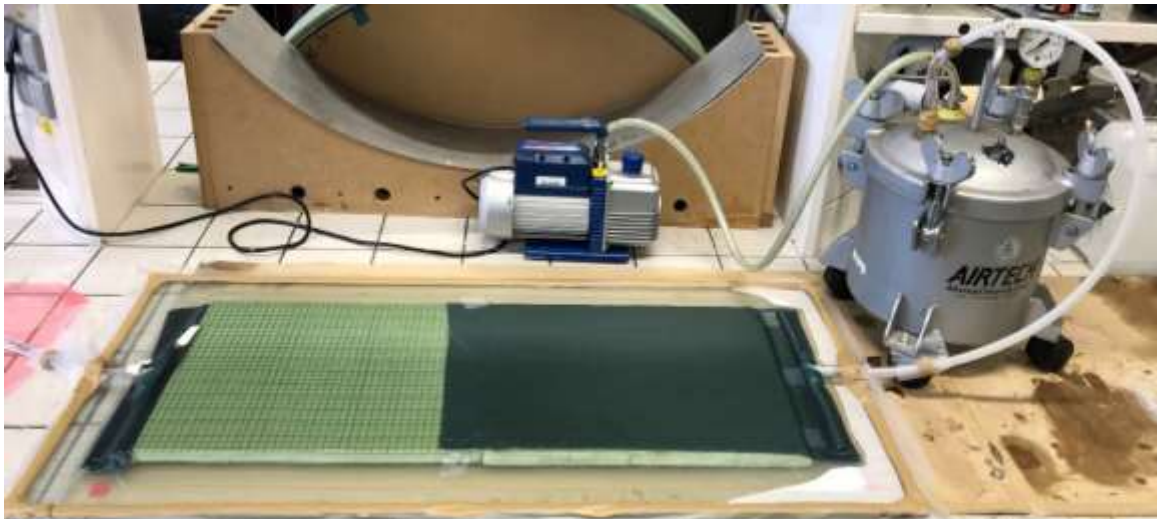
Obr. 46 Sendvičová konstrukce přichystaná na vakuovou infuzi

Po důkladném utěsnění se pomocí vakuové vývěvy vytvořil podtlak a naskládané vrstvy byly působením vakuové fólie stlačeny. Hadice pro přívod matrice byla sepnuta kleštěmi. Následně se hadice vložila do nádoby s matricí, kde došlo k odepnutí kleští. Díky působení podtlaku začal proces infuze a matrice začala impregnovat suchou výztuž. Průběh vakuové infuze je zachycen na obrázku níže (Obr. 47).



Obr. 47 Prosycování výztuže matricí

Po prosycení výztuže následovalo síťování pryskyřice a vytvoření sendvičové konstrukce za pokojové teploty po dobu 24 hodin (Obr. 48). Výroba byla dokončena odformováním sendvičové konstrukce.



Obr. 48 Výroba vakuovou infuzí

7.3 Připravené sendvičové konstrukce

Celkem bylo vyrobeno devět sendvičových panelů s modifikovaným jádrem a jejich seznam je zpracovaný do tabulky níže (Tab. 4).










7.4 Řezání zkušebních vzorků

Z vyrobených sendvičových konstrukcí byly ořezány okraje, čímž se zarovnal všechny strany. Vzniklé panely byly následně nařezány, dle nářezového plánu, na jednotlivá zkušební tělesa pomocí stolní pily Scheppach HS80 (Obr. 49) se speciálním kotoučem vhodným pro řezání sendvičových materiálů.



Obr. 49 Řezání zkušebních vzorků

Tab. 4 Připravené sendvičové konstrukce s modifikovaným jádrem

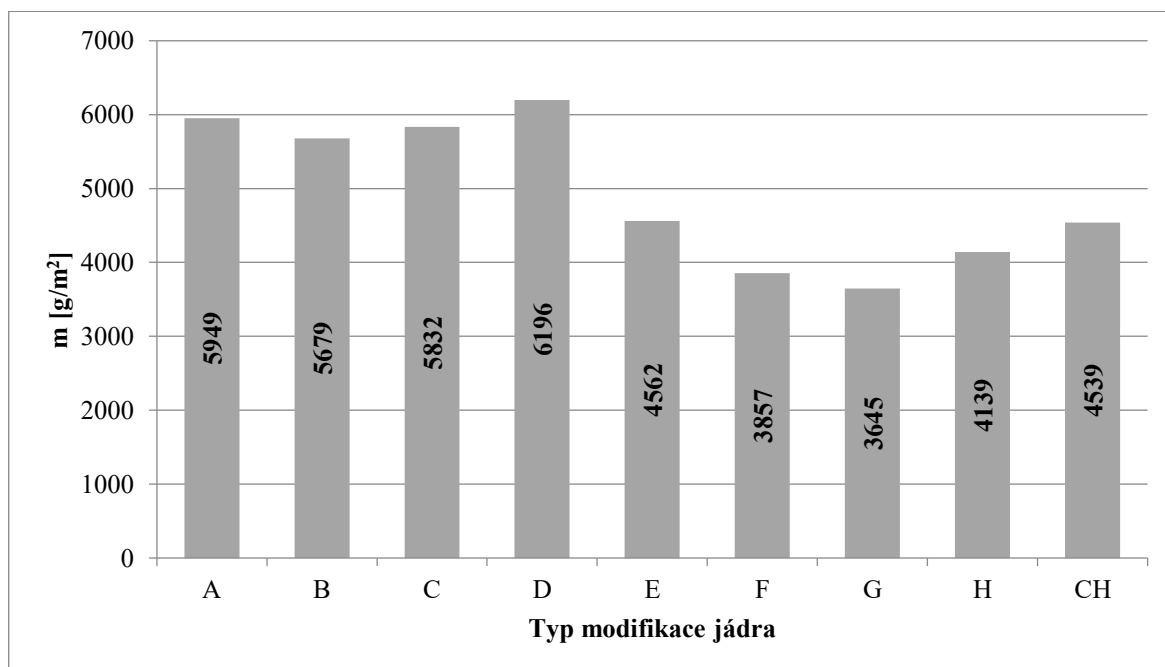
	Náhled	Modifikace jádra	
		Způsob/rozložení	Šířka drážky/ průměr
A		frézování (15×15 mm – čtvercové) + roving	3 mm
B		frézování (15×15 mm – čtvercové)	3 mm
C		frézování (rozteč 9 mm – jednosměrné)	3 mm
D		frézování (rozteč 9 mm – jednosměrné) + roving	3 mm
E		frézování (kulová fréza, rozteč 9 mm – jednosměrné)	3 mm
F		vrtání (25×25 mm – kosočtverečné)	1,5 mm
G		vrtání (15×15 mm – kosočtverečné) + roving	1,5 mm
H		prořezání (10×10 mm – čtvercové)	1 mm
CH		prořezání (20×20 mm – čtvercové)	1 mm

7.5 Hmotnost vyrobených sendvičových panelů

Nařezané zkušební vzorky byly zváženy a pro jejich rychlejší porovnání byly hodnoty převedeny na 1 m^2 . Hodnoty pro každou modifikaci sendvičového panelu jsou uvedeny v Tab. 5. Hmotnosti byly srovnávány s modifikací typu F, která dosáhla hodnoty 3857 g/m^2 . Z tabulky lze vyčíst, že největších hodnot dosáhl sendvičový panel s modifikací jádra typu D (jádro frézované jednosměrně a proplétané skelným rovingem), který měl hmotnost 6196 g/m^2 . Zde došlo ke zvýšení hmotnosti o $60,7 \%$ oproti modifikaci typu F. Naopak nejmenší hmotnost byla naměřena na sendvičovém panelu s modifikací jádra typu G (jádro vrtané a proplétané skelným rovingem) s hmotností 3645 g/m^2 . Tato modifikace měla pokles hmotnosti o $-5,5 \%$ ve srovnání s typem F. Na Obr. 50 jsou graficky znázorněné hmotnosti všech modifikací jádra.

Tab. 5 Hmotnost vyrobených sendvičových panelů

Hmotnost sendvičových panelů m [g/m^2]									
	A	B	C	D	E	F	G	H	CH
\bar{x}	5949	5679	5832	6196	4562	3857	3645	4139	4539
Zvýšení [%]	54,3	47,2	51,2	60,7	18,3	-	-5,5	7,3	17,7



Obr. 50 Grafické znázornění hmotnosti vyrobených sendvičových panelů

7.6 Výrobní vady zkušebních panelů

Během výroby vznikly vady na zkušebních vzorcích, které se mohou projevit ve výsledných vlastnostech testovaných konstrukcí.

7.6.1 Nedokonalé prosycení

U vyrobených sendvičových panelů nedošlo v některých místech k dokonalému prosycení vnějších krycích vrstev (Obr. 51). Tato vada byla nejspíš zapříčiněná špatným utěsněním a odsátím velkého množství pryskyřice během vakuové infuze. Lze očekávat, že tyto nedokonalosti během výroby se mohly odrazit ve výsledných vlastnostech sendvičové konstrukce.



Obr. 51 Nedokonalé prosycení sendvičové konstrukce: a) dokonalé prosycení, b) nedokonalé prosycení

7.6.2 Uzavřený vzduch

V některých případech při spojování modifikovaného jádra a vnějších krycích vrstev došlo k uzavření vzduchu (Obr. 52). To vedlo k nedokonalému vyplnění otvorů matricí, což by mohlo způsobit špatné spojení jádra s vnější krycí vrstvou. Příčinou vzniku této vady mohlo být špatné utěsnění při vakuové infuzi nebo malý výkon vývěvy, která nedokázala taženou pryskyřicí vytlačit vzduch uzavřený v drážkách jádra a použité výztuži.



Obr. 52 Uzavřený vzduch v sendvičové konstrukci: a) dokonalý stav, b) nedokonalý stav

8 POUŽITÉ STATISTICKÉ VELIČINY

Pro vyhodnocení hodnot naměřených programem TestExpert II byly použity tyto statistické veličiny:

- **Aritmetický průměr (\bar{x})** získáme po sečtení všech hodnot (x_i) a následně jejich vydělením celkovým počtem hodnot (n) [46].

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

- **Výběrový rozptyl (s^2)** se počítá jako součet všech kvadratických odchylek od aritmetického průměru, který je dělen rozsahem souboru [46].

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

- **Výběrová směrodatná odchylka (s)** je druhou odmocninou rozptylu [46].

$$s = \sqrt{s^2} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (3)$$

- **Minimum a Maximum (MIN a MAX)** jsou minimální a maximální hodnoty ze souboru [46].
- **Medián (MED)** je prostřední hodnotou ze souboru hodnot v rozpětí seřazených podle velikosti [46].
- **Variační koeficient (V_x)** je roven podílu směrodatné odchylky s aritmetickým průměrem a následně vynásoben stem [46].

$$V_x = \frac{s}{\bar{x}} \cdot 100 \% \quad (4)$$

Za účelem výběru „nejlepšího“ vzorku, který by zohledňoval několik vlastností včetně měrné hmotnosti kompozitu, byla definována tato kritéria:

- **Vážený průměr (K)** získáme jako skalární součin vektoru zohledňovaných normalizovaných vlastností (veličin), p_{norm} a jejich vah, w .

$$K = p_{norm} \cdot w \quad (5)$$

V našem případě byly použity dvě vlastnosti, a sice mez pevnosti v tlaku σ_t a únosnost v ohybu F_o , se stejnými vahami:

$$K = (\sigma_{t,norm}; F_{o,norm}) \cdot (0,5; 0,5) = \sigma_{t,norm} 0,5 + F_{o,norm} 0,5 \quad (6)$$

- **Vážený průměr vztažený na relativní měrnou hmotnost (K_{norm})** pak zohledňuje hmotnost struktury, kdy nejvyšší hodnota K_{norm} udává nejvhodnější typ modifikace s ohledem na pro použití v praxi.

$$K_{norm} = \frac{K\bar{m}}{m} \quad (7)$$

Pozn: Normalizace srovnávaných vlastností p (mez pevnosti v tlaku σ_t , únosnost v ohybu F_0) byla provedena na průměrnou hodnotu modifikace A-CH.

$$p_{norm} = \frac{p-\bar{p}}{\bar{p}} \quad (8)$$

$$\bar{p} = \frac{1}{9} \sum_{i=A-CH} p_i \quad (9)$$

$$\bar{m} = \frac{1}{9} \sum_{i=A-CH} m_i \quad (10)$$

9 MECHANICKÉ TESTOVÁNÍ SENDVIČOVÝCH KONSTRUKCÍ

Měření mechanických vlastností bylo prováděno za pokojové teploty na zkušebním stroji ZWICK 1456 (Obr. 53). Pomocí tohoto univerzálního stroje byla provedena zkouška tříbodovým ohybem a zkouška tlaková za působení bočního tlaku. Současně byly měřeny data pomocí softwarového programu TestExpert II.

