

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

FAKULTA LESNICKÁ A DŘEVAŘSKÁ



APLIKACE VYZTUŽOVACÍCH KOMPOZITŮ

V MATERIÁLECH NA BÁZI DŘEVA

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

FAKULTA LESNICKÁ A DŘEVAŘSKÁ

APLIKACE VYZTUŽOVACÍCH KOMPOZITŮ V MATERIÁLECH NA BÁZI DŘEVA

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Studijní program:

Dřevařské inženýrství

Pracoviště:

Katedra dřevěných výrobků a konstrukcí

Vedoucí diplomové práce:

doc. Ing. Martin Böhm, Ph.D.

Praha 2018

BcA. Viktor Břejcha

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta lesnická a dřevařská

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

BcA. Viktor Brejcha

Dřevařské inženýrství

Název práce

Aplikace vyztužovacích kompozitů v materiálech na bázi dřeva

Název anglicky

Application of reinforcing composites in engineered wood products

Cíle práce

Cílem diplomové práce je analýza a výzkum kombinace materiálů na bázi dřeva a kompozitních materiálů s vysokou pevností. Jedná se především o moderní typy materiálů na bázi aramidových nebo uhlíkových vláken a tzv. ekokompozitů – materiálů na bázi přírodních vláken a pryskyřic.

Metodika

Předmětem práce je navržení optimální konstrukce a skladby inovativního materiálu a následná analýza jeho vlastností. Součástí práce je nalezení nových možností aplikace materiálu a to zejména ve stavebnictví a v oblasti dřevěných konstrukcí.

Doporučený rozsah práce

40-60 stran textu, přílohy 10-20 stran

Klíčová slova

materiál na bázi dřeva, vlákno s vysokou pevností, ekokompozit, přírodní vlákno

Doporučené zdroje informací

DINWOODIE, J. M. – BUILDING RESEARCH ESTABLISHMENT. *Timber, its nature and behaviour*. London ; New York: BRE, with the support of the Centre for Timber Technology and Construction at BRE, 2000. ISBN 0419255508.

HRÁZSKÝ, J. – KRÁL, P. *Kompozitní materiály na bázi dřeva. Část 2, Dýhy a vrstvené masivní materiály : cvičení*. V Brně: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita, 2006. ISBN 80-7157-934-3.

KOLEKTIV. *Wood Handbook: Wood as an engineering material*. Washington: US Dep. of Agriculture, 1974.

MATOVÍČ, A. *Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva a materiálů na bázi dřeva : určeno pro posl. lesnické fak., obor dřevařský a lesnický*. Brno: Vysoká škola zemědělská, 1993. ISBN 80-7157-086-9.

SEDLIAČIK, M. – LIPTÁKOVÁ, E. *Chémia a aplikácia pomocných látok v drevárskom priemysle*. Bratislava: Alfa, 1989. ISBN 80-05-00116-9.

Webové prezentace dodavatelů a výrobců vláken s vysokou pevností a příslušné normy EN a ISO.

Předběžný termín obhajoby

2016/17 LS – FLD

Vedoucí práce

doc. Ing. Martin Böhm, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra dřevěných výrobků a konstrukcí

Elektronicky schváleno dne 29. 4. 2016

doc. Ing. Martin Böhm, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 29. 1. 2017

prof. Ing. Marek Turčáni, PhD.

Děkan

V Praze dne 19. 04. 2018

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

“Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma: Aplikace vyztužovacích kompozitů v materiálech na bázi dřeva vypracoval samostatně pod vedením pana doc. Ing. Martina Böhma, Ph.D. a použil jen prameny, které uvádím v seznamu použitých zdrojů.

Jsem si vědom, že zveřejněním diplomové práce souhlasím s jejím zveřejněním dle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách v platném znění, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby.“

V..... dne.....

Podpis autora

PODĚKOVÁNÍ

Touto cestou bych chtěl poděkovat své mamince za podporu v průběhu celého mého studia. Dále bych chtěl poděkovat vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Martinu Böhmovi, PhD., za odborné vedení, cenné připomínky a rady. Chtěl bych také poděkovat společnostem Entropy Resins a Arkema za poskytnutí vzorků materiálů a potřebných informací pro jejich testování. Zpracování diplomové práce bylo spolufinancováno z projektu „Rozšíření a podpora transferu technologií a znalostí na ČZU realizací aktivit proof-of-concept, reg. č. OP PPR CZ.007.1.02/0.0/0.0/16_023/000011 – KZ05“.

Abstrakt

Cíl diplomové práce je analýza materiálových možností v oblasti kompozitní výroby se zaměřením na přírodní vlákna a jejich problematiku aplikace. Experimentální část práce se zabývá porovnáním vybraných mechanických a fyzikálních vlastností vybrané přírodní a anorganické výztuže v kombinaci s třemi druhy matric. Jádrem sendvičové konstrukce je překližovaná deska z balsy. Celkem bylo vyrobeno šest skupin vzorků, každá obsahující patnáct zkušebních tělesech. Testovaná tělesa byla podrobena mechanické zkoušce dle ČSN EN 310 Stanovení modulu pružnosti v ohybu a pevnost v ohybu. U vybraného počtu vzorků bylo provedeno měření hustoty a vlhkosti při 50 % vzdušné vlhkosti. Ze získaných hodnot jsou porovnány jednotlivé vlivy použití rozdílných typů výztuží a matric na výsledné mechanické a fyzikální vlastnosti konstrukce. Z naměřených dat vyplývá, že speciálně upravená vlákna lnu mohou být adekvátní náhradou skelných výztuží v kombinaci s reaktoplastickou nebo termoplastickou matricí. V experimentální části byly použity inovativní produkty společností Entropy Resins a Arkema. Zvýšený zájem o ekologické a recyklovatelné materiály se promítá také do transportního sektoru, který se intenzivně snaží hledat nové materiálové možnosti v podobě vyztužovaných kompozitních materiálů na bázi přírodních vláken.

Klíčová slova: materiál na bázi dřeva, vlákno s vysokou pevností, ekompozit, přírodní vlákno.

Abstract

The objective of the master thesis is analysing of material possibilities in the field of composite production with a focus on natural fibres and their problems of application. The experimental part deals with comparison of selected mechanical and physical properties of selected natural and synthetic reinforcement in combination with three diverse types of matrixes. Selected core of the sandwich construction was a balsa plywood. There was made totally six groups, each containing fifteen test samples. The bodies were subjected to a mechanical test according to ČSN EN 310 Determination of Young's modulus and flexural strength. Selected number of samples were performed at 50 % air humidity for analysing of their density and humidity. The obtained values were compared with effect of different types of reinforcement and matrix different types on the resulting mechanical and physical properties of the structure. The measured data show that specially modified flax fibres can be adequate sufficient to the glass reinforcements in combination with a thermoplastic or thermosetting matrix. In the experimental part were used innovative products of Entropy Resins and Arkema. Increased interest in organic and recyclable materials is reflected in the transport sector, which is intensively seeking to find new material options in the form of reinforced composite materials based on natural fibres.

Keywords: Wood-based materials, High strength fibers, eco composite, nature fibers.

OBSAH

1 ÚVOD	12
2 CÍLE.....	13
3 TEORETICKÁ ČÁST	14
3.1 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY	14
3.1.1 Částicové kompozity	15
3.1.2 Vláknové kompozity	16
3.1.3 Anorganická vlákna	16
3.1.4 Organická vlákna	18
3.1.5 Struktura přírodních vláken	20
3.1.6 Vlastnosti přírodních vláken.....	21
3.1.7 Rozdělení přírodních vláken.....	21
3.1.8 Typy vláknových výztuží	25
3.1.9 Speciální typy vláknových výztuží	26
3.2 Ekonomické hledisko přírodních vláken.....	26
3.3 Ekologické hledisko přírodních vláken	29
3.4 Problematické vlastnosti přírodních vláken.....	30
3.4.1 Absorpce vlhkosti	30
3.4.2 Tepelná odolnost.....	31
3.4.3 Variabilita vlastností.....	31
3.5 MATRICE.....	32

3.5.1	Termoplasty	32
3.5.2	Reaktoplasty.....	33
3.6	SENDVIČOVÉ KONSTRUKCE.....	35
3.6.1	Materiálové varianty jádra.....	35
3.7	TECHNOLOGIE VÝROBY KOMPOZITNÍCH DÍLŮ	40
3.7.1	Ruční kladení	40
3.7.2	Vakuování/podtlakové lisování	41
3.7.3	Lisování za zvýšeného tepla a tlaku	42
3.7.4	Mechanické vlastnosti a druhy porušení sendvičových struktur	43
4	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	44
4.1	Popis použitých materiálů.....	44
4.1.1	Vnější vrstva	44
4.1.2	Jádro	45
4.1.3	Matrice	45
4.2	Příprava zkušebních těles.....	47
4.3	Mechanické testování těles	49
4.4	Přístroje a pomůcky	49
4.5	Zkušební tělesa.....	50
4.6	Postup mechanické zkoušky.....	50
4.6.1	Modul pružnosti v ohybu	51
4.6.2	Pevnost v ohybu.....	51

4.6.3	Průhyb při maximálním zatížení	51
4.6.4	Hustota a vlhkost při 50 % vzdušné vlhkosti	52
4.6.5	Elektronová mikroskopie	52
4.7	Zpracování naměřených dat.....	53
5	VÝSLEDKY	54
5.1	Modul pružnosti v ohybu	54
5.2	Pevnost v ohybu	55
5.3	Průhyb a maximální zatížení	57
5.4	Hustota a relativní vlhkosti	58
5.5	Poruchy vzniklé během statické zkoušky	59
5.6	Shrnutí výsledků mechanické zkoušky	60
5.7	Aplikace konstrukce v praxi.....	64
6	ZÁVĚR.....	65
7	DOPORUČENÍ.....	66
8	PŘEHLED LITERATURY A POUŽITÝCH ZDROJŮ	67
9	SEZNAM GRAFŮ	71
10	SEZNAM TABULEK.....	72
11	SEZNAM OBRÁZKŮ	73

1 ÚVOD

Jako příznivec plachtění jsem měl možnost získat mnoho zkušeností a znalostí na vodě i mimo ni. Plavba pod plachtami mě naučila mnohým pro život důležitým pravidlům a hodnotám. Jednou z takových hodnot, je respekt k síle přírody. Každý kvalitní závodník si uvědomuje, že k dosažení nejlepších výkonů není možné s přírodou svádět boj, ale naopak je nutné s ní spolupracovat a nalézt harmonii. Harmonie s přírodou mě inspirovala k napsání této diplomové práce.