Parametry zkušebního stroje ZWICK 1456:

- maximální posuv příčnicku: 800 mm/min,
- snímače síly: 2,5 – 25 kN,
- rozsah teplotní komory: -80 až +250 °C,
- software TestExpert II: tah, ohyb, tlak.



Obr. 53 Zkušební stroj ZWICK 1456

9.1 Vyhodnocení tříbodové zkoušky ohybem

Tato zkouška byla provedena na zkušebním stroji ZWICK 1456, dle normy ASTM C393/C393M-11. Zkušební vzorek byl umístěn na dvě podpěry, které byly od sebe vzdáleny 150 mm, a zatěžující síla působila na střed vzorku (Obr. 54). Velikost zkušebního tělesa byla 210×45 mm a rychlost posuvu byla zvolena 5 mm/min.

Celkem bylo testováno 9 druhů sendvičových konstrukcí pro každou modifikaci jádra, kde u každého typu bylo měřeno 9 vzorků ($n = 9$). Naměřené hodnoty byly zpracovány programem TestExpert II.

Naměřené hodnoty byly vyhodnoceny a vypočítány materiálové charakteristiky, kterými jsou:

- Modul pružnosti v ohybu E [MPa] určuje, v jaké míře dochází k deformaci materiálu. Čím vyšší je hodnota modulu pružnosti, tím méně se materiál deformuje, tzn., že materiál je tužší.
- Únosnost v ohybu F [N] udává maximální sílu, vůči které je těleso odolné. Po překročení této hodnoty dochází k porušení vzorku.



Obr. 54 Tříbodová zkouška ohybem

9.1.1 Efektivní modul pružnosti v tříbodovém ohybu

Statistické vyhodnocení efektivního modulu pružnosti v tříbodovém ohybu lze vidět v Tab. 6. Výchozím typem modifikace, se kterým jsou ostatní typy porovnávány,

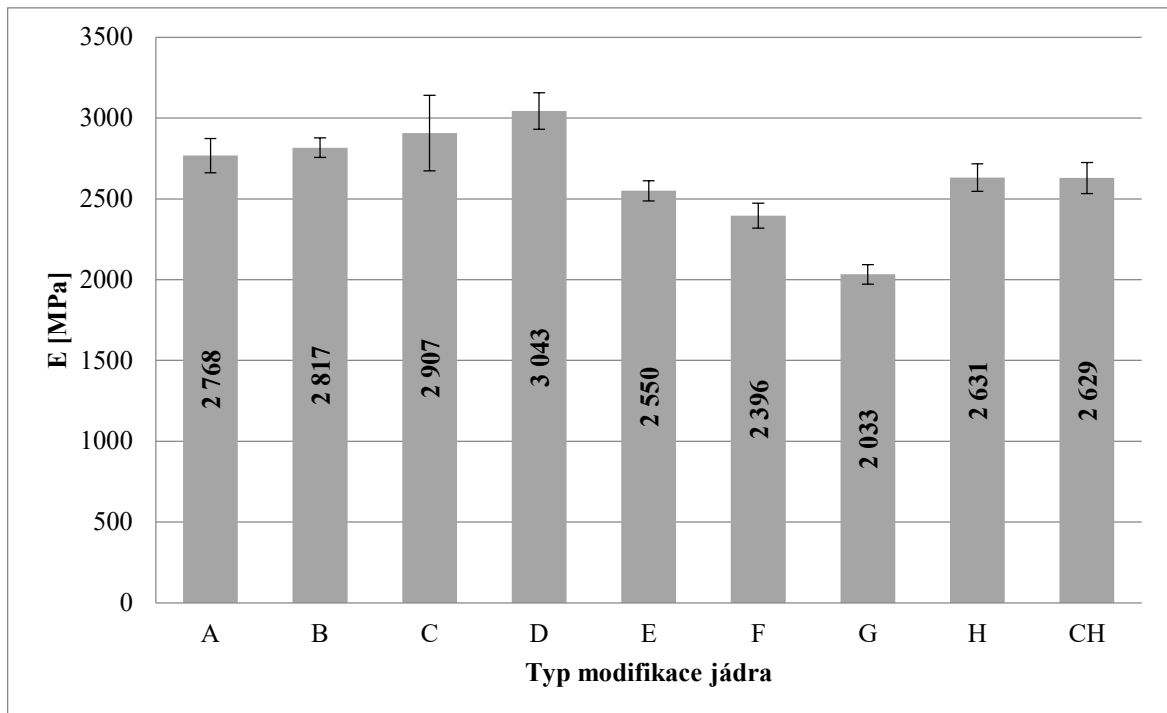
je modifikace typu F (vrtání). Tato modifikace dosáhla hodnot 2396 MPa. Z vyhodnocených dat je patrné, že nejnižších hodnot modulu bylo naměřeno pro typ modifikace G (jádro vrtané a proplétané skelným rovingem), který dosáhl hodnoty 2033 MPa, tudíž došlo ke zhoršení o 15,1 % oproti typu F. Nejvyšší hodnoty byly naopak naměřeny u typu D (jádro frézované jednosměrně a proplétané skelným rovingem). Zde došlo ke zlepšení efektivního modulu pružnosti o 27 %, dosáhlo se tedy hodnoty 3043 MPa.

Největší hodnota variačního koeficientu u modulu pružnosti v ohybu vyšla u modifikace typu C (frézování jednosměrné), což znamená, že právě u této modifikace došlo k největší variaci v souboru hodnot. Lze ale říci, že i přesto jsou hodnoty variačního koeficientu u všech modifikací nízké (pod cca 15 %), a tudíž můžeme důvěřovat hodnotám aritmetického průměru u každého typu.

Ve sloupcovém grafu (Obr. 55) jsou zobrazeny všechny typy testovaných modifikací pěnového jádra a jejich průměrné moduly pružnosti v ohybu.

Tab. 6 Efektivní modul pružnosti sendvičových konstrukcí v třibodovém ohybu

<i>Modul pružnosti v ohybu E [MPa]</i>									
	A	B	C	D	E	F	G	H	CH
\bar{x}	2768	2817	2907	3043	2550	2396	2033	2631	2629
<i>s</i>	106	60	234	113	63	77	60	85	96
<i>MAX</i>	3000	2900	3160	3220	2640	2550	2100	2740	2770
<i>MIN</i>	2630	2730	2460	2880	2430	2270	1940	2490	2480
<i>MED</i>	2780	2830	3030	3040	2550	2400	2040	2640	2620
V_x [%]	3,8	2,1	8,1	3,7	2,5	3,2	3,0	3,2	3,6
<i>Zlepšení</i> [%]	15,5	17,6	21,3	27,0	6,4	-	-15,1	9,8	9,7



Obr. 55 Grafické znázornění efektivního modulu pružnosti sendvičových konstrukcí v tříbodovém ohybu

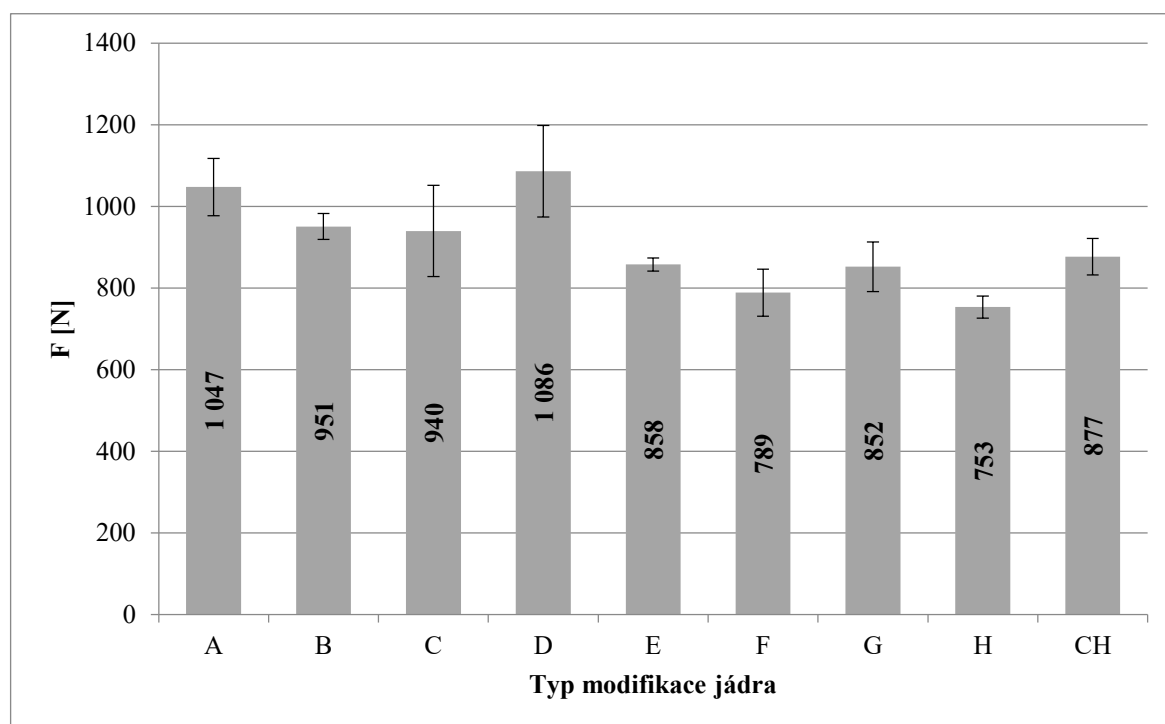
9.1.2 Únosnost v ohybu u tříbodové zkoušky

Výsledky únosnosti v tříbodovém ohybu u všech typů modifikací jádra jsou uvedeny v Tab. 7. Stejně jako v předchozích výpočtech jsou hodnoty porovnávány s modifikací typu F (vrtání), která dosáhla hodnoty 789 N. Nejnižší únosnost má typ modifikace H (prořezání 10×10 mm) s únosností 753 N; tudíž tento typ podlehl deformaci při nižší síle, a to o 4,5 %, oproti modifikaci typu F. Naopak největší navýšení únosnosti dosáhl typ modifikace D (jádro frézované jednosměrně a proplétané skelným rovingem), kde bylo naměřeno 1086 N, což znamená zlepšení únosnosti o 37,7 %.

Největší odchylky v měřených vzorcích byly zaznamenány u modifikací typu C a D, kde došlo k navýšení variačního koeficientu, nejmenší rozptyl vykazovala modifikace typu E s variačním koeficientem 1,9 %. Únosnosti jednotlivých testovaných typů modifikací jsou graficky znázorněny na Obr. 56, kde je zároveň zobrazena i směrodatná odchylka v podobě chybových úseček ($\pm s$).

Tab. 7 Únosnost sendvičových konstrukcí v třibodovém ohybu

Únosnost v ohybu F [N]									
	A	B	C	D	E	F	G	H	CH
\bar{x}	1047	951	940	1086	858	789	852	753	877
s	70	31	112	112	16	58	61	27	45
MAX	1170	1010	1040	1240	887	876	969	790	949
MIN	942	911	713	944	832	690	746	703	808
MED	1050	952	999	1110	856	798	846	749	877
V_x [%]	6,7	3,3	11,9	10,3	1,9	7,3	7,1	3,6	5,1
Zlepšení [%]	32,8	20,6	19,2	37,7	8,8	-	8,1	-4,5	11,2



Obr. 56 Grafické znázornění únosnosti sendvičových konstrukcí v třibodovém ohybu

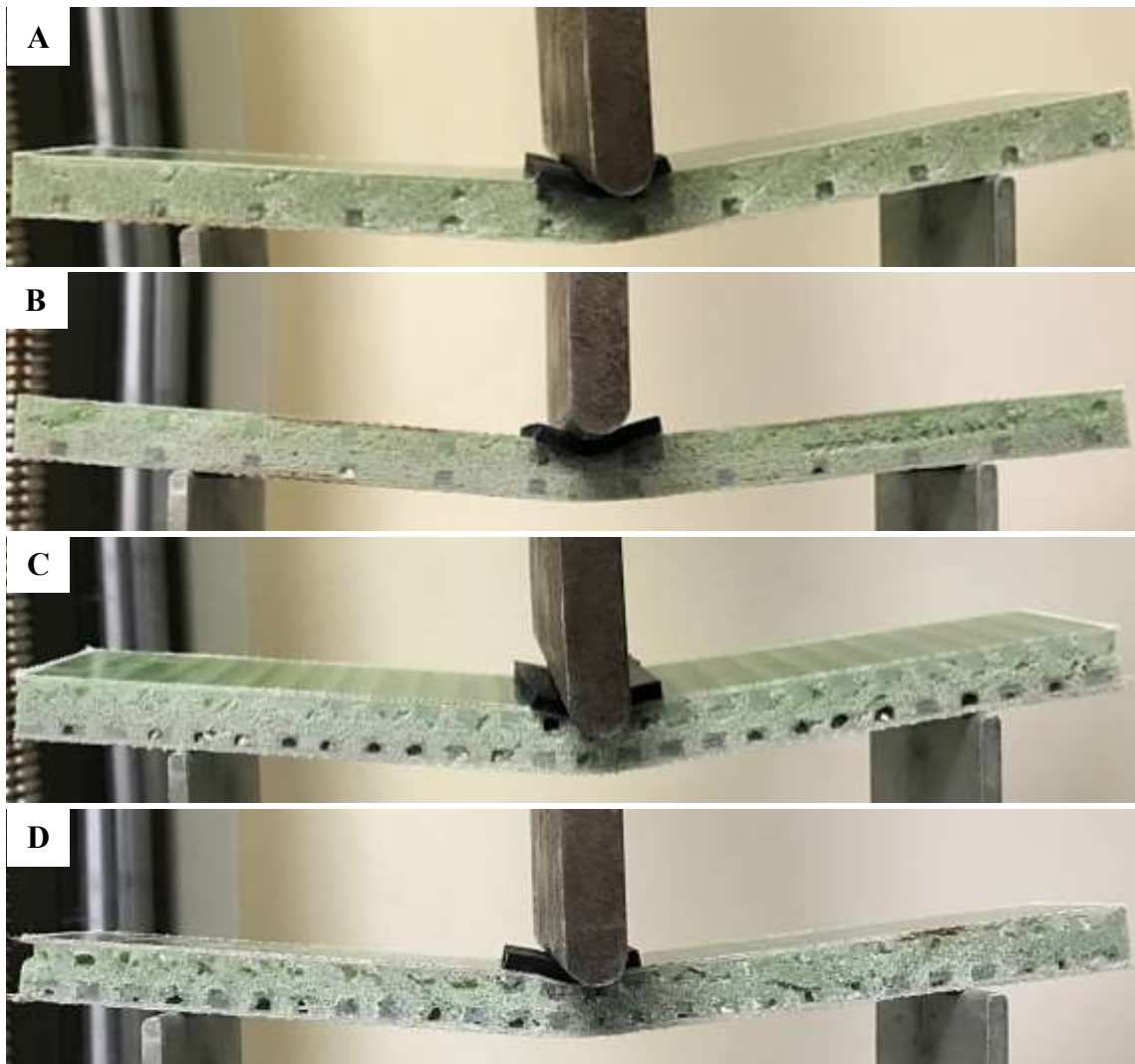
9.1.3 Poruchy sendvičových konstrukcí u třibodového ohybu

Během mechanické zkoušky třibodovým ohybem došlo ke specifickým poruchám sendvičových konstrukcí. Vyskytly se zde dva typy poruch (lokální porušení a smykové porušení jádra).

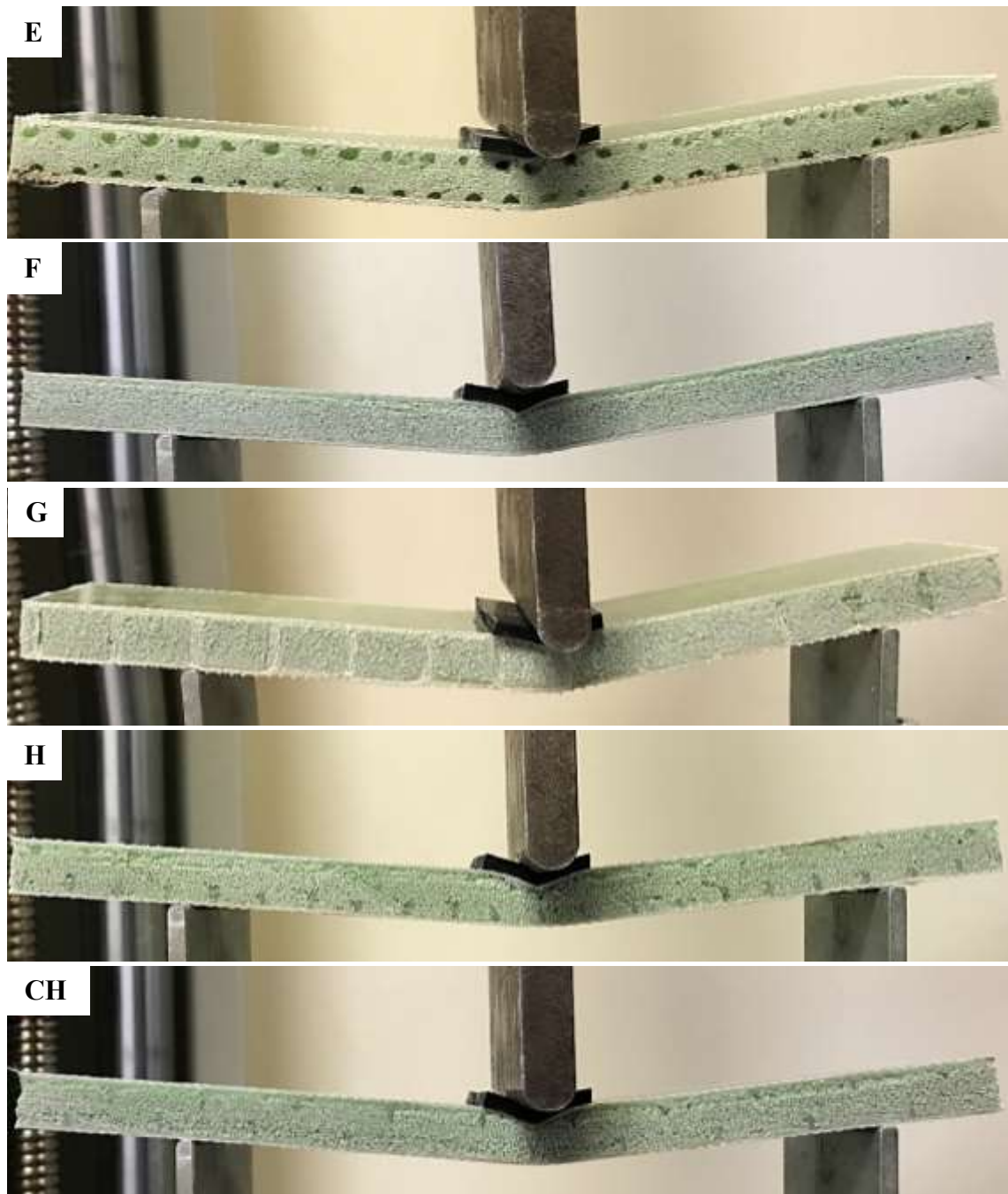
Nejčastější poruchou bylo lokální porušení, kde došlo ke stlačení jádra v místě působení zatěžující síly. V tomto bodě dochází k přetrhnutí vláken a ke kritickému poklesu pevnosti.

U lokálního porušení nedochází k oddělení vnějších krycích vrstev od pěnového jádra. Tato porucha se vyskytla u modifikací typů: A, B, E, F, G, H, CH (Obr. 57, 58).

Další poruchou, která se vyskytla u třibodové zkoušky ohybem, bylo smykové porušení jádra, kdy došlo také k delaminaci mezi vnější krycí vrstvou a pěnovým jádrem. Smykové porušení se vyskytlo u modifikací typů C, D (Obr. 57, 58).



Obr. 57 Poruchy sendvičových konstrukcí v třibodovém ohybu



Obr. 58 Poruchy sendvičových konstrukcí v třibodovém ohybu

9.2 Vyhodnocení tlakové zkoušky za působení bočního tlaku

Tlaková zkouška za působení bočního tlaku byla provedena na zkušebním stroji ZWICK 1456, dle normy ASTM C464/C464M. Testovací vzorky měly rozměr 80×40 mm (Obr. 59).

Celkem bylo testováno 9 typů modifikací pěnového jádra, od každého typu 9 vzorků ($n = 9$), hodnoty byly měřeny pomocí programu TestExper II a následně statisticky vyhodnoceny.

Po vyhodnocení zatěžující síly F [N] se vyjádřila:

- Mez pevnosti σ [MPa], která udává stav, kdy dochází k trvalému porušení zkušebních vzorků.
- Únosnost v tlaku F [N] udává maximální sílu, vůči které je těleso odolné. Po překročení této hodnoty dochází k porušení vzorku.

Výpočet meze pevnosti byl proveden dle normy ASTM C464/C646M, kdy je norma uvedena v kapitole 3.1.