Některá z období lidské populace lze dělit podle objevených materiálů na dobu kamennou, bronzovou nebo železnou. Období dvacátého a jednadvacátého století bychom mohli označit za dobu plastovou a kompozitní. Díky výborným mechanickým a fyzikálním vlastnostem plastů a kompozitů došlo k velmi rapidnímu zrychlení vývoje a výzkumu v této oblasti. Kompozitní materiály velmi rychle našly uplatnění napříč všemi sektory techniky, a to především díky svým dobrým mechanickým vlastnostem. Setkáváme se s nimi nejen v leteckém průmyslu, ale také v dopravě, spotřebním průmyslu nebo medicíně [19]. Zvýšený zájem o plasty a kompozity má za následek vysokou spotřebu, která v roce 2011 dosahovala v Evropě hodnoty 47 miliónů tun materiálu. Společně se zvyšující se poptávkou a spotřebou plastů nebo kompozitů vyvstává mnoho otázek v oblasti efektivní recyklace a dalšími problémy spojenými s jejich získáváním z neobnovitelných zdrojů [45]. Zvyšující se ekologická a ekonomická vnímavost nebo zvyšující se tempo spotřeby nerostných surovin tak otevírá nové možnosti a podněty k hledání šetrnějších nebo také „zelených“ materiálů jako možné alternativy nebo řešení současné situace. Plasty a kompozity z obnovitelných zdrojů nebo přírodních materiálů v posledních letech zaznamenávají velký pokrok ve vývoji [57]. Mezi hlavní odvětví patří aplikace přírodních vláken ve formě výztuží a plniv. Zvýšeného zájmu se těmto materiálovým variacím dostává například v dopravním průmyslu, kde přírodní vlákna mohou zastat adekvátní náhradu za v současnosti používaná anorganická vlákna v konstrukcích mimo deformační zóny jako jsou například pohledové části interiéru. S přírodními vlákny a materiály jako je například balsa, se stále častěji můžeme setkat ve formě experimentální aplikace jako jsou lopatky větrných elektráren nebo závodních plachetnic [14,28].

2 CÍLE

Cílem diplomové práce je analýza a výzkum kombinace materiálů na bázi dřeva a kompozitních materiálů s vysokou pevností. Jedná se především o moderní typy materiálů na bázi syntetických vláken a tzv. ekokompozitů – materiálů na bázi přírodních vláken a pryskyřic. Na základě literární analýzy byly stanoveny tyto dílčí cíle:

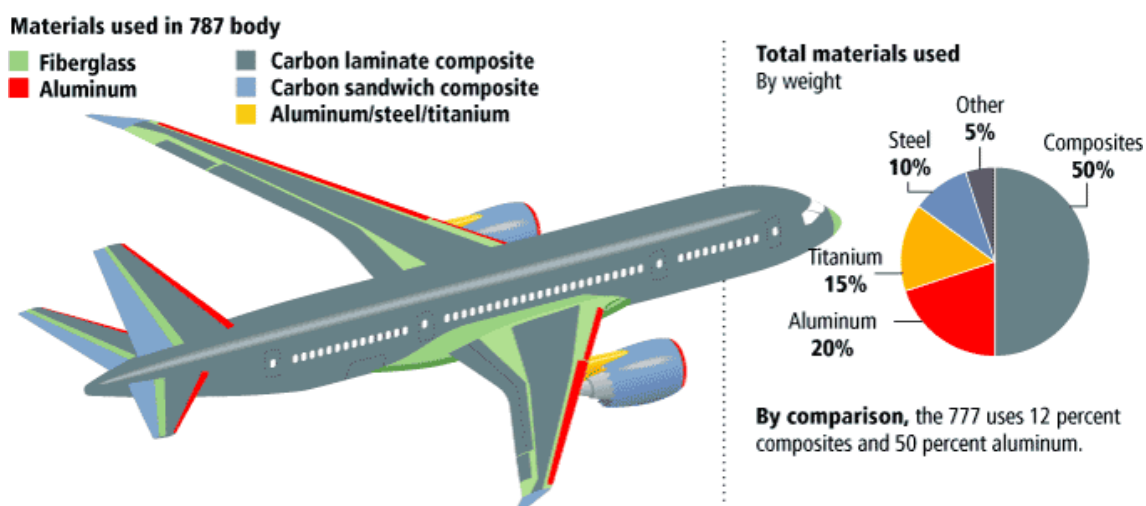
- Analýza mechanických vlastností přírodních vláken oproti anorganickým.
- Porovnání naměřených hodnot modulu pružnosti v ohybu testovaných skupin se lněnou nebo skelnou výztuží.
- Porovnání naměřených hodnot pevnosti v ohybu testovaných skupin se lněnou nebo skelnou výztuží.
- Analýza vlivu druhu matrice a vlákna na hustotu a vlhkost konstrukce.
- Návrh aplikace testované sendvičové konstrukce v praxi.

3 TEORETICKÁ ČÁST

3.1 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY

S kompozitními materiály se lidská populace měla možnost setkat již dávno v minulosti. Mezi první kompozity byly označovány jílové cihly, do kterých první řemeslníci přidávali vlákna slámy, aby zvýšili pevnost výrobku a tím i kvalitu zděných prvků [37]. Dalším zásadním kompozitem v dějinách lidstva byl železobeton, materiál, který byl vytvořen v 19. století a který posunul dosavadní možnosti stavebnictví do nových oblastí [38].

S výrazně rozsáhlejším výzkum v oblasti kompozitních materiálů se setkáváme až v druhé polovině 20. století, a to především díky výzkumu v oblasti vojenské a kosmické aplikace. Dnes nachází toto materiálové odvětví stále nové možnosti uplatnění a aplikace. Svým rozšířením a širokým portfoliem úprav nahrazují konvenční materiály, které ještě donedávna zaujímaly majoritní postavení. Paralelně s vývojem materiálů můžeme sledovat vývoj a výzkum v oblasti zpracování. Mezi hlavní výhody těchto materiálů patří možnost úprav a „šití na míru“ technologických postupů ve výrobě za účelem dosažení specifických vlastností vyráběného produktu. Uplatnění tak nalézají nejen v dopravním (například leteckém) sektoru, kde můžeme v posledních letech být svědky velkého závodu za snížením váhy (Obrázek 1), ale také ve stavebnictví v podobě krytinových systémů, nebo v biomedicínské aplikaci.



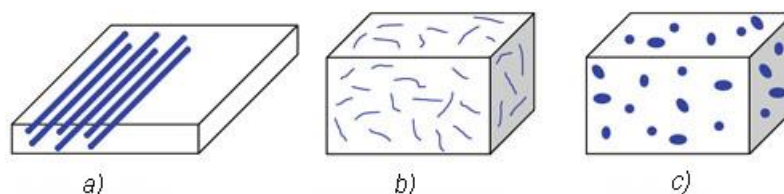
Obrázek 1: Materiálové zastoupení v konstrukci letadla Boeing 787 [39]

Jednou z hlavních odlišností kompozitních materiálů od běžných heterogenních materiálů jako jsou kovy, je existence synergického efektu. Jedná se o vznik nových materiálových vlastností kombinací dvou či více různých materiálů s různými vlastnostmi. Slovo synergie pochází z řečtiny a to syn-ergazomai = spolu-pracovat. Někdy ji lze symbolicky vyjádřit jako „1+1>2“ [37].

3.1.1 Částicové kompozity

Strukturu částicových materiálů tvoří kombinace matrice a jemných částic, jejichž velikost obvykle nepřesahuje 1-20 μm . Materiál částic, nebo také někdy označení plniva, může být anorganického, kovového charakteru, na bázi kyslíčkových kovů nebo také konstrukční keramiky či přírodniny. V kombinaci s hliníkovou nebo titanovou matricí mohou tyto materiály nalézt uplatnění v řešení konstrukcí součástí strojních zařízení, která jsou vystavena vysokým teplotám. Za částicový kompozit lze označovat také porcelán – kompozit na bázi keramiky. V oblasti plastů můžeme za kompozit označit například pryž. Výchozí surovina (kaučuk) je plněna sazemí nebo SiO_2 do výše 40-50 % hmotnosti výrobku [46].

Na rozdíl od vláknových kompozitů, částicové kompozity jsou používány jako plniva pro termoplasty. Matrice v částicových kompozitech je hlavním nositelem mechanických a fyzikálních vlastností, to zapříčiňuje, že částicové materiály jsou méně odolné vůči únavě a nedosahují takových pevnostních hodnot jako kompozity vyztužené vlákny. V počátcích představovalo plnivo pouze způsob snížení nákladů. Až později bylo zjištěno, že přidáním do matrice dochází ke zlepšení mechanických vlastností jako je ořezuvzdornost, tuhost, tepelná vodivost, rozměrová stabilita či tvrdost [32]. Na obrázku č. 2 můžete vidět základní rozdělení kompozitních materiálů a jejich charakteristické rozdíly.

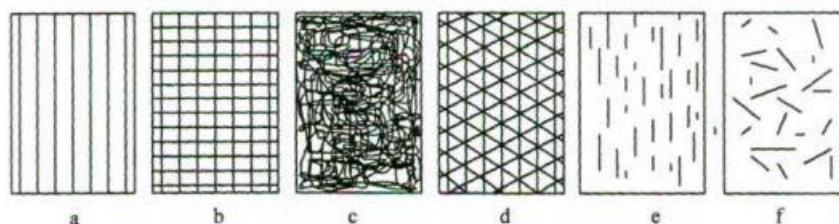


Obrázek 2: Rozdělení kompozitních materiálů: a) Dlouho vláknité kompozity, b) krátkovláknité kompozity, c) částicové kompozity [33]

3.1.2 Vláknové kompozity

Hlavním poznávacím znakem vláknových kompozitů je výrazně větší rozměr výztuže v jednom ze směrů. Všeobecně tyto materiály dělíme na dvě hlavní skupiny – kompozity s krátkým vláknem a dlouhým vláknem. Důležitým nástrojem k rozlišení těchto druhů vláken je aspektní poměr. Jedná se o poměr délky vlákna ku jeho průměru. Pokud je výsledná hodnota poměru menší než hodnota 100, jedná se o krátkovláknitý kompozit. V případě, že výsledná hodnota je vyšší než udávaných 100, jedná se o dlouhovláknitý kompozit, někdy také nazývaný jako kompozit vyrobený z kontinuálních vláken [31].

Hlavním poznávacím charakterem krátkých vláken je jejich výrazně menší rozměr v porovnání s velikostí výrobku. Mezi hlavní výhody těchto kompozitů patří možnost izotropie, která je dána náhodnou orientací vláken ve všech směrech. Výrazně lepší mechanické a fyzikální vlastnosti vykazují kompozity obsahující dlouhá vlákna. Tento typ vláken může mít různé způsoby orientace (Obrázek 3) a uspořádání, čímž může zvýhodnit mechanické vlastnosti v daném směru nebo orientaci výrobku [32].



Obrázek 3: Schéma uspořádání vláken ve výztužích: a) jednosměrně orientovaná vlákna, b) tkanina, c) rohož, d) multi axiální tkanina, e) jednosměrně orientovaná krátká vlákna, f) krátká vlákna s náhodnou orientací [31]

3.1.3 Anorganická vlákna

V současnosti se v oblasti kompozitních dílů setkáme s anorganickými vlákny (Obrázek 4). Mezi jejich hlavní přednosti patří dobrá odolnost vůči zvýšené teplotě a velmi dobré mechanické vlastnosti. Mezi jejich hlavní nevýhody ovšem patří problematická a velmi nákladná recyklace a k životnímu prostředí nešetrná výroba [16]. Na nadcházejících stranách si představíme nejběžněji používaná vlákna v této oblasti.

3.1.3.1 Skleněná vlákna

V současnosti nejběžněji používaným vláknem v kompozitních materiálech je skelné. Skelná vlákna jsou vyráběna tažením ze sklářského kmene (směs křemenného písku, vápence a dalších přísad) v platinových pecích. Po vytažení vlákna z pece je ochlazeno a následně na něj aplikována ochranná vrstva proti oxidaci. Tato vrstva také zvyšuje adhezi a smáčelnost organickými matricemi. Skelná vlákna jsou obsažena především v produktech se zaměřením na sériovou výrobu a oblastech, kde není požadovaný vysoký důraz na mechanické vlastnosti v porovnání s jinými druhy vláken. Vlákna jsou poměrně odolná vůči vysokým teplotám, nehořlavá a chemicky odolná. Skleněná vlákna nachází své uplatnění také ve stavebnictví, a to díky svým tepelně-zvukovým izolačním vlastnostem.



Obrázek 4: 1) skelná tkanina, 2) Uhlíková tkanina, 3) Aramidová tkanina

Tento druh vláken v současné době patří k nejdostupnějším a nejlevnějším. Skelná vlákna nalezneme ve dvou hlavních modifikacích/úpravách – typu E glass, které je charakteristické svou vysokou tuhostí a typu S glass, pro které je charakteristická vysoké pevnost [11].

3.1.3.2 Uhlíková vlákna

V transportním sektoru se poslední roky setkáváme se stále zvyšujícím zájmem o uhlíková vlákna. Jedná se o vlákna s výrazně lepšími mechanickými vlastnostmi. Tento druh výztuže disponuje krystalickou strukturou. Krystaly jsou orientovány paralelně k dlouhé ose. Výroba těchto vláken spočívá v předpřípravě prekurzoru (výchozího materiálu, kterým jsou polyakrylonitrilová vlákna PAN) tavným zvlákňováním. Struktura materiálu ovlivňuje strukturu a pevnost uhlíkových vláken. Je nutné, aby před samotným procesem karbonizace byl materiál stabilizován [11].

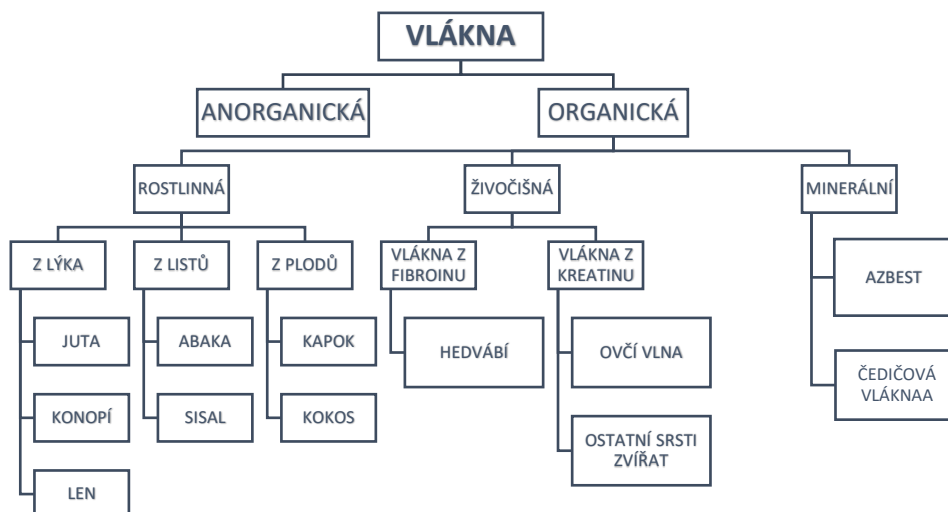
Tento proces se provádí v okysličené atmosféře při zahřátí na nízkou teplotu (200–450 °C) po dobu několika desítek minut) [6]. V průběhu tohoto procesu uhlíkové vlákno sbírá molekuly kyslíku a dojde tak k přerovnění atomové struktury vlákna. Následuje proces karbonizace, kdy materiál se převádí na uhlíkové vlákno. Tento proces se provádí v inertní atmosféře při teplotách 1000–2000 °C. Vzniká tak uspořádaná vrstvená struktura a zvýšení obsahu uhlíku na 99 % a více. Vlákno jako takové ovšem nedokáže dostatečně vázat a pojit se s epoxidovou maticí. Je proto zapotřebí, aby povrch mírně zoxidoval. Přidáním kyslíkových atomů na povrchu umožní efektivnější přilnavost. Méně používaným způsobem získávání vlákna je za použití výchozí suroviny dehtové smoly. V obou případech je ovšem zapotřebí okysličení povrchu vláken za účelem zvýšení adheze [11, 47].

3.1.3.3 Aramidová vlákna

Tento typ vláken disponuje vysokou pevností, vysokým modulem pružnosti v tahu a jsou žáru vzdorná. Aramidová vlákna nalézají uplatnění především v leteckém průmyslu a ve výrobě ochranných prostředků jako jsou neprůstřelné helmy a chrániče. Vstupní surovinou pro výrobu vláken jsou aromatické polyamidy, které jsou během procesu rozpuštěny v koncentrované kyselině sírové a následně vytlačovány tryskami do studené vody, kde jsou proprány a sušeny na navíjecích cívkách [11].

3.1.4 Organická vlákna

Organická vlákna získávají v posledních několika letech stále větší pozornost. Tento jev je dán především jejich nízkou cenou, dobrými mechanickými vlastnostmi či nízkou hustotou vláken [6]. Nesporným pozitivním jevem je také jejich způsob výroby a obnovitelnost zdroje, ze kterého jsou získány. V kombinaci s termoplastickými maticemi mohou organická vlákna hrát zásadní roli v oblasti recyklace a obnovitelných zdrojů. Tento druh obnovitelného zdroje by mohl v nadcházejících letech plnohodnotně nahradit v současnosti nejběžněji používaná syntetická vlákna, a to především v mezistupňových konstrukcích jako jsou sedadla, výplně dveří nebo palubní desky automobilů. Organická vlákna mohou být využita také v jiných odvětvích transportního průmyslu, strojírenství nebo stavebnictví [1]. Mezi hlavní nevýhody těchto vláken patří zvýšená absorpce a mechanická degradace při teplotách nad 200 °C [7]. Organická vlákna můžeme dělit na tři základní skupiny – živočišná, přírodní a minerální vlákna (Obrázek 5).



Obrázek 5: Rozdělení vláken [6]

3.1.4.1 Živočišná vlákna

Do kategorie živočišných vláken zařazujeme vlákna získávána ze srsti zvířat nebo jejich sekretu. Některé odborné literatury zařazují do této kategorie také žíně nebo lidské vlasy [2]. Základním stavebním dílcem živočišných vláken jsou bílkoviny. Bílkovina vláken ze srsti se nazývá kreatin, tedy kreatinová vlákna. U vláken získaných ze sekretu živočichů je tato látka nazývána jako fibroin, tedy fibroinová vlákna [3].

3.1.4.2 Minerální vlákna

Minerální vlákna jsou získávána tavením nerostné suroviny. V oblasti kompozitních materiálů se můžeme setkat nejčastěji s čedičovými (basaltovými) vlákny. Čedičová vlákna jsou tvořena nekonečnými fibrilami, které jsou získány tavením bazaltu o vhodném složení. Tento druh vláken může být zvolen jako alternativa k běžně používaným skelným výztužím. Mezi hlavní klady těchto výztuží patří nehořlavost, nízký obsah spalin, velmi dobrá chemická odolnost vůči anorganickým a organickým kyselinám a jiným agresivním látkám. Oproti skelným vláknům vykazují bazaltová vlákna vyšší hustotu (2900 kg/m^3) a navlhavost [61]. Mechanické vlastnosti těchto vláken mohou být v mnoha případech příznivější oproti běžnému syntetickému vláku skla. Velkou výhodou těchto minerálních vláken je jejich přírodní původ bez obsahu příměsí, možnost 100 % recyklace, menší zátěž pro životní prostředí v průběhu výroby a likvidace nebo bohatý výskyt nerostné suroviny [60].

3.1.4.3 Přírodní – rostlinná vlákna

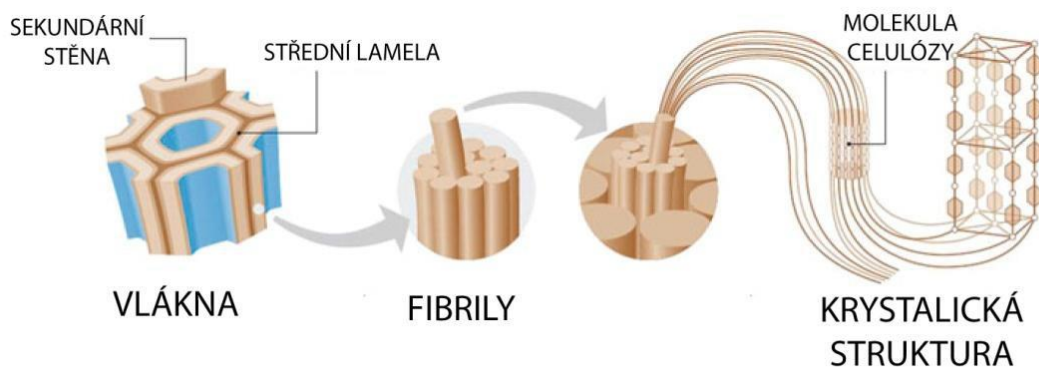
Přírodní rostlinná vlákna, kterými se diplomová práce zabývá, mohou být obsažena v listech, stoncích či plodech rostlin. Z toho důvodu se jednotlivé druhy vláken liší ve svých vlastnostech [4]. Jedním z historicky nejdůležitějších a nejčastěji používaných vláken je bavlna. Tato jemná bílá substance je získávána ze semen rostlin rodu *Gossypium* – bavlníku. Bavlněné vlákno nalezneme především v oděvním průmyslu [5]. V oblasti kompozitních materiálů se začínáme setkávat s výskytem lýkových vlákních. Mezi typické zástupce této kategorie patří juta, konopí, len setý nebo sisal. Ve výjimečných případech (na experimentální úrovni) se můžeme setkat také s druhy vláken exotického charakteru. Mezi takové druhy patří například vlákna z banánovníku nebo kokosové vlákno. Tyto vlákna patří především mezi sekundární materiály rostlin.