Obr. 59 Tlaková zkouška za působení bočního tlaku

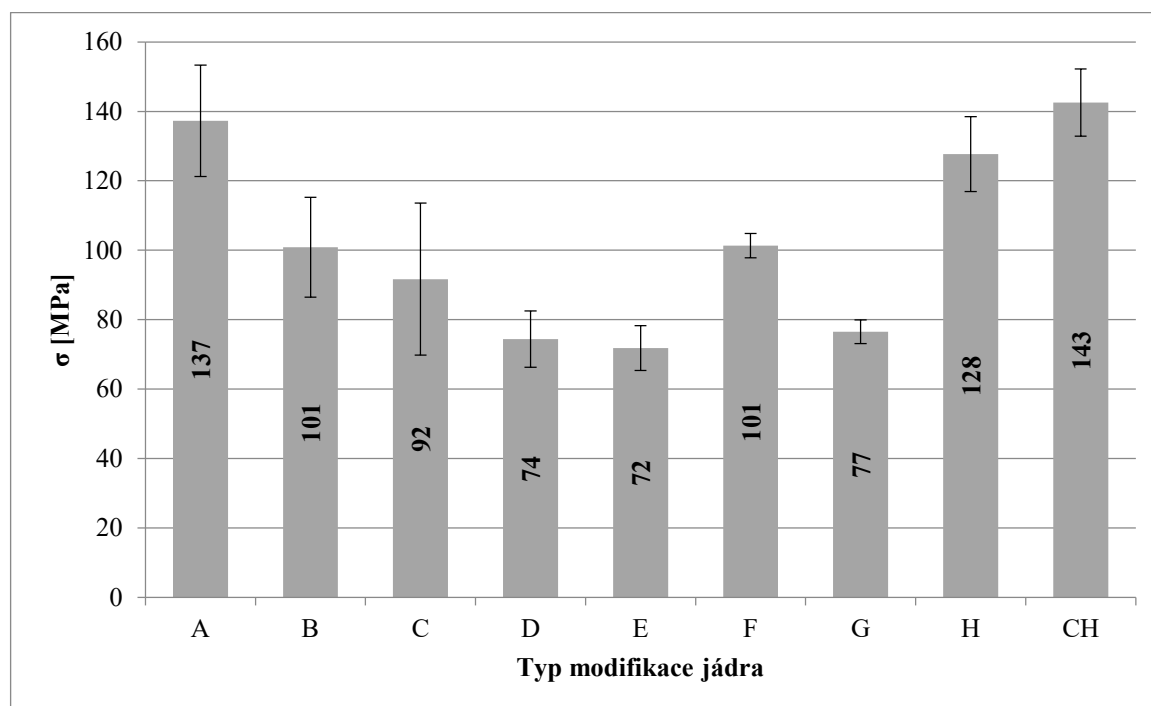
9.2.1 Mez pevnosti v tlaku

Naměřené data byly statisticky vyhodnoceny a jsou uvedeny v Tab. 8. Hodnoty meze pevnosti při působení bočního tlaku na sendvičové konstrukce byly porovnávány vůči modifikaci jádra typu F (vrtání), která dosáhla meze pevnosti 101 MPa. Z dat je patrné, že ve třech případech došlo ke zlepšení meze pevnosti. Největší zlepšení bylo dosaženo u modifikace jádra typu CH (prořezávané 20×20 mm), která dosáhla hodnot 143 MPa, zlepšení tak bylo o 40,6 % oproti typu F. U ostatních modifikací došlo k poklesu meze pevnosti. Největší pokles byl naměřen u modifikace jádra typu E (frézování kulovou frézou), zde byla naměřena mez pevnosti 72 MPa, tím došlo ke zhoršení o 29,1 %.

Ve vyhodnocených datech je vypočítán i variační koeficient, který má nejnižší hodnotu u modifikace typu F a to pouze 3,5 %. Nejvyšší hodnoty dosáhl u modifikace typu C, což vypovídá o tom, že datový soubor byl různorodý, a proto by bylo vhodné naměřit vyšší počet vzorků (rozšířit výběrový soubor). Rozdíly v naměřených hodnotách meze pevnosti jsou zaznamenány i v grafu (Obr. 60).

Tab. 8 Mez pevnosti sendvičových konstrukcí v tlaku

<i>Mez pevnosti v tlaku σ [MPa]</i>									
	A	B	C	D	E	F	G	H	CH
\bar{x}	137	101	92	74	72	101	77	128	143
s	16	14	22	8	6	3	3	11	10
MAX	163	119	150	92	81	108	80	144	156
MIN	112	78	73	65	59	95	70	115	122
MED	144	99	86	72	73	102	77	125	144
V_x [%]	11,7	12,3	23,9	10,9	8,9	3,5	4,5	8,5	6,8
Zlepšení [%]	35,4	-0,5	-9,6	-26,6	-29,1	-	-24,5	26,0	40,6



Obr. 60 Grafické znázornění meze pevnosti sendvičových konstrukcí v tlaku

9.2.2 Únosnost v tlaku

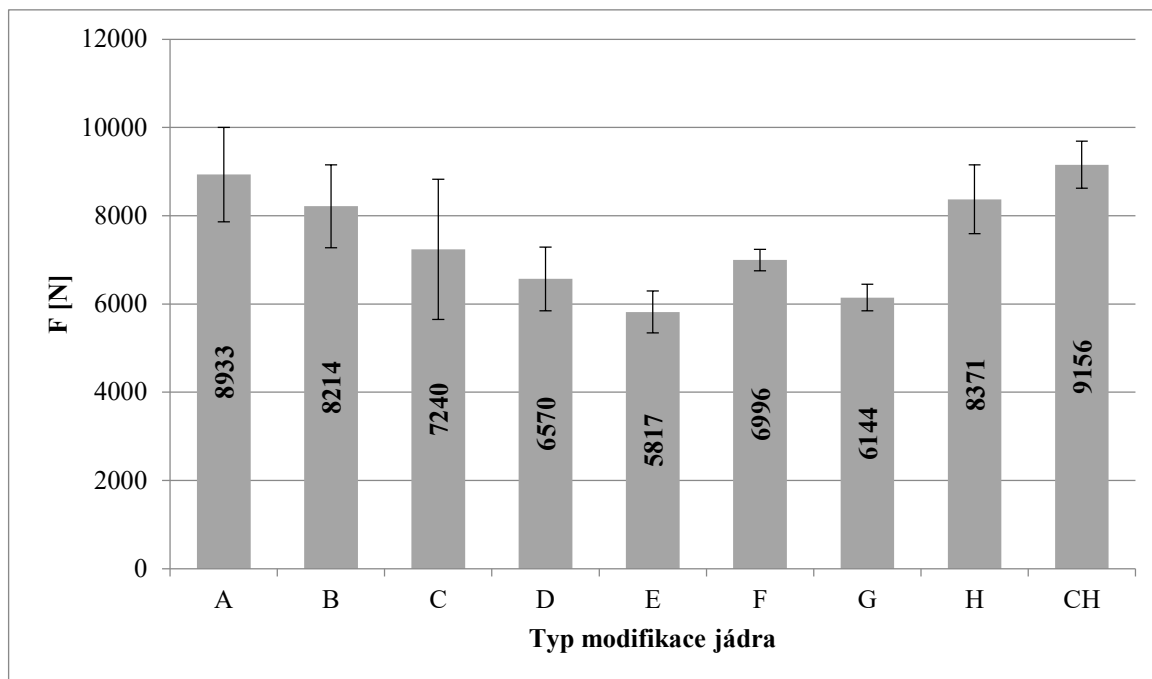
Dle naměřených hodnot (Tab. 9) je patrné, že nejmenší únosnost v tlaku mají vzorky s modifikovaným jádrem typu E (frézování kulovou frézou s roztečí 9 mm jednosměrně),

kteří má únosnost v tlaku 5817 N. U tohoto typu došlo ke zhoršení únosnosti o 16,8 % oproti typu F (vrtání), kde bylo dosaženo hodnoty 6996 N. Největší zlepšení únosnosti bylo u modifikace jádra typu CH (prořezání 20×20 mm), která dosáhla hodnoty 9156 N. K navýšení únosnosti v tlaku došlo oproti typu F o 30,9 %.

K jednotlivým modifikacím byl vypočítán i variační koeficient, který ukazuje, že nejmenší rozptyl hodnot byl u typu F, kde variační koeficient vychází 3,5 %. Největší rozdíly v naměřených hodnotách byly u modifikace typu C, kde variační koeficient dosáhl hodnoty 21,9 % (opět by bylo vhodné navýšit výběrový soubor). Hodnoty aritmetických průměrů z naměřených hodnot únosnosti jsou uvedeny na Obr. 61 a to včetně chybových úseček odpovídajících hodnotám \pm směrodatná odchylka.

Tab. 9 Únosnost sendvičových konstrukcí v tlaku

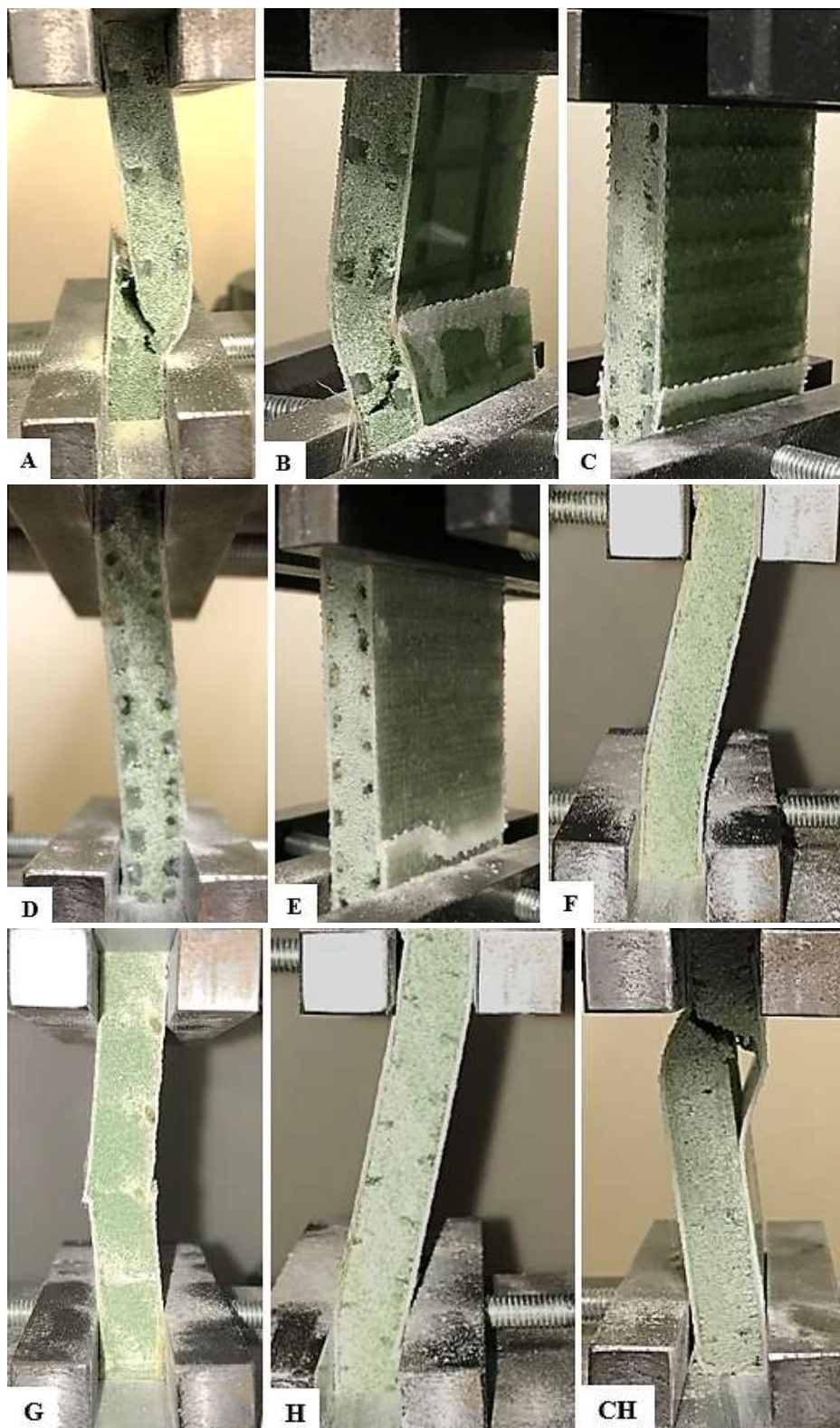
<i>Únosnost v tlaku F [N]</i>									
	A	B	C	D	E	F	G	H	CH
\bar{x}	8933	8214	7240	6570	5817	6996	6144	8371	9156
<i>s</i>	1071	942	1587	722	476	245	300	779	534
<i>MAX</i>	10800	9420	11400	8150	6720	7480	6550	9580	9890
<i>MIN</i>	7170	6410	5920	5740	5050	6590	5660	7450	7940
<i>MED</i>	8650	8180	6880	6470	5890	6960	6260	8130	9310
<i>V_x [%]</i>	12,0	11,5	21,9	11,0	8,2	3,5	4,9	9,3	5,8
<i>Zlepšení [%]</i>	27,7	17,4	3,5	-6,1	-16,8	-	-12,2	19,7	30,9



Obr. 61 Grafické znázornění únosnosti sendvičových konstrukcí v tlaku

9.2.3 Poruchy sendvičových konstrukcí u tlakové zkoušky

Poruchy, které vznikly u tlakové zkoušky za působení bočního tlaku, jsou zobrazeny na Obr. 62. U sendvičových konstrukcí s modifikací jádra typů A, B, G, CH došlo k viditelnému zvlnění vnější krycí vrstvy a roztržení pěnového jádra. Další poruchou, která se u zkušebních vzorků vyskytla, bylo zvlnění a prasknutí vnějších krycích vrstev. To se vyskytlo u modifikací jádra typů C, E. Posledním typem poruchy bylo zvlnění sendvičové konstrukce, což se vyskytlo u modifikací jádra typů D, F, H.



Obr. 62 Poruchy sendvičových konstrukcí v tlakové zkoušce

9.3 Vyhodnocení modifikací jádra

Vybrané veličiny, které chceme vyhodnotit, byly znormalizovány na průměrnou hodnotu modifikace A–CH. K výpočtu byly použity výsledné hodnoty z předcházejících statistických vyhodnocení. Jednalo se o hmotnost, únosnost v ohybu a pevnost při působení bočního tlaku. Z těchto vybraných hodnot byl vypočítán vážený průměr, který byl v závěru vztažen na normalizovanou měrnou hmotnost. Nejvhodnější modifikací je ta, která dosáhne maximálních hodnot.

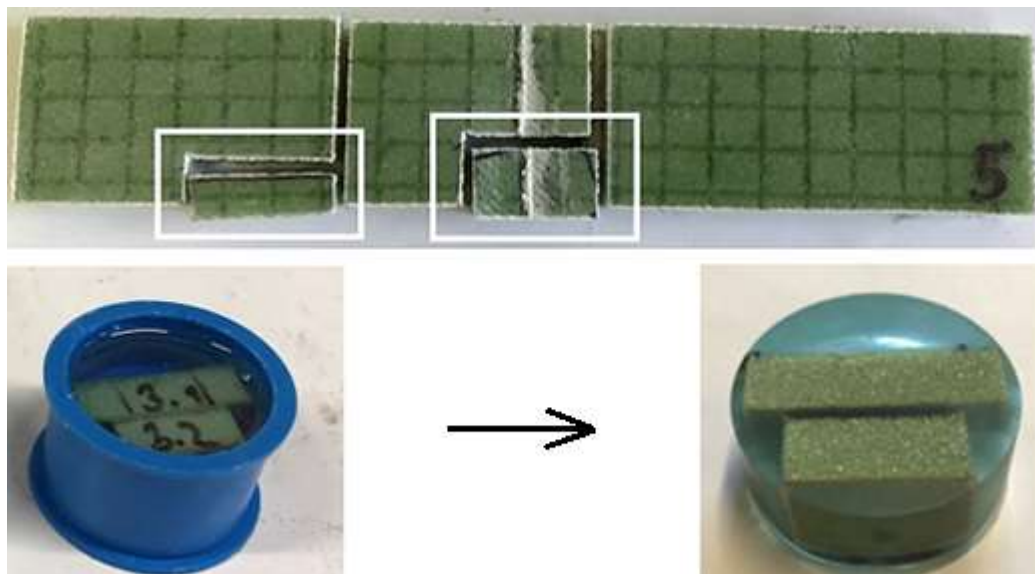
Vypočítané hodnoty jsou udány v Tab. 10. S ohledem na vybrané vlastnosti (hmotnost, únosnost v ohybu a pevnost při působení bočního tlaku) bylo zjištěno, že nejlepšími hodnotami dosahuje modifikace typu A (jádro frézované 15×15 mm, proplétané skelným rovingem).

Tab. 10 Kritérium pro výběr nejlepší modifikace jádra

<i>Kritérium nejlepší modifikace jádra</i>									
	A	B	C	D	E	F	G	H	CH
<i>Normalizovaná únosnost v ohybu, $F_o norm$</i>	0,16	0,05	0,04	0,20	-0,05	-0,13	-0,06	-0,17	-0,03
<i>Normalizovaná mez pevnosti v tlaku, $\sigma_t norm$</i>	0,33	-0,02	-0,10	-0,28	-0,30	-0,02	-0,25	0,25	0,39
<i>Normalizovaná hmotnost, m_{norm}</i>	1,21	1,15	1,18	1,26	0,92	0,78	0,74	0,84	0,92
<i>Kritérium, K_{norm}</i>	0,203	0,014	-0,028	-0,032	-0,190	-0,094	-0,210	0,046	0,195

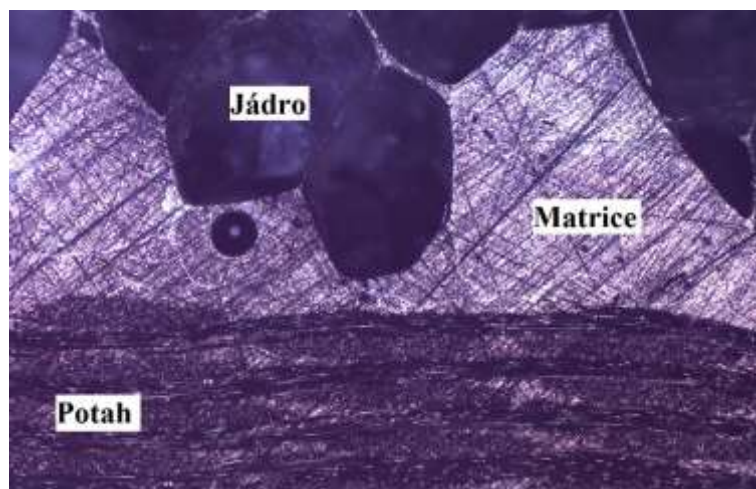
9.4 Mikroskopie zkušebních vzorků

Po mechanických zkouškách byla struktura zkušebních vzorků zkoumána pod mikroskopem. Za tímto účelem se ve vzorcích vyřezala zajímavá místa a ty se vložily do forem (Obr. 63), které byly naseparovány voskem Oskar's. Poté se zalily pryskyřicí smíchanou s tvrdidlem (285 MGS) v poměru 100:40. Po řádném vytvrzení při pokojové teplotě byly vzorky odformovány a vybroušeny. Následně se jednotlivé vzorky zkoumaly pod mikroskopem.

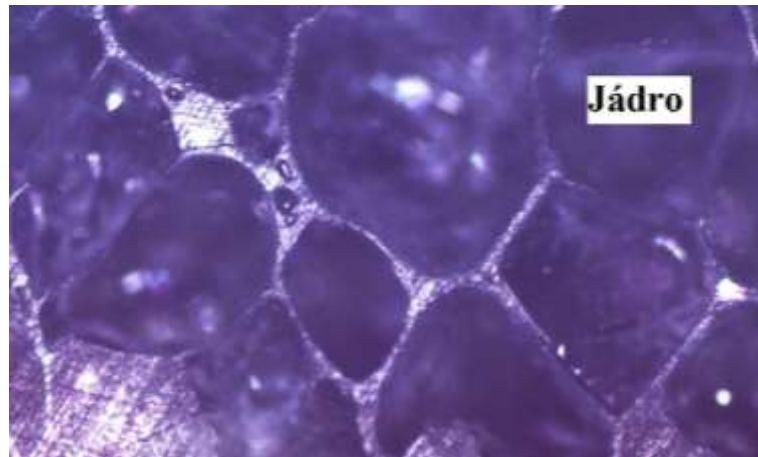


Obr. 63 Vyřezané vzorky vložené do formy

Místa, která byla zkoumána pod mikroskopem, se nafotila. Na snímcích lze vidět členění vzorků na jádro, matici a potah (Obr. 64). Pěnové jádro lze detailněji vidět na Obr. 65, kde je zobrazena struktura pěnového jádra.

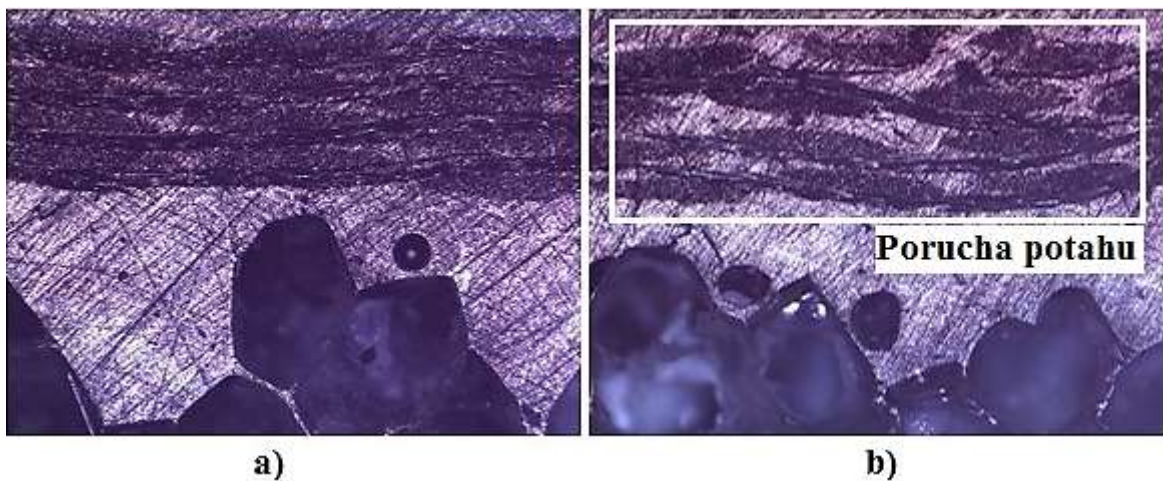


Obr. 64 Členění sendvičové konstrukce



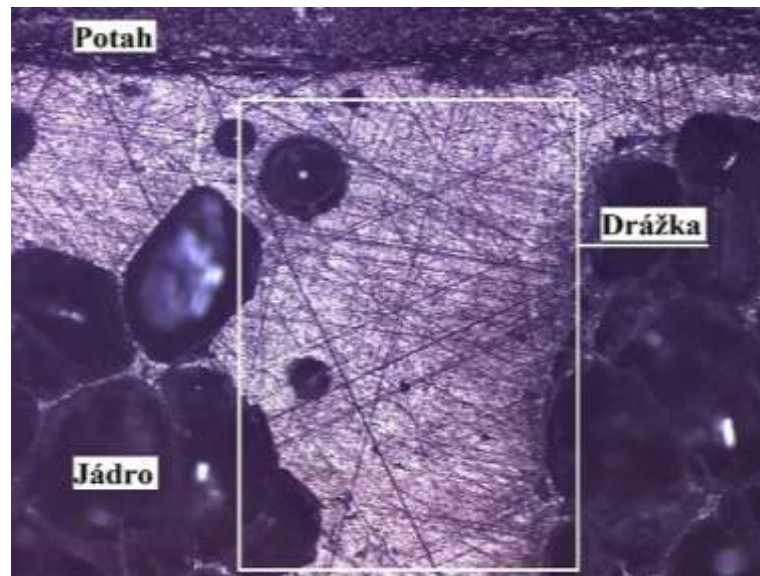
Obr. 65 Struktura pěnového jádra

Snímky (Obr. 66 a, b) zachycují dva typy vzorků. První snímek (Obr. 66 a) zachycuje zkušební vzorek, který má neporušenou vnější krycí vrstvu. Druhý snímek (Obr. 66 b) a zobrazuje poruchy na vnější krycí vrstvě (potahu), ke kterým došlo během mechanických zkoušek.