Zvyšující se zájem a poptávku po přírodních vlákních lze vyčíst z hodnot celkové produkce v uplynulých letech. Celkový objem kompozitů s přírodními vlákny v roce 2010 činil 4 % z celkového objemu kompozitní produkce vyrobených v Evropské Unii (v metrických jednotkách 92 000 tun). Odborná literatura předpovídá, že v roce 2020 bude podíl bio kompozitů v celkovém objemu více než 370 000 tun z celkové produkce tohoto odvětví [8].

3.1.5 Struktura přírodních vláken

Struktura jednotlivých přírodních vláken je rozdílná. Je to dáno různorodostí jednotlivých rostlin i způsobem, jakým jsou izolována. Rozdíly v chemickém složení a struktuře ovšem nalezneme také u rostlin stejného druhu. Na struktuře vlákna i rostliny mají vliv například pěstební podmínky nebo stáří rostliny, ve kterém je sklizena. Stáří rostliny ovlivňuje buněčné složení stěn, které ovlivňují vlastnosti vláken.

Dalším faktorem, který ovlivňuje výsledné vlastnosti, je proces jejich získávání z těla rostliny – mechanický, chemický nebo enzymický proces [9]. Základním stavebním prvkem přírodních vláken je buněčná stěna, která se skládá z celulózy, ligninu a dalších polysacharidů jako jsou hemicelulóza nebo pektin, vosků, dusíkatých sloučenin a anorganických solí. Celulóza a lignin společně s polysacharidy tvoří mikrofibrily – strukturu stěny (Obrázek 6) [4].



Obrázek 6: Struktura vlákna [4]

3.1.6 Vlastnosti přírodních vláken

Jak již bylo zmíněno, výsledné mechanické vlastnosti přírodních vláken závisí na mnoha faktorech. Na výsledné vlastnosti mají vliv odrůda zvolené rostliny, pěstební procesy, oblast pěstování nebo také klimatické podmínky v průběhu růstu. Tyto faktory v současné době limitují opakovatelné použití vláken ve výrobě kompozitů. Kromě mechanických vlastností jsou pro vlákna důležité parametry jako jemnost, délka vláken, sorpční schopnost nebo odolnost vůči slunečnímu záření [9]. Tabulka č. 1 nabízí porovnání vybraných mechanických vlastností u konkrétních vláken. Uvedené hodnoty pochází z více zdrojů. V závorce je uvedena nejčastěji publikovaná hodnota. Z tabulky je zřejmé, že polymerní vlákna jako je uhlík nebo aramid dosahují nejvyšších hodnot mechanických vlastností a přírodní vlákna jim nemohou v tomto směru konkurovat. Zajímavého údaje lze ale dosáhnout porovnáním těchto vláken s tradičním skelným, které patří mezi nejvyužívanější materiálové výztuže v oboru. Literatura uvádí, že v některých případech lze dosáhnout plnohodnotné náhrady [10]. Z udávaných hodnot je ovšem zřejmé, že velkým problémem vláken je jejich velký rozptyl hodnot.

3.1.7 Rozdělení přírodních vláken

Přírodní vlákno dělíme na základě části, ze které je izolováno. Vlákno lze získat z lýka, listu nebo semene rostliny (plodů). Mezi vlákna, izolovaná ze semen nebo plodů rostlin, řadíme kokosová vlákna nebo vlákna z olejové palmy [13]. Mezi vlákna izolovaná z listů rostlin řadíme sisal, abaku nebo banánovník. Tyto vlákna mají hrubší charakter než ostatní izolovaná přírodní vlákna. Do skupiny vláken získaných z lýka patří lněná, konopná, jutová nebo kenafová vlákna.

Vlákná této skupiny jsou izolována ze svazků vláken uvnitř stonku rostlin, který obklopuje dřevěné jádro, které tvoří část lýka [4]. V diplomové práci se dále budu zabývat lýkovými vlákny, která vykazují nejlepší mechanické vlastnosti z přírodních vláken.

Vláknó	Pevnost v tahu (MPa)	Youngův modul pružnosti (GPa)	Tažnost (%)	Hustota (g/cm ³)	E/ ρ	
Přirodní vlákna	Len	343-1500 (700)	8-100 (70)	1,2-4 (3)	1,4-1,52	50
	Konopí	310-1100 (800)	3-90 (65)	1,3-6 (3)	1,4-1,6	41
	Juta	187-800 (500)	3-64 (30)	0,2-3,1 (1,8)	1,3-1,5	20
	Sisal	80-855 (600)	9-38 (12)	1,9-4 (3)	1-1,5	8
	Kenaf	180-1191 (700)	22-128 (55)	1,2-4,6 (3)	1,2-1,4	39
	Kapok	45-93 (60)	1,7-4 (2,9)	1,2-4 (2)	1,47	2
	Kokos	95-270 (200)	2,8-6 (5)	15-51,4 (30)	1,15-1,5	3
	Abaka	12-980 (600)	12-72 (50)	1-12 (4)	1,4-1,5	33
	Ananas	170-1627 (750)	6,2-82 (40)	0,8-3 (2)	0,8-1,6	25
	Carauá	439-495 (460)	10 (10)	1,3-4,5 (3)	0,92	11
	Bambus	140-1000 (500)	11-89 (30)	1,2-4 (3)	0,6-1,5	20
	Olej. palma	248 (248)	3,2-6,7 (4,5)	14-25 (20)	0,7-1,55	3
Polymerní vlákna	E-glass	3500	72,4	2,5-4,8	2,54	29
	S-glass	4600	85,5	2,5	2,48	34
	E-carbon	2100	390	0,7	1,9	205
	S-carbon	2500	240	0,7	1,9	126
	Aramid	2800	130	2,5	1,5	87
Kov	Ocel	340-2500	210	-	7,8	27
	Hliník		70-71	-	2,7	26

Tabulka 1: Srovnání vybraných mechanických vlastností u vybraných typů vláken [dopočet autora dle 10,11]

3.1.7.1 Jutová vlákna

Jutová vlákna jsou získávána ze stonků rostlin rodu *Corchorus*. Juta patří mezi nejnámější a objemově nejprodukovanější a nejlevnější vlákna [15]. Vlákna dělíme na dva hlavní typy – *capsularis* a *olitorious*. *Capsularis* se vyznačuje bílou barvou vláken, *olitorious* je zbarvený do načervenalé barvy. Tento typ se vyznačuje jemnějším a silnějším charakterem. Vlákna juty se oproti jiným přírodním vláknům vyznačují svou délkou, měkkostí, leskem a horšími mechanickými vlastnostmi (Tabulka 1). Vhodnými podmínkami k pěstování tohoto druhu rostlin je vlhké klima (70-90%) a vysoké teploty kolem 34 °C. Hlavními producenty jsou proto země jako je Bangladéš, Čína nebo Indie [7]. Juta nalézá své využití především v textilním průmyslu, jako balící nebo dekorační materiál, nebo ve stavebnictví v podobě geotextilií. Stejně jako len jsou jutové tkaniny experimentálně využívána v podobě výztuže pro kompozitní díly. Mezi nevýhody tohoto vlákna patří kromě horších mechanických vlastností také vyšší nasákavost (juta 12 %, len 7%) [13]. V kompozitní výrobě proto nalézá juta uplatnění především v podobě pomocného materiálu jako alternativa k odsávací rohoži. Na obrázku 7 můžete vidět podobu rostliny, vlákno zvětšeného elektronovým mikroskopem a hlavní oblasti pěstby.

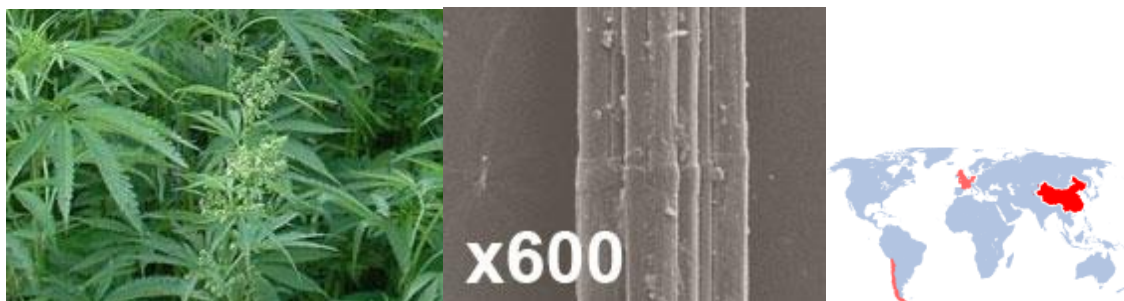


Obrázek 7: Jutové vlákno [40]

3.1.7.2 Konopná vlákna

Konopná vlákna (Obrázek 8) jsou získávána ze stonků rostlin konopí setého (*Cannabis sativa*). Konopí lze dělit na tři skupiny: evropské, jižní a severní konopí. Jedná se o jednoletou bylinu, která se pěstuje především v oblastech s mírným podnebím/klimatem. Pro zlepšení adhezních vlastností jsou vlákna upravena chemickými látkami, například hydroxidem sodným, acethydridem nebo silanovými reakčními činidly. Konopná vlákna společně se lněnými patří mezi nejvyhledávanější přírodní výztuže pro kompozitní materiály.

Jejich použití nalezneme například v automobilovém průmyslu v podobě kompozitních výplní dveří nebo palubních desek [59]. Konopí má velmi dobré tepelně izolační vlastnosti, a proto nalezneme také konopí ve stavebnictví v podobě ekologické tepelné izolace [7].