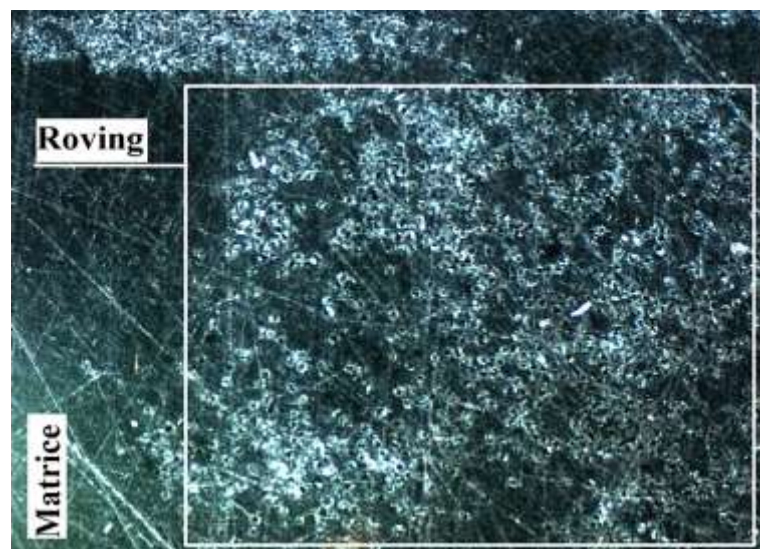
Obr. 66 Vnější krycí vrstva: a) neporušený potah, b) porucha potahu

Na Obr. 67 je modifikaci jádra typu H (prořezané 10×10 mm). Lze vidět vzniklou drážku, prořezanou zalamovacím nožem v pěnovém jádře, která je při infuzi zaplněna matricí.



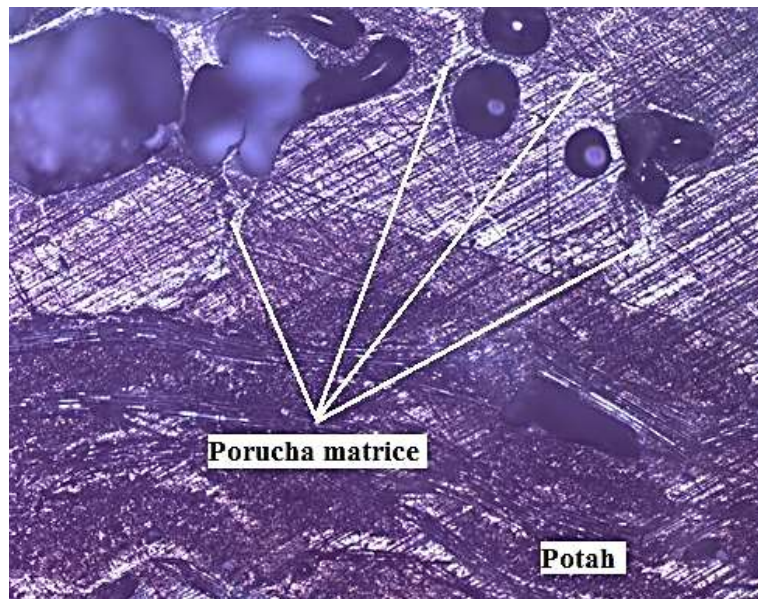
Obr. 67 Prořezaná drážka v pěnovém jádru

Zkušební vzorek s modifikací jádra typu A (frézované jádro vyztužené skleným rovingem), je zaznamenán na Obr. 68. Lze vidět spojení rovingu s matricí.



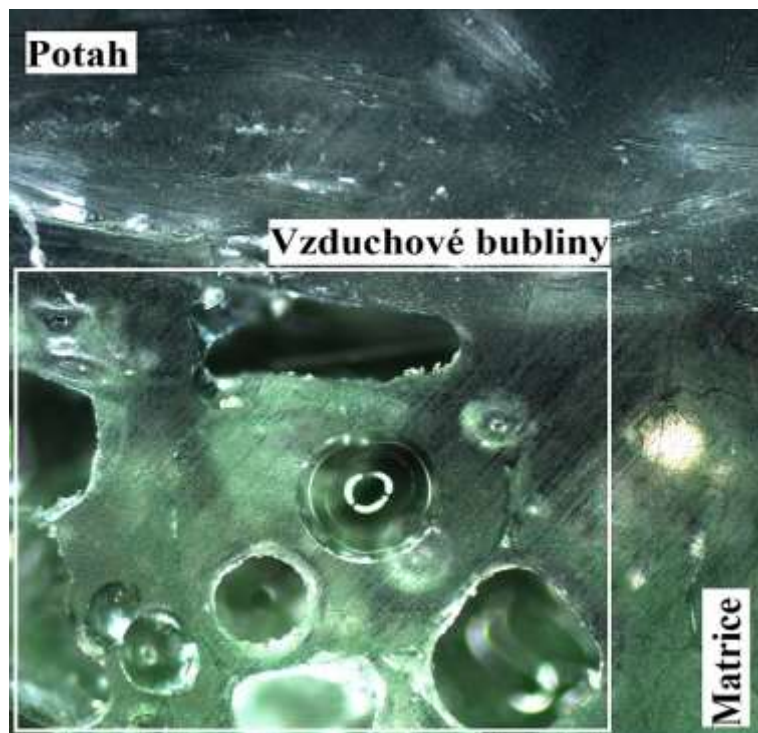
Obr. 68 Vyztužené jádro skelným rovingem

U následujícího snímku (Obr. 69) lze vidět vzniklá porucha matrice, která vznikla v bodě zlomu při mechanické zkoušce, a tím došlo k popraskání matrice. Tato deformace vznikla u zkušební vzorku s modifikací jádra typu F (vrtané jádro).



Obr. 69 Popraskaná matrice v sendvičovém panelu

Další vadou, která byla zkoumána pod mikroskopem, je špatné prosycení a tím výskyt vzduchových bublin ve spoji mezi vnější krycí vrstvou a jádrem. Tato vada byla nejspíš zapříčiněna malým výkonem vývěvy, která nedokázala pomocí pryskyřice vytlačit uzavřený vzduch z materiálu (Obr. 70).



Obr. 70 Výskyt vzduchových bublin

ZÁVĚR

Diplomová práce na téma *Modifikace sendvičových jader s ohledem na únosnost výsledné struktury* se zabývala různými typy modifikací pěnového jádra a jejich vlivem na výsledné vlastnosti sendvičové struktury po mechanickém zatěžování.

Cílem této práce bylo různě modifikovat pěnové jádro, které bylo např. vrtané, prořezávané, či frézované. Některé typy modifikace byly propleteny rovingem skleněných vláken kvůli předpokládanému vyztužení jádra. Poté bylo jádro vloženo mezi vnější krycí vrstvy a pomocí vakuové infuze se vytvořila sendvičová struktura (sendvičový panel). Celkem bylo vytvořeno 9 sendvičových panelů, které byly nařezány na zkušební vzorky dle požadovaných rozměrů. Vzorky byly zváženy a zjistila se tak jejich hmotnost, která byla převedena na 1 m² kvůli rychlejší orientaci. Z naměřených hodnot je zřejmé, že většina modifikací, kdy došlo k frézování jádra, způsobila nárůst hmotnosti, neboť je ve vzorku vyšší množství pryskyřice. Z tohoto důvodu je třeba volit jen ty modifikace, které přináší opravdu dostatečné zvýšení ostatních mechanických vlastností.

Po zvážení zkušebních vzorků byly provedeny mechanické zkoušky na zkušebním zařízení. Došlo k porovnání dat jednotlivých typů sendvičových panelů a také k jejich vizuálnímu posouzení. První mechanickou zkouškou byla tříbodová zkouška ohybem, u které se stanovily hodnoty efektivního modulu pružnosti a únosnost v ohybu. Další mechanickou zkouškou, která byla provedena, byla tlaková zkouška za působení bočního tlaku. Zde se porovnávala mez pevnosti a únosnost jednotlivých sendvičových struktur.

Vyhodnocené data jednotlivých modifikací jádra byly srovnávány s modifikací typu F (vrtání). S tímto typem se data srovnávaly z toho důvodu, že modifikace typu F je v praxi nejčastěji využívána. Předpokládalo se, že sendvičový panel s modifikací jádra typu F bude nejlépe. Toto očekávání se nenaplnilo, vzhledem k tomu, že nejmenší hmotnosti dosáhl sendvičový panel s modifikací jádra typu G (jádro vrtané a proplétané skelným rovingem). Nízké hodnoty hmotnosti nejspíše souvisí se skutečností, kdy při výrobě zřejmě došlo ke špatnému prosycení celého vzorku pryskyřicí, neboť vzorek nebyl dokonale prosycen a bylo odsáto velké množství pryskyřice. To bylo způsobeno chybou ve výrobě.

U tříbodové zkoušky ohybem byl vyhodnocen jako nejlepší sendvičový panel s modifikací jádra typu D (jádro frézované jednosměrně a proplétané skelným rovingem). Tento typ byl díky vyztužení skelným rovingem odolný (dosahoval nejvyšších hodnot modulu pružnosti)

a také dosáhl nejlepších výsledků únosnosti v ohybu. Tyto výsledky znehodnocuje fakt, že modifikace typu D měla nejvyšší hmotnost a tímto faktem by byla v praxi méně využívaná.

Nejmenší modul pružnosti v tříbodové zkoušce ohybem měl typ G (jádro vrtané a proplétané skelným rovingem). Tento typ dosáhl nízkých hodnot v mechanické zkoušce únosnosti v ohybu. Jak již bylo zmíněno, během výroby došlo ke vzniku vad, kdy byl sendvičový panel špatně prosycen.

U mechanické zkoušky únosnosti v ohybu byl typ H (prořezání 10×10 mm) vyhodnocen jako nejméně únosný. Nejspíše to bylo zapříčiněno tím, že u modifikace došlo k velkému narušení pěnového jádra, kvůli hustému prořezání z obou stran.

Další zkouškou, která byla na zkušebních vzorcích provedena, je tlaková zkouška za působení bočního tlaku. Nejvyšší hodnoty meze pevnosti i únosnosti v tlaku byly naměřeny u modifikace typu CH (prořezání 20×20 mm). Zde je již prořezání od sebe dostatečně daleko, tudíž nedochází k nepříznivému poškození soudržnosti samotného jádra. Právě to mohlo zapříčinit jeho největší odolnost vůči působení boční tlaku.

Nejmenší hodnoty meze pevnosti i únosnosti při působení bočního tlaku byly zjištěny u modifikací jádra typu E (frézování kulovou frézou s roztečí 9 mm jednosměrně). Mohlo to být zapříčiněno tím, že tlak působil kolmo na vyfrézované drážky a tím došlo k rychlejší deformaci zkušebního vzorku. Výsledky mohou být ovlivněny i faktem, že během výroby došlo k nedokonalému vytlačení vzduchových bublin ze sendvičové konstrukce.

V této práci bylo díky normalizaci vybraných vlastností na měrnou hmotnost zjištěno, že modifikace typu A (jádro frézované 15×15 mm, proplétané skelným rovingem) je nejvhodnější s ohledem na zkoumané vlastnosti. Tento typ byl vyhodnocen jako nejlepší z toho důvodu, že modifikace typu A byla nejvíce zpevněnou ze všech zkušebních vzorků (obsahovala větší množství matrice a navíc byla propletena skelným rovingem). Modifikace typu A dosáhla nejlepší hodnot zvláště u normalizace únosnosti v ohybu a hmotnosti.