Obrázek 8: Konopné vlákno [40]

3.1.7.3 Lněná vlákna

Nejběžněji pěstovaným druhem lnu je len setý (*Linum usitatissimum*). Ideální podmínky pro pěstování rostliny jsou v mírném podnebí. Primární surovinou, kvůli které se len pěstuje, je lněné semeno. Lněné vlákno je využíváno jako sekundární materiál [7]. Hlavním zpracovatelem vlákna je textilní průmysl, ovšem v posledních letech len nachází nové možnosti uplatnění také v kompozitní výrobě [14]. Lněná vlákna jsou izolována z lýka rostliny. Vlákna mohou být izolována několika způsoby – máčením ve vodě nebo roztoku, rosením, chemickou nebo fyzikální metodou. Nejběžněji používanou metodou je máčení ve vodě. Vytrhaná rostlina prochází procesem máčení a rosení. Během procesu na rostlinu působí mikroorganismy, které rozkládají pektin („rostlinné lepidlo“), které vytváří spojení mezi vlákny a dřevinou. Izolovaná a vysušená vlákna mohou dále procházet mezi procesy před jejich finálním zpracováním do rovingu nebo tkaniny. U vláken pro aplikaci v kompozitních materiálech se můžeme setkat s povrchovou úpravou, jejíž cílem je zlepšení adheze vlákna [7]. Technické vlákno lnu může dosahovat délky 20–130 cm, nejběžněji má polygonální průřez, je hladké a lesklé [53].



Obrázek 9: Lněné vlákno [40]

Tým Ebra Bozace v této oblasti provedl výzkum, během kterého vlákna lnu upravil pomocí plazmy v atmosféře vzduchu a argonu. Upravená vlákna byla prosycena matricemi nenasycené polyesterové pryskyřice a HDPE (High density polyethylen – Polyethylen s vysokou hustotou). Díky elektronovému mikroskopu bylo zjištěno, že plazmou upravená vlákna mají hrubší povrch, který zlepšuje mezifázi mezi matricí a výztuží [15]. V současnosti se můžeme setkat na trhu jak se suchými lněnými textiliemi, tak hybridními textiliemi v podobě kombinace lněného vlákna s termoplastickou matricí v podobě vlákna. Takto vložená matrice je vetkána do lněné textilie. Při zvýšené teplotě v lisu, se PLA vlákna rozpustí do tkaniny. Výsledný produkt je kombinací termoplastické matrice a výztuže z přírodního vlákna.

V experimentální části jsou použita vlákna, která jsou již výrobcem zpracována do podoby textilie. V této oblasti byl zvolen materiál výrobce Composites Evolution, který jako jeden z mála nabízí široké portfolio gramáží a typů tkanin. Vzhledem k charakteru sendvičové konstrukce byla zvolena tkanina s vysokou gramáží (400 kg/m^2), kterou v současné době vyrábí pouze zmíněný výrobce.

3.1.8 Typy vláknových výztuží

Samotné vlákno je spravováno do nekonečného pramenu/rovingu, rohože nebo tkaniny. Cílem je využití maximálního potenciálu vlákna a jeho úprava pro zvolený výrobek. Surový roving (nekonečné vlákno) se používá především pro výrobu navíjených profilů nebo pro výrobu jednosměrně orientovaných dílů či jejich částí, kde je zapotřebí využití vlastností pevnosti v ohybu. Dalším produktem vláken je rohož a tkanina. Rohož je pláno skládající se z náhodně kladených vláken, spojených emulzním nebo práškovým pojivem. Nejčastěji používaným vláknem pro tento typ je skelné. Rohož je nejvíce používána pro sériově vyráběné kompozitní díly s požadavkem na nižší mechanické vlastnosti. Rohož může být také použita v kontaktním laminátu – čistý sklolaminát. Na trhu nalezneme nepřeberné množství variant a gramáží rohoží od hmotnosti 100 g/m^2 až po varianty 2500 g/m^2 . Největší sortiment nalezneme v oblasti tkanin. Do podoby tkané textilie jsou zpracovány všechny druhy vyráběných vláken [19].

Textilie samotné můžeme rozlišovat podle gramáže, šířky, a především podle způsobu tkaní (Obrázek 10). Nejběžnějším typem je plátno a keprová vazba. Můžeme se také setkat s jednosměrnými vlákny nebo netkanými textiliemi, kde jednotlivá vlákna jsou pouze spojena prošitou polyesterovou nebo nylonovou nití pro pohodlnější práci s tkaninou. Hlavním principem různorodosti nabídky tkanin je maximální optimalizace požadovaných mechanických vlastností finálního produktu [26].



Obrázek 10: Druhy vazeb [26]

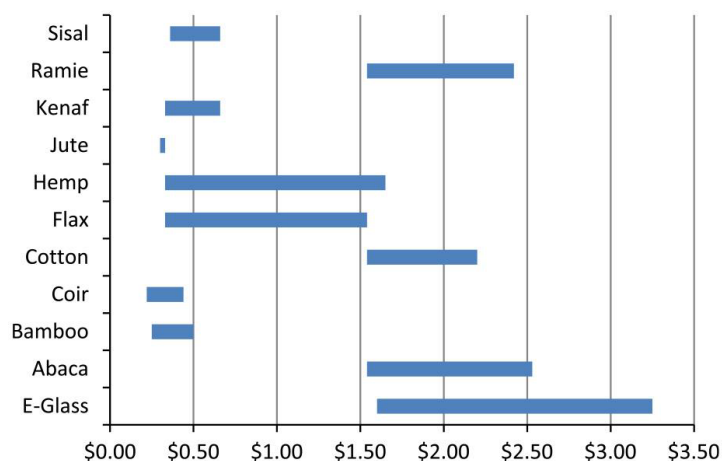
3.1.9 Speciální typy vláknových výztuží

Mezi speciální typy výztuží lze řadit, tkaniny obsahující dva a více druhů tkanin. Mezi typické typy patří kombinace uhlíkového vlákna s aramidovým. Tyto tkaniny mohou být tkány v poměru 1:1 nebo 2:1, ale také s větším obsahem jednoho z materiálů. Kombinací aramidu a uhlíku lze dosáhnout velmi dobrých mechanických hodnot, pohodlnější zpracovatelnosti i zlepšení prosycení matrice v průběhu laminování. Důvodem k výrobě těchto speciálních tkanin je především optimalizace vlastností pro vyráběný produkt [18].

3.2 Ekonomické hledisko přírodních vláken

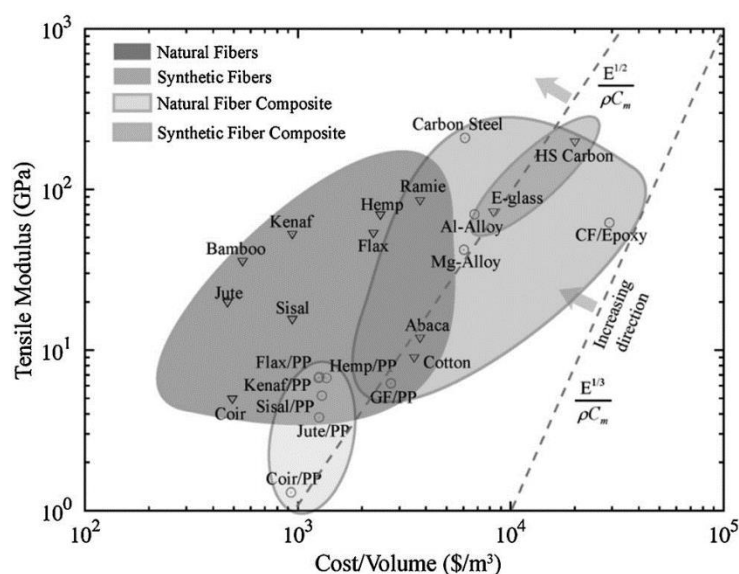
Cena konstrukčních materiálů pro kompozitní díly se stále zvyšuje. V některých případech může cena dosahovat 60–70 % z celkových nákladů výroby. Nesporným faktorem v tomto ohledu hraje klíčovou roli cena. Současná cena surově zpracovaného skelného vlákna o hustotě $2,6 \text{ g/cm}^3$, se pohybuje v rozmezí 1,30\$ až 2,00\$/kg.

Pokud bychom cenu porovnali s lnem o hustotě $1,5 \text{ g/cm}^3$, jeho ceny se pohybují v rozmezí 0,22\$ až 1,10\$/kg. Některé zdroje uvádí, že v oblastech jako je automobilový průmysl, by se měla v nadcházejících letech zvýšit poptávka po přírodních materiálech až o 60 % [16]. Na grafu č. 1 je možné porovnat cenové rozpětí výztuží, ze kterých je znatelný cenový rozdíl, který zvýhodňuje přírodní vlákna. Rozdílné ceny přírodních vláken mohou být zapříčiněny rozdílnými způsoby zpracování i oblasti pěstby či produkce.



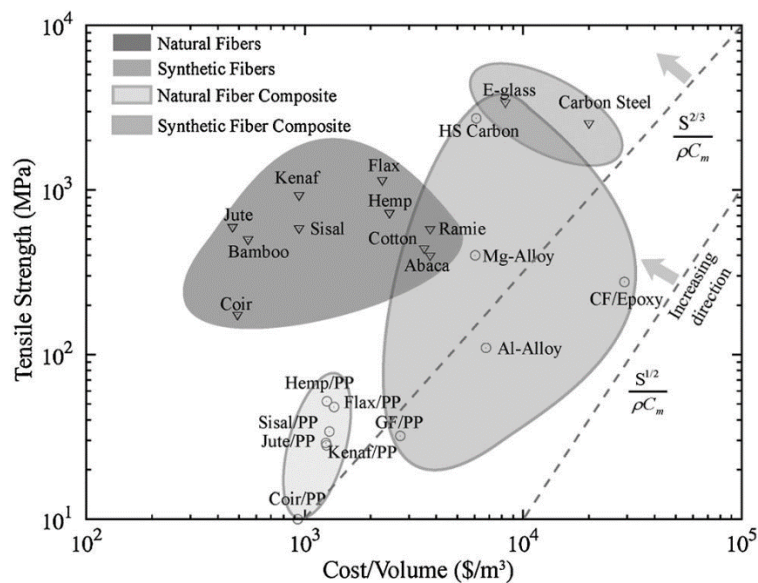
Graf 1: Srovnání cen za 1 kg vlákna. Pozn: hemp (konopí), flax (len), cotton (bavlna), coir (kokos) [29]

Zajímavého srovnání můžeme dosáhnout porovnáním závislosti modulu pružnosti v tahu nebo pevnosti v tahu na ceně za objem výztuže. Na grafu č. 2 můžeme vidět, že nejvíce se svými hodnotami modulu pružnosti skelného vlákna přibližuje lněné (flax) a konopné (hemp) vlákno. Jejich cena je ovšem oproti skelnému vláknu nižší.