Ze statistického vyhodnocení dat je patrné, že mechanické vlastnosti sendvičových konstrukcí jsou ovlivňovány modifikací jádra. Nicméně je důležité, aby výroba pomocí vakuové infuze byla provedena bezchybně a tím nedošlo ke zkreslení výsledných hodnot měření. Pro využití v praxi je důležité brát ohled i na celkovou hmotnost sendvičových panelů.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] ZENKERT, D. *Nordic Industrial Fund, The Handbook of Sandwich Construction*. Worcestershire: EMAS Publishing, 1997, 447 s. ISBN 978-094-7817-961.
- [2] AGARWAL, Bhagwan D. a Lawrence J. BROUTMAN. *Vláknové kompozity*. Praha: SNTL, 1987.
- [3] Sendvičové konstrukce. *Mmspektrum* [online]. 2001, [cit. 2018-10-30]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/sendvicove-konstrukce.html>.
- [4] Figure 1. Basic schematic view of sandwich structures. *Science and Education Publishing* [online]. 2017, [vit. 2018-10-30]. Dostupné z: <http://pubs.sciepub.com/ajme/5/6/2/figure/1>.
- [5] WANBERG, J. *Composite Materials Fabrication Handbook 2*. Stillwater: Wolfgang Publications Inc., 2010, 144 s. ISBN 978-1-929133-93-2.
- [6] EHRENSTEIN, Gottfried W. *Polymerní kompozitní materiály*. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009, 351 s. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [7] Všeobecný a základní popis materiálů používaných při výrobě kompozitů. In: *Havel-composites* [online]. 2014 [cit. 2018-10-30]. Dostupné z: <http://www.havel-composites.com/clanky/4-Technologie/74-Vseobecny-a-zakladni-popis-materialu-pouzivanych-pri-vyrobe-kompozitu.html>.
- [8] DAĐOUREK, Karel. *Kompozitní materiály – druhy a jejich užití*. Vyd. 1. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2007, 114 s. ISBN 978-80-7372-279-1.
- [9] AGARWAL, Bhagwan D. a Lawrence J. BROUTMAN. *Analysis and Performance of fiber composites*. John Wiley and Son Inc., 2017, 576 s., ISBN 978-1119389989.
- [10] Kompozitní materiály. *Havel composites* [online]. 2014 [cit. 2018-10-30]. Dostupné z: <http://www.havel-composites.com/clanky/4-Technologie/74-Vseobecny-a-zakladni-popis-materialu-pouzivanych-pri-vyrobe-kompozitu.html>.
- [11] Fibre Glast. *What Are Prepregs?* [online]. [cit. 2018-11-13]. Dostupné z: http://www.fibreglast.com/product/about-prepregs/Learning_Center.
- [12] Enhanced mechanical performance of foam core sandwich composites with through the thickness reinforced core [online]. 2015 [cit. 2016-02-03]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/journal/13598368>.

- [13] Vlákna, *KOMPOZITY -Ing. Zdeněk Kořínek, CSc.* [online]. [cit. 2018-11-13]. Dostupné z: <http://kompozity.webnode.cz/>.
- [14] Překližky. *Ráj dřeva* [online]. 2010 [cit. 2018-11-13]. Dostupné z: <http://www.raj-dreva.cz/produkty/preklizky/>.
- [15] DAVIES, J. M. *Lightweight Sandwich Construction*, 1st ed. Oxford: Black-well Science Ltd., 2001, 370 s. ISBN: 978-0-632-04027-8.
- [16] Homogeneous and structured core materials. *Researchgate* [online]. 2011 [cit. 2018-11-20]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/Homogeneous-and-structured-core-materials_fig1_242121949.
- [17] Airex C70.75. *Havel-compozites* [online]. 2014 [cit. 2018-11-20]. Dostupné z: <http://www.havel-composites.com/shop/91-Airex/1106-AIREX-C7075-tlous%C5%A5ka-10-mm-2180-x-1020-mm.html?pls=0>.
- [18] GARRIDO, M., CORREIA, J. R., KELLER, T. Effects of elevated temperature on the shear response of PET and PUR foams used in composite sandwich panels, *Construction and Building Materials*. 2015, Vol. 76, p. 150-157. ISSN 0950-0618.
- [19] NetComposites. *PVC Foam* [online]. [cit. 2018-11-20]. Dostupné z: <http://www.netcomposites.com/guide-tools/guide/core-materials/pvc-foam>.
- [20] Gurit: Gurit Guide to Composites. In: *Directindustry* [online]. [cit. 2018-11-20]. Dostupné z: <http://pdf.directindustry.com/pdf/gurit/gurit-guide-to-composites/37817-728312.html>.
- [21] MIRACLES D. B., DONALDSON S. L. *ASM Handbook: Volume 21 Composites*. USA: ASM International, Materials Park, OH 44073-0002, 2001. ISBN 0-87170-703-9.
- [22] HexWeb HoneyComb, *Hexcel.com*. [online]. 2018 [cit. 2018-11-20]. Dostupné z: <https://www.hexcel.com/Products/Honeycomb/HexWeb-Honeycomb>.
- [23] Getting to the core of composite laminates. *compositesWorld* [online]. 2003 [cit.2018-12-17]. Dostupné z: https://www.compositesworld.com/articles/getting-to-the-core-of-composite-laminates?fbclid=IwAR0dj73MC6edagcfi0HhMDDg_smMepEQBOGay450IPWM5kmpW8W8q8HZ8w.

- [24] Technologie výroby kompozitů. In: *Havel-composites* [online]. 2014 [cit. 2018-11-20]. Dostupné z: <http://www.havel-composites.com/clanky/0-/76-Technologie-jejich-popis-a-schemata.html>.
- [25] MIRACLES D. B., DONALDSON S. L. *ASM Handbook: Volume 21 Composites*. USA: ASM International, Materials Park, OH 44073-0002, 2001. ISBN 0-87170-703-9.
- [26] Honeycomb Sandwich Design Technology, *Hexcel.com*. [online]. 2013 [cit. 2018-10-10]. Dostupné z: <http://hexcel.com/Resources/Technology-Manuals>.
- [27] Hexcel. *Hexcel: Technology manuals* [online]. 2013 [cit. 2018-10-10]. Dostupné z: http://hexcel.com/Resources/DataSheets/Brochure-Data-Sheets/Honeycomb_Sandwich_Design_Technology.pdf.
- [28] Resin transfer moulding. *Composite integration ltd.* [online]. 2019 [cit. 2019-02-10]. Dostupné z: <http://composite-integration.co.uk/resin-transfer-moulding/>.
- [29] RUSNÁKOVÁ, Soňa: Přednášky z předmětu Zpracovatelské inženýrství kompozitů T5ZIK, FT UTB. 2017.
- [30] Avoiding resin trap overflows when infusing. *Vacmobiles.com* [online]. 2012 [2018-10-10]. Dostupné z: https://www.vacmobiles.com/avoiding_resin_trap_overflows.html.
- [31] Mechanické vlastnosti. In: *Oddělení povrchového inženýrství Západočeská univerzita v Plzni* [online]. [cit. 2018-10-10]. Dostupné z: https://www.opi.zcu.cz/mechanicke_vlastnosti.pdf.
- [32] HAMERNÍK, Jan. Vlastnosti kovových materiálů a jejich zkoušení. In: *Jhamernik* [online]. 2006 [cit. 2018-10-10]. Dostupné z: <http://jhamernik.sweb.cz/vlastnosti.html>.
- [33] ASTM C364 / C364M-07(2012), *Standard Test Method for Edgewise Compressive Strength of Sandwich Constructions*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012.
- [34] Mechanical Testing of Sandwich Panels. In: *Hexcel* [online]. [cit. 2018-11-22]. Dostupné z: http://www.hexcel.com/user_area/content_media/raw/SandwichPanels_global.pdf

- [35] BĚHÁLEK, Luboš. *Polymery: Mechanické vlastnosti polymerů – statické namáhání* [online]. Publi, 2015 [cit. 2018-11-22]. ISBN 978-80-88058-68-7. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/09.html>.
- [36] Mechanical characterization of nature biodegradable sandwich materials. *Sage Journals* [online]. 2015 [cit. 2018-12-17]. Dostupné z: <https://journals.sagepub.com/doi/full/10.1177/1099636215622143>.
- [37] SRINIVAS PRASAD and LEIF A. CARLSSON. DEBONDING AND CRACK KINKING IN FOAM CORE SANDWICH BEAMS-I. ANALYSIS OF FRACTURE SPECIMENS. Great Britain 1994, ISBN 0013-7944/94.
- [38] Mechanické vlastnosti polymerů – statické namáhání. *Publi* [online]. 2018 [cit. 2018-12-10]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/09.html>.
- [39] Tensile and compressive performances of foam core sandwich composites with various core modifications. *SAGE Journal* [online]. 2016 [cit. 2018-12-17]. Dostupné z: <https://journals.sagepub.com/doi/full/10.1177/1099636216650819?fbclid=IwAR3HEjoHPj7PG00gdM1h3rArytZselb03A5obUWePY8BihQvJGIC57KhIfo&>.
- [40] PERFORMANCE COMPOSITES Inc. *Vacuum Infusion Process (VIP) Guide* [online]. [cit. 2018-10-10]. Dostupné z: <http://www.performancecomposites.com/about-composites-technical-info/125-resin-vacuum-infusion.html>.
- [41] *Enhanced mechanical performance of foam core sandwich composites with through the thickness reinforced core* [online]. 2015 [cit. 2019-02-10]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/journal/13598368>.
- [42] *Vacum Infusing Processing with DIAB core materials* [online]. 2017 [cit. 2019-02-1]. Dostupné z: <http://www.stmboats.com/articles/infusion.pdf?fbclid=IwAR2BghqTkJqukkcq2OHgheUvk2UstnizTmcwLeLxP5gIx3a2J2sJvAAOv4A>.
- [43] *Processing guidelines* [online]. 2017 [cit. 2019-02-1]. Dostupné z: https://www.3accorematerials.com/uploads/images/AIREX-Processing-Guidelines_02.2017_EN_1106.pdf?fbclid=IwAR0Rwwa20mDDvA4lqOTAHObWxAmbE nfwYz7WCmDPedOe4ed5kEI6z6oSYZ0.

- [44] Airex C70. *Core materials* [online]. 2011 [cit. 2019-02-10]. Dostupné z: https://www.3accorematerials.com/uploads/documents/TDS-AIREX-C70-E_1106.pdf.
- [45] ASTM C393 / C393M-11, *Standard Test Method for Core Shear Properties of Sandwich Constructions by Beam Flexure*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2011.
- [46] Pata, V.: Úvod do exploratorní statistiky (přednáška). Zlín, UTB Zlín, 2018.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

°	Stupeň
°C	Stupeň Celsia
%	Procento
cm	Centimetr
cca	Cirka
E	Modul pružnosti [MPa]
<i>F</i>	Zatěžující síla [N]
MAX	Maximální hodnota
MED	Medián
MIN	Minimální hodnota
min	Minuta
mm	Milimetr
MPa	Megapascal
<i>N</i>	Newton
např.	Například
obr.	Obrázek
PE	Polyethylen
PET	Polyethylentereftalát
PVC	Polyvinylchlorid
<i>s</i>	Směrodatná odchylka
SAN	Styren-akrylonitril
VPV	Vážený průměr vlastností
V_x	Variační koeficient
\bar{x}	Aritmetický průměr