Graf 2: Závislost modulu pružnosti na ceně za 1 m³ materiálu [30]

Výrazných rozdílů hodnot závislosti pevnosti v tahu na ceně za objem materiálu si můžeme všimnout na grafu č. 3. V kategorii syntetických vláken pro kompozitní materiály (Synthetic Fiber Composite) jasně dominuje karbonové vlákno v kombinaci s epoxidovou matricí. Můžeme také vidět velký rozdíl v hodnotách mezi porovnávaným lnem (flax), konopím (hemp) a skelným vláknem (E-glass) [30].



Graf 3: Závislost pevnosti v tahu na ceně za 1 m³ materiálu [30]

Očekává se, že současný objem produkce, který zastrešují američtí a evropští producenti, nebude v nadcházejících letech dostačovat. V takové situaci lze očekávat vstup nových producentů na trh v podobě Indie nebo Asijských zemí. To by mohlo mít za následek možnou cenovou „konkurence neschopnost“ současných producentů. Negativním finančním faktorem přírodních vláken jsou některé technologické procesy, které výslednou cenu vlákna, použitelného pro kompozitní materiály, zvyšují. Typickým technologickým mezikrokem je povrchová úprava vláken [17]. Odborná literatura se velmi často rozchází ve fyzikálních a mechanických vlastnostech přírodních vláken. Obecně nejlepší mechanické vlastnosti v porovnání s cenou vykazují vlákna získaná ze stonků rostlin. Mezi ty patří například len, konopí nebo sisal [56].

3.3 Ekologické hledisko přírodních vláken

Problematická recyklace produktů ze současných kompozitních materiálů je jedním z hlavních důvodů hledání nových druhů výztuží v přírodních materiálech. Na rozdíl od anorganických vláken jako jsou skelná, vykazují přírodní vlákna nízké hodnoty koeficientu energie potřebné k výrobě jednoho kilogramu surového vlákna pro výrobu – MJ/kg.

Z tabulky č. 2 je patrné, že procesy jako tavení nebo samotná produkce skelného vlákna znamenají vysokou energetickou náročnost na výrobu.

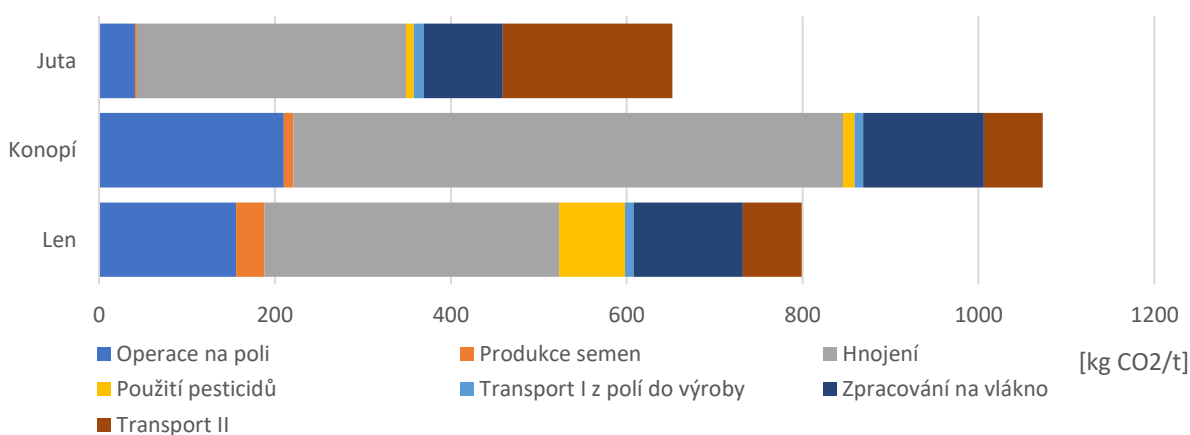
Skelné vlákno		Lněné vlákno	
Název operace	[MJ/kg]	Název operace	[MJ/kg]
Surový materiál	1,7	Produkce sazenic	0,05
Výroba směsi	1	Hnojení	1
Transport	1,6	Transport	0,9
Drcení	21,5	Pěstování	2
Navíjení	5,9	Separace vlákna	2,7
Produkce příze	23	Produkce příze	2,9
CELKEM:	54,7	CELKEM:	9,55

Tabulka 2: Srovnání hodnot energetické náročnosti skelného a lněného vlákna [16]

Výhodou přírodních vláken je jejich nízká produkce skleníkových plynů v průběhu výroby. V nadcházejícím grafu č. 4 můžete porovnat emisivitu vybraných přírodních vláken v jednotlivých fázích produkce. Z grafu je jasné, že procesy hnojení (počítaje i produkci hnojiv) zaujímají největší množství produkovaných emisí CO₂. Nejnižších hodnot CO₂ dosahuje produkce jutových vláken (766 kg CO₂/t). Nejvyšších hodnot dosahují vlákna konopná (835 kg CO₂/t). Ta je spojena především s výrazně vysokým nárokem na hnojení v průběhu pěstování a komplikovanější práce v průběhu sklizně. Středních hodnot dosahují lněná vlákna (798 kg CO₂/t).

Oproti konopným vláknům lněná vlákna dosahují vyšších mechanických vlastností [50]. I přes poměrně vysoké hodnoty se jedná o třetinové množství v porovnání s produkcí skelného vlákna. Výsledná hodnota emisí CO₂ produkce anorganického vlákna se odvíjí od druhu a typu. Literatura tuto hodnotu uvádí v rozmezí 1,7 – 2,2 tuny CO₂ na tunu vyprodukovaného skelného vlákna [50].

Kromě nízké emisivity v průběhu pěstování a zpracování vláken do formy výztuží, jsou přírodní vlákna zajímavá z pohledu jejich schopnosti vázat CO₂ z atmosféry, což je vlastnost, kterou syntetická vlákna nedisponují. Příroda je součástí globálního cyklu uhlíku především díky své schopnosti absorbovat CO₂ z atmosféry, ukládat ho ve své biomase nebo půdě [55]. Vědecká literatura zmiňuje, že konopí nebo len mají schopnost v průběhu pěstby vázat až 0,67 tuny CO₂ na jeden hektar za jeden rok. Studie Muhammada Pervaize udává, že v případě nahrazení 30 % sklolaminátové produkce přírodním vláknem by mohlo znamenat redukci oxidu uhličitého až o 3.07 miliónů tun (4.3 % celkové průmyslové produkce CO₂) [54].



Graf 4: Produkce emisí CO₂ na tunu přírodního vlákna [50]

3.4 Problematické vlastnosti přírodních vláken

I přes fakt, že se přírodní vlákna mohou zdát kvalitní a v mnoha ohledech plnohodnotnou náhradou některých syntetických vláken pro kompozitní díly, narážíme u těchto vlákních na několik zásadních oblastí problémů. V této kapitole se proto zaměřím na hlavní z nich: absorpce vlhkosti, tepelná odolnost a variabilita vlastností.

3.4.1 Absorpce vlhkosti

Absorpce vlhkosti patří mezi nejvýznamnější nevýhody přírodních vláken. Vlákna mají tendenci absorbovat vzdušnou vlhkost. V důsledku absorpce dochází k bobtnání vláken. Tento jev komplikuje jednak způsob transportu, uskladnění a zpracování do podoby kompozitního dílu,

ale především narušuje vazby mezi výztuží a matricí. Některé literatury uvádí, že v důsledku nabobtnání vláken sisalu docházelo u testovaných vzorků ke snížení mechanických vlastností až o 30 % [29].

3.4.2 Tepelná odolnost

Další z negativních vlastností přírodních vláken je nízká tepelná odolnost a vysoká hořlavost. Tato vlastnost může být problematická v oblastech, kde je kladen vysoký nárok na nehořlavost a požární bezpečnost. Typickými oblastmi je automobilový průmysl a dopravní sektor. K rozkladu celulózy dochází v teplotním rozpětí 250-300 °C.

Vlákná s větším obsahem celulózy vykazují všeobecně vyšší hořlavost. Matrice přírodních vláken – lignin se rozkládá při teplotách kolem 160 °C a jeho spalováním vznikají uhelnaté zbytky [34]. Na nízkou tepelnou odolnost vláken lze nahlížet také jako výhodu, a to především v oblasti možnosti recyklace v kombinaci s termoplastickými matricemi.

3.4.3 Variabilita vlastností

Třetí negativní oblastí přírodních vláken je jejich různorodost. To výrazně ovlivňuje možnosti jejich aplikace jak v designu, tak v konstrukci a možnosti ověřování a standardizace kompozitních výrobků. Z důvodu širokého rozptylu fyzikálních a mechanických vlastností je možné materiály používat pouze v nekonstrukčních prvcích, pohledových vrstvách nebo sekundárních méně namáhaných dílech. Ve srovnání s anorganickými vlákny, která lze vyrábět podle standardizovaných postupů a podmínek, organická vlákna mají mnoho stupňů procesů, které jsou ovlivněny nejen lidskou činností, ale také klimatickými podmínkami, které jsou proměnlivé [30]. I přes tuto negativní vlastnost lze dohledat vědecké práce, které se zabývají srovnáním mechanických vlastností v sériově vyráběných dílech. Tyto práce interpretují data, která dokazují, že přírodní vlákna mohou být konkurenci schopna standardním skelným vláknům [58].

3.5 MATRICE

Jednou z hlavních úloh matrice je zajištění ucelenosti kompozitu. Má za úkol vytvoření spojení mezi nosnou částí a vnějším tvarem produktu. Úlohou matrice je vytvoření celistvého spojení mezi vlákny, zprostředkování zatížení vláken v místech vnějšího zatížení, v místech přerušení vláken, vytváří vnější funkční povrch a estetický vzhled tělesa. Obecně mezi nejdůležitější mechanické vlastnosti matric patří dobrá adheze k výztuži (vláknem) a mezní tažnost [11]. Matrice se mohou lišit nejen svými mechanickými vlastnostmi po vytvrzení, ale také vlastnostmi před jejich zpracováním, jako jsou viskozita, teplota zpracování nebo barva. V odvětví kompozitních materiálů se nejčastěji setkáme s organickými polymerními matricemi – reaktoplasty a termoplasty. Mezi další materiálové varianty matric patří kov nebo keramika [6].