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1 Schéma sendvičové struktury [4]</i>	12
<i>Obr. 2 Roving [9]</i>	15
<i>Obr. 3 Druhy vazeb: a) plátňová, b) keprová, c) atlasová, d) košíková [10]</i>	15
<i>Obr. 4 Vyztužující rohož [9]</i>	16
<i>Obr. 5 Skelné vlákno [9]</i>	16
<i>Obr. 6 Uhlíkové vlákno [9]</i>	17
<i>Obr. 7 Hybridní aramidové vlákno [9]</i>	17
<i>Obr. 8 Přírodní vlákno [9]</i>	18
<i>Obr. 9 Prepreg [11]</i>	19
<i>Obr. 10 Kovový krycí materiál [9]</i>	19
<i>Obr. 11 Dřevěná překližka [14]</i>	20
<i>Obr. 12 Typy konstrukcí jádrových materiálů [16]</i>	20
<i>Obr. 13 Ukázka pěnového jádrového materiálu [17]</i>	21
<i>Obr. 14 Ukázka aramidového voštinového jádra [22]</i>	22
<i>Obr. 15 Ruční kladení [24]</i>	24
<i>Obr. 16 Lisování za tepla [26]</i>	24
<i>Obr. 17 Vytvrzování v uzavřené formě [26]</i>	25
<i>Obr. 18 Lisování pomocí vakua [27]</i>	26
<i>Obr. 19 RTM technologie [28]</i>	26
<i>Obr. 20 Princip vakuové infuze [30]</i>	28
<i>Obr. 21 Ukázka vyfrézovaného pěnového jádra</i>	29
<i>Obr. 22 Ukázka vyvrtaného pěnového jádra</i>	29
<i>Obr. 23 Ukázka prořezaného pěnového jádra</i>	30
<i>Obr. 24 Vyztužení pěnového jádra skelným rovingem [41]</i>	30
<i>Obr. 25 Typy tlakového porušení: a) vzpěr, b) zvlnění a porucha jádra, c) zvlnění vnějších vrstev, d) zvlnění vnějších vrstev a porucha jádra [34]</i>	32
<i>Obr. 26 Odlupování navíjecím bubnem [37]</i>	33
<i>Obr. 27 Odlupování pomocí tlaku vzduchu [37]</i>	33
<i>Obr. 28 Odlupování pomocí tahu [37]</i>	34
<i>Obr. 29 Třibodová zkouška ohybem [38]</i>	35
<i>Obr. 30 Čtyřbodová zkouška ohybem [38]</i>	35
<i>Obr. 31 Vyztužující skelná tkanina</i>	39

<i>Obr. 32</i> Pryskařice a tvrdidlo	40
<i>Obr. 33</i> Pěnové jádro Airex C70.75	41
<i>Obr. 34</i> Frézování drážek do pěnového jádra	42
<i>Obr. 35</i> Propletení pěnového jádra	42
<i>Obr. 36</i> Vrtání otvorů do pěnového jádra	43
<i>Obr. 37</i> Prořezání pěnového jádra	43
<i>Obr. 38</i> Odtrhová tkanina.....	45
<i>Obr. 39</i> Distribuční síť.....	45
<i>Obr. 40</i> Vakuová fólie	46
<i>Obr. 41</i> Těsnicí páska	46
<i>Obr. 42</i> a) hadice pro přívod matrice, b) spirálová hadice, c) konektor.....	47
<i>Obr. 43</i> Rezervoár.....	47
<i>Obr. 44</i> Vakuová vývěva	48
<i>Obr. 45</i> Naskládané jednotlivé vrstvy.....	48
<i>Obr. 46</i> Sendvičová konstrukce přichystaná na vakuovou infuzi	49
<i>Obr. 47</i> Prosycování výztuže maticí	49
<i>Obr. 48</i> Výroba vakuovou infuzí	50
<i>Obr. 49</i> Řezání zkušebních vzorků	50
<i>Obr. 50</i> Grafické znázornění hmotnosti vyrobených sendvičových panelů	52
<i>Obr. 51</i> Nedokonalé prosycení sendvičové konstrukce: a) dokonalé prosycení, b) nedokonalé prosycení	53
<i>Obr. 52</i> Uzavřený vzduch v sendvičové konstrukci: a) dokonalý stav, b) nedokonalý stav.....	54
<i>Obr. 53</i> Zkušební stroj ZWICK 1456	57
<i>Obr. 54</i> Tříbodová zkouška ohybem	58
<i>Obr. 55</i> Grafické znázornění efektivního modulu pružnosti sendvičových konstrukcí v tříbodovém ohybu	60
<i>Obr. 56</i> Grafické znázornění únosnosti sendvičových konstrukcí v tříbodovém ohybu	61
<i>Obr. 57</i> Poruchy sendvičových konstrukcí v tříbodovém ohybu.....	62
<i>Obr. 58</i> Poruchy sendvičových konstrukcí v tříbodovém ohybu.....	63
<i>Obr. 59</i> Tlaková zkouška za působení bočního tlaku.....	64
<i>Obr. 60</i> Grafické znázornění meze pevnosti sendvičových konstrukcí v tlaku	65
<i>Obr. 61</i> Grafické znázornění únosnosti sendvičových konstrukcí v tlaku	67

<i>Obr. 62 Poruchy sendvičových konstrukcí v tlakové zkoušce.....</i>	<i>68</i>
<i>Obr. 63 Vyřezané vzorky vložené do formy</i>	<i>70</i>
<i>Obr. 64 Členění sendvičové konstrukce.....</i>	<i>70</i>
<i>Obr. 65 Struktura pěnového jádra</i>	<i>71</i>
<i>Obr. 66 Vnější krycí vrstva: a) neporušený potah, b) porucha potahu</i>	<i>71</i>
<i>Obr. 67 Prořezaná drážka v pěnovém jádru.....</i>	<i>72</i>
<i>Obr. 68 Vyztužené jádro skelným rovingem</i>	<i>72</i>
<i>Obr. 69 Popraskaná matrice v sendvičovém panelu</i>	<i>73</i>
<i>Obr. 70 Výskyt vzduchových bublin</i>	<i>73</i>

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1 Vlastnosti dodané vyztužující skelné tkaniny [Příloha PI]</i>	39
<i>Tab. 2 Vlastnosti epoxidové pryskyřice Biresin CR80 a tvrdidla Biresin CH80-2 [Příloha PII]</i>	40
<i>Tab. 3 Vlastnosti pěnového jádra Airex C70.75 [Příloha PIII]</i>	41
<i>Tab. 4 Připravené sendvičové konstrukce s modifikovaným jádrem</i>	51
<i>Tab. 5 Hmotnost vyrobených sendvičových panelů</i>	52
<i>Tab. 6 Efektivní modul pružnosti sendvičových konstrukcí v třibodovém ohybu</i>	59
<i>Tab. 7 Únosnost sendvičových konstrukcí v třibodovém ohybu</i>	61
<i>Tab. 8 Mez pevnosti sendvičových konstrukcí v tlaku</i>	65
<i>Tab. 9 Únosnost sendvičových konstrukcí v tlaku</i>	66
<i>Tab. 10 Kritérium pro výběr nejlepší modifikace jádra</i>	69

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha PI Skelná tkanina 220 g/m²

Příloha PII Pryskařice Biresin CR80 a tvrdidlo CH80-2

Příloha PIII Pěnové jádro Airex C70.75

PŘÍLOHA P I: SKELNÁ TKANINA 220 G/M²



Technický list

Skelná tkanina 220 g/m²

AEROGLOSS

plátno

Váha na jednotku plochy		220 g/m ² +/- 15 g
Vazba		Plátno
Kraje		stříhané
Hustota cm	osnova	6 +/- 0,5
Hustota cm	útek	5 +/- 0,5
Použitá lubrikace		přímá silanová
Pevnost v tahu N/50*200 mm	osnova	≥ 1300
	útek	≥ 1100
Šíře cm		100 +/- 1 cm
Délka tkaniny / 1 role m		100 m +/- 1 cm
Doporučená skladovatelnost		Do 22 °C
	teplota	
	vlhkost	Do 65 %
Nábal	papírová dutinka	vnitřní průměr 76 mm
Balení		polyethylenová fólie

Havel Composites CZ, s.r.o., Svědlice 67, Přešovice, 783 54

Tel.: 585 129 010, Fax 585 129 040,

www.havel-composites.cz, info@havel-compositec.cz

PŘÍLOHA P II: PRYSKYŘICE BIRESIN CR80 A TVRDIDLO CH80-2

Product Data Sheet
Version 05 / 2017

Biresin® CR80 Composite resin system

Product Description

Biresin® CR80 is a low viscosity epoxy resin system suitable for the production of high performance fibre reinforced composites parts and moulds with thermal properties up to 80°C

Application Areas

Biresin® CR80 is especially suited to the infusion and injection processes due to its low viscosity range. It can be used in the marine, wind turbine and general industrial composite areas

Features / Advantages

- 4 hardeners (B) give a wide range of processing times
- Uniform mixing ratio of 100:30 by weight gives even more processing flexibility
- Fast infusion and good wet-out of fabrics and non-wovens due to low viscosity and good wetting characteristics
- All systems are Germanischer Lloyd approved, Certificate No. WP 1620019 HH (attached)
- Particularly good for applications where curing temperatures cannot be >75 °C
- Hardeners (B) Biresin® CH80-1 and CH80-2 can also be used for the manufacture of smaller parts in hand lay-up processing
- Hardeners (B) Biresin® CH 80-2 and CH 80-6 are also available in blue

Physical Data		Resin (A)		Hardener (B)		
Individual Components		Biresin® CR80	Biresin® CH80-1	Biresin® CH80-2	Biresin® CH80-6	Biresin® CH80-10
Mixing Ratio, parts by	Weight	100	30			
Mixing Ratio, parts by	Volume	100	34	34	36	36
Colour		translucent	colourless to yellow	colourless to yellow or blue		colourless to yellow
Viscosity, 25°C	mPa.s	~900	~50	~45	< 10	< 10
Density, 25°C	g/ml	1.13	1.00	0.99	0.95	0.95
		Mixture				
Potlife, 100 g / RT, approx. values	min		45	80	190	330
Mixed viscosity, 25°C, approx. values	mPa.s		400	350	230	210

Processing

- The material and processing temperatures should be from 18 to 35°C.
- The mixing ratio must be followed accurately to obtain best results. Deviating from the correct mix ratio will lead to lower performance.
- The final mechanical and thermal values are dependent on the applied postcuring cycles.
- To clean brushes or tools immediately Sika Reinigungsmittel 5 is recommended.
- Additional information is available in "Processing Instructions for Composite Resins".

Biresin® CR80



BUILDING TRUST



PŘÍLOHA P III: PĚNOVÉ JÁDRO AIREX C70.75

AIREX[®]



AIREX[®] C70

GM-TDS-106

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-fragile, 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.3ACcorematerials.com

Europe | Middle East | India | Africa
Airex AG
5640 Siren, Switzerland
T +41 41 789 66 00 | F +41 41 789 66 00
corematerials@3ACComposites.com

North America | South America
Baftek Inc.
High Point, NC 27261, USA
T +1 336 399 1900 | F +1 336 399 1901
corematerials.americas@3ACComposites.com

Asia | Australia | New Zealand
3A Composites (China) Ltd.
301201 Shanghai, China
T +86 21 585 96 006 | F +86 21 339 27 299
corematerials.asia@3ACComposites.com

MECHANICAL PROPERTIES											
Typical properties for AIREX® C70		Unit (metric)	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 3.6
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 68	3 to 60	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.

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 Typ. range	2.5	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 Minimum	65	87 73	130 109	210 160	290 247	435 377	745 653	960 769
Compressive modulus perpendicular to the plane	psi	Average Minimum	5'947	7'000 5'075	10'000 7'975	15'080 11'600	18'850 15'950	24'650 21'025	40'600 34'800	50'800 40'600
Tensile strength in the plane	psi	Average Minimum	100	138 116	190 145	290 232	390 319	580 435	870 696	1'090 798
Tensile modulus in the plane	psi	Average Minimum	4'060	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 Minimum	65	80 72.5	123 102	175 145	247 203	348 305	510 464	680 557
Shear modulus	psi	Average Minimum	1'900	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 11'370
Shear elongation at break	%	Average Minimum	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	950	850	750	700
	Length	mm ± 5	2850 ²⁾	2730 ¹⁾	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	

Finishing Options, other dimensions and closer tolerances upon request

¹⁾ Minimum values acc. DNV definition: test sample thickness 20 mm (3/4") except tensile properties 10 mm (3/8") and compressive modulus 40 mm (1 1/2")

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.