3.5.1 Termoplasty

Běžný člověk se s termoplasty setkává mnohem častěji než s reaktoplasty. Termoplastické materiály jsou dnes nedílnou součástí každodenního života. Najdeme je jak v dopravních prostředcích, tak především v podobě obalů nebo nástrojů. Termoplasty jsou tuhé látky, které při překročení kritické teploty měknou a tečou. Po ochlazení se tyto látky vrací do pevného skupenství. Nejběžněji používanými látkami jsou polypropylen a polyamid. Nejběžnějším plnivem termoplastů jsou částicové materiály. Příměsí vláken (v rozmezí 20 až 50 % celkového objemu) lze modifikovat a zlepšit mechanické vlastnosti, otěruvzdornost či tvarovou stálost za zvýšené teploty. Tyto materiály bývají ve většině případech součástí výchozí suroviny pro zpracování a jsou společně s termoplastickou matricí vstřikovány do lisovacích forem nebo extruderu [6].

Oproti reaktoplastickým pryskyřicím ovšem neztrácí své chemické vlastnosti a mohou být opětovným zvýšením teploty změkčeny a tvarovány do původní podoby. Jedním z možných dělení termoplastů je podle typu délky výztužného vlákna. Termoplasty vyztužené krátkým vláknem (délka 0,6 až 1 mm) a vyztužené dlouhým vláknem (2 až 6 mm) jindy také označované jako LFT (Long Fiber Thermoplast). Oba typy termoplastů jsou většinou dodávány v podobě granulátu. Zpracovávání těchto materiálů probíhá ve většině případech injekčním vstřikováním do uzavřených forem za vysoké teploty [18]. Dalším způsobem je možnost vyztužení termoplastu rohoží nebo tkaninou z vláken a dosažení lepších mechanických vlastností. V posledních letech dostává prostor termoplast v podobě pre-preg systémů.

Jedná se o tkaniny především z uhlíkových vláken, do kterých jsou vlisovány termoplastické fólie. Po zahřátí fólie změkne a zaplní prostor mezi vlákny. Ochlazením opět přejde do pevného stavu a vytvoří tak pevný kompozitní díl [48].

3.5.2 Reaktoplasty

Hlavní charakteristikou reaktoplastů, označovaných také v minulosti jako termosety, je jejich tvarová stálost (tuhá fáze) během zahřátí. K vytvrzování termosetů je obecně zapotřebí druhé složky – tvrdidla, urychlovače, katalyzátoru, iniciátoru nebo také zvýšené teploty. Směs v průběhu vytvrzovacího procesu vytváří tuhou polymerní prostorovou síť (zesíťování) [46]. Jsou nejběžněji používaný druh matrice pro vláknité kompozitní materiály. V praxi se můžeme setkat se třemi hlavními zástupci – polyestery, vinylestery a epoxidy.

Na rozdíl od termoplastů jsou reaktoplastické matrice před zpracováním za pokojových teplot v tekutém stavu. Velmi důležitým faktorem kvality matrice je její uskladnění v ideálních podmínkách. Materiál je citlivý na velmi nízké nebo naopak velmi vysoké teploty. Tento druh matrice se vyznačuje vysokou mechanickou pevností, jsou ovšem křehké a mají nízkou tažnost [6,19].

3.5.2.1 Vinylestery a nenasycené polyesterové pryskyřice

Polyesterové pryskyřice nejběžněji dělíme podle chemického složení na ortoftalické, izoftalické a tereftalové. Mezi sebou se odlišují především mechanickými a tepelnými vlastnostmi nebo jejich chemickou odolností. Ortoftalické pryskyřice patří mezi nejkvalitnější a mechanicky nejlépe odolné polyestery,

zatím co tereftalové pryskyřice jsou na opačné straně stupnice. Síťování polymerních částic zde zajišťuje styren, který je také jedním z hlavních negativ těchto pryskyřic. Pro urychlení zasíťování pryskyřic se používají nejčastěji peroxidy. Pryskyřice často bývají obohaceny o barevné pigmenty a přísady pro zlepšení odolnosti proti UV záření. Tyto pryskyřice jsou většinou použity ve vrchních vrstvách kompozitních dílů. Takové látky označujeme jako gelcoaty. Tepelná odolnost polyesterů nepřekračuje hodnotu 160 °C.

Mezi hlavní výhody polyesterových pryskyřic řadíme nízké výrobní náklady a krátkou dobu síťování v řádech několika desítek minut [18]. Mezi hlavní nevýhody polyesterů zahrnujeme nižší mechanické vlastnosti (Tabulka 3), krátkou dobu uskladnění v surovém stavu a přítomnost styrenu který je ze zdravotního hlediska pro lidský organismus škodlivý [20].

3.5.2.2 Epoxidové pryskyřice

Nejběžnější epoxidové pryskyřice jsou na bázi bisfenolu typu A nebo bisfenolu typu F. Oproti polyesterovým pryskyřicím, epoxidy dosahují výrazně lepších mechanických vlastností (Tabulka 3). Na rozdíl od polyesterových pryskyřic mohou se správným tvrdidlem dosáhnout lepší tepelné odolnosti, a to až na hranici 180 °C [18]. Finální pryskyřice jsou továrně modifikovány pro daný způsob aplikace. Stejně jako u polyesterových pryskyřic lze modifikovat jejich tepelnou odolnost, viskozitu nebo jiné charakteristiky. Teplotní odolnost pryskyřic je určována hodnotou teploty skelného přechodu. Jedná se o teplotu, do které zůstává kompozit ve skelném stavu (makromolekuly jsou pevné, polymerní síť nemění svoji podobu). Do meze této teploty si kompozitní díl zachovává svoje mechanické vlastnosti. Po překročení této teploty nevratně ztrácí své vlastnosti.

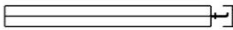


	Matrice	Pevnost v tahu (MPa)	Youngův modul (GPa)	Mezní tažnost (%)	Hustota (g/cm ³)
Reaktoplast	Polyestery	45-85	1,3-4,5	1-5	1,1-1,5
	Epoxidy	35-90	2,1-6,0	1-10	1,1-1,4
	Fenolické pryskyřice	50-60	4,4	1-3	1,3
Termoplast	Polypropylen	28-41	1,1-1,5	10-700	0,9
	Polyamid	76-83	2,4-2,8	60-300	1,42
	Polykarbonát	62-76	2,1-2,8	110-130	1,31
	Polyether	70	3,8	50-130	1,31

Tabulka 3: Mechanické vlastnosti vybraných matic [11]

Na trhu se velmi často můžeme setkat s epoxidovými systémy, které jsou zpracovávány za zvýšené teploty. Jedná se kombinace pryskyřic a tvrdidel, která mají za cíl zrychlit a zpřesnit proces síťování a zkrátit tak dobu výroby. Epoxidy se vyznačují dlouhou životností a velmi dobrými mechanickými vlastnostmi. Mezi jejich nevýhody můžeme zařadit vyšší cenu a výrazně delší proces vytvrzování v řádu až desítek hodin [46].

3.6 SENDVIČOVÉ KONSTRUKCE

Smyslem jádra je přenášení smykového zatížení mezi jednotlivými plášti, které tvoří sendvičovou konstrukci a zvýšení tuhosti výrobku. Nejčastěji používaná jádra do těchto konstrukcí jsou tuhé pěny (na bázi polyuretanu, polystyrénu a PVC), voštiny z tenkého hliníkového plechu, plastu, aramidu prosyceného epoxidovou pryskyřicí, papíru prosyceného polyesterovou/fenolickou pryskyřicí nebo balsa. Sendvičové jádro má za úkol zajistit dostatečnou tvrdost a tuhost výrobku, dále také nahradit svojí tloušťkou těžké vrstvy laminátu, které nejen že zvyšují váhu celého výrobku, ale také ho značně prodraží [18]. Na obrázku č. 11 lze porovnat výhody sendvičové struktury s klasickým kontaktním laminátem.

	Kontaktní laminát	Sendvičová konstrukce	Sendvičová konstrukce
			
Relativní tuhost	1	7	37
Relativní pevnost	1	3,5	9,25
Relativní hmotnost	1	1,03	1,06

Obrázek 11: Porovnání mechanických vlastností sendvičové struktury v závislosti na tloušťce jádra [44]

3.6.1 Materiálové varianty jádra

V současnosti se můžeme na trhu s materiály pro kompozitní konstrukce setkat se širokým portfoliem sendvičových struktur. Ke správné volbě materiálu je proto nutné dostatečně pečlivě analyzovat faktory. Mezi tyto faktory patří především obor použití konstrukce, požadované mechanické vlastnosti, ekonomické hledisko projektu, hustota, technologie zpracování nebo

také úroveň vzdělání a proškolení pracovníků. Mezi nejběžněji používaná sendvičová jádra z nekovových materiálů se řadí balsa, tuhé pěny z PUR nebo PVC, aramidové voštiny, skelné 3D tkaniny nebo plastové voštiny. Z kovových materiálů si svoji oblibu stále častěji získávají hliníkové voštiny, které mohou být levnější alternativou aramidovým, ovšem ale na úkor hmotnosti.

Sendvičová jádra nemusí být vnímána pouze jako plochý materiál. Podle tvarové podoby výrobku lze zvolit vhodné jádro. Příkladem může být uveden oválný díl z kompozitu. Hexagonální voština ať už z aramidu nebo hliníku se bude velmi složitě tvarovat. Tuhou pěnu bude ovšem možné za zvýšené teploty vytvarovat bez komplikací [23]. V následující části se zaměřím především na tři nejběžněji používaná jádra – balsa, tuhé pěny a voštiny.

3.6.1.1 Balsa

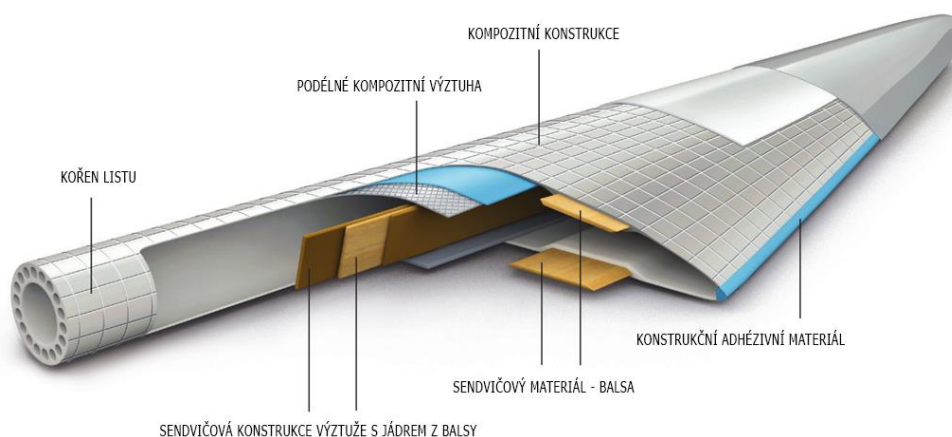
Balsa je přírodní produkt s nízkou hustotou v rozmezí 96-288 kg/m³. Ze všech sendvičových materiálů patří balsa mezi ty s nejvyšší hustotou konstrukčního jádra [21]. Tato dřevina se vyskytuje především v tropických oblastech. Ideální pěstební podmínky nabízí díky svému klimatu a ideální geografii Ekvádor. Kromě nízké hustoty je balsa vyhledávanou dřevinou pro svoji rychlost pěstby. Již šest měsíců od nasazení má kmen průměr 4 centimetry a výška stromu může být v rozmezí 3 až 4 metrů. Nej kvalitnější dřevo má dřevina mezi 5 a 7 rokem po nasazení. V tomto období může strom dosahovat výšky 20 až 30 metrů a kmen v průměru až 45 centimetrů [41].

Mezi další výhody jádra patří dobré izolační schopnosti a nízká energetická náročnost pro zpracování materiálu do podoby pro aplikaci v kompozitních výrobcích. Dospělé stromy jsou pokáceny, kulatina je naformátována do podoby hranolů, dýhy nebo lamel. Řezivo následně prochází procesem sušení. Balsové řezivo je dále roztríděno podle kvality, mechanických vlastností nebo hmotnosti a jsou lepeny do velkých bloků. Tyto bloky jsou následně formátovány na velkoplošné panely, které představují koncový produkt jako je například Baltek od společnosti 3A Composites (Obrázek 12) [41].



Obrázek 12: Balsa [43]

Stejně jako v jiných odvětvích stavebního řeziva i balsa podléhá certifikaci FSC®. Největším producentem jádra pro sendvičové konstrukce kompozitů je společnost 3A Composites, která tyto produkty vyrábí pod značkami Airex (pěnová jádra), Baltek (balsová jádra) a Banova (balsové překližované materiály). Lesnické a těžařské závody Plantabal S.A. a 3A Composites PNG Ltd., vlastněné zmíněnou společností 3A Composites, spravují několik stovek hektarů certifikovaných plantáží balsy v Ekvádoru (FSC – C019065) a na Nové Guineji (FSC – C125018) [42]. Mezi další oblasti pěstování této dřeviny patří oblasti jižní Ameriky (jih Mexika nebo Brazílie, Kuba či Trinidad. Mezi další oblasti můžeme zařadit Indonésii nebo Indii, kde byla dřevina uměle vysazena. Balsa nalézá díky svým vlastnostem uplatnění v oblastech výroby lodí, obnovitelných zdrojů v podobě jádra konstrukce listů větrných turbín (Obrázek 13) nebo letectví a architektuře [41].



Obrázek 13: Schéma využití balsy v konstrukčním řešení listu větrné turbíny [28]

3.6.1.2 Tuhé pěny

Tuhé pěny (Obrázek 14) patří v současnosti mezi nejrozšířenější materiál pro sendvičové konstrukce [41]. Jejich využití nalezneme především v dopravním sektoru, především v železniční dopravě, letectví nebo lodním průmyslu. K výrobě pěnových bloků, které jsou následně řezány na požadované tloušťky, jsou použity různé druhy polymerů. Nejběžnějšími polymery pro výrobu jsou PVC (polyvinylchlorid), PUR (polyuretan), PMI (polymetakrylid), PX (polystyren) nebo PP (polypropylen). Pěny jsou vyráběny v různých hustotách od 30 do 300 kg/m³ pro individuální řešení potřeb zákazníků.



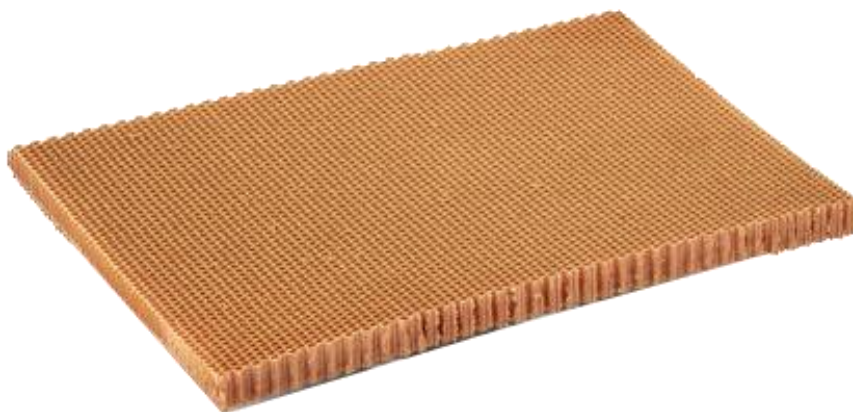
Obrázek 14: Tuhá pěna značky Airex [43]

Se zvyšující se hustotou se zvyšují mechanické vlastnosti. Mezi jejich výhody patří široká paleta rozměrů a hustot, tvarovatelnost ve 2D a 3D (za zvýšené teploty) a snadná obrobiteľnosť [22]. Tuhé pěny patří mezi nejčastěji používaný materiál pro výrobu prefabrikovaných kompozitních sendvičových panelů jako jsou například panely značky DuFLEX. Podle požadavků zákazníka a způsobu výroby lze dodávat tuhé pěny v surovém stavu nebo také opracovaném – předem vyfrézovaná místa, nařezané a podlepené panely pro lepší tvarování v negativních formách nebo s povrchovou úpravou [49].

3.6.1.3 Voštiny

Jedná se o sendvičové materiály, tvořené stěnovými dutinami ve tvaru mnohoúhelníků, připomínajících svým tvarem včelí plástve. Nejběžnějším tvarem dutin bývá hexagonální tvar (šestiúhelník). Podle způsobu namáhání můžeme ovšem narazit na různé pravidelné i nepravidelně tvarované dutiny, ty jsou voleny podle způsobu namáhání nebo technologie zpracování v kompozitních dílech. Voštiny se vyrábí z různých druhů materiálů podle způsobu použití a mechanických nároků na výrobek. Nejčastěji jsou vyráběny z lepenkového papíru, slitin hliníku nebo oceli, aramidu (Nomex®, Aramid®), skelné/uhlíkové vlákno v kombinaci s matricí nebo plastu. Díky materiálové různorodosti lze vybírat z širokého portfolia hustoty v rozmezí 16–880 kg/m³ [21]. Při srovnatelné hustotě voštiny vykazují lepší mechanické vlastnosti než tuhé pěnové materiály. Dalším z faktorů, ovlivňujících mechanické vlastnosti voštiny je tloušťka stěny buňky/dutiny. Rozsah použití a také mechanických vlastností je široký.

Voštiny z lepenkového papíru mají nízkou tuhost a pevnost, využívají se proto jako výplně interiérových dveří, naopak plástve z aramidu (Nomex®, Aramid®) nalezneme v oblastech s maximálním požadavkem na pevnost (Obrázek 15) [23]. Voštiny ze slitin hliníku a oceli jsou voleny v oblastech, kde je kladen vysoký nárok na mechanické vlastnosti, ale zároveň požadavek na snížení výrobních nákladů. Jsou proto v mnoha případech voleny jako alternativa k Nomex® nebo Aramid® plástvím.



Obrázek 15: Voština značky Nomex® [43]

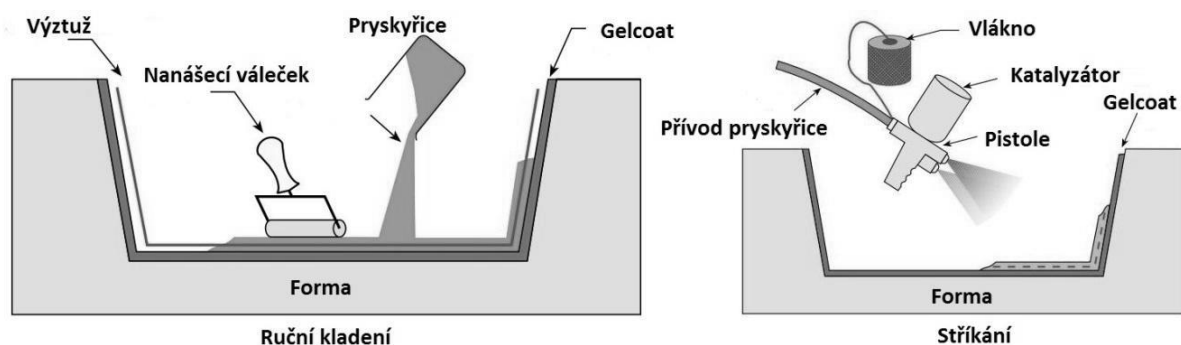
3.7 TECHNOLOGIE VÝROBY KOMPOZITNÍCH DÍLŮ

V současné době se můžeme setkat s mnoha technologickými postupy výroby kompozitních dílů. Je to dáno nejen odlišností typů a druhů vláken nebo matric, ale také poptávkou po stále více efektivnější a optimalizované výrobě pro specifický výrobek. Při volbě technologie výroby tak hraje velkou roli charakter výrobku, požadované mechanické vlastnosti, požadovaný počet vyrobených kusů, velikost série nebo zvolený materiál pro výrobu. V diplomové práci se zaměřím především na technologie, které patří mezi základní způsoby výroby z termosetových matric a které jsou svým charakterem podobné způsobu výroby v experimentální části této diplomové práce.

3.7.1 Ruční kladení

Technologie ručního kladení prosycené tkaniny nebo stříkání matrice (Obrázek 16) na připravenou výztuž patří mezi nejstarší technologie výroby kompozitních dílů a zahrnujeme je do kategorie mokrého procesu výroby. Proces spočívá ve vkládání předem nastříhaných tkaninách do formy nebo kopyta. Následuje roztírání pryskyřice přes váleček nebo štětec po celém povrchu tkaniny tak, aby byla tkanina stoprocentně prosycena. Na kompozit se může také přiložit speciální netkaná textilie – strhávací tkanina, která oddělí přebytečnou pryskyřici od dílu.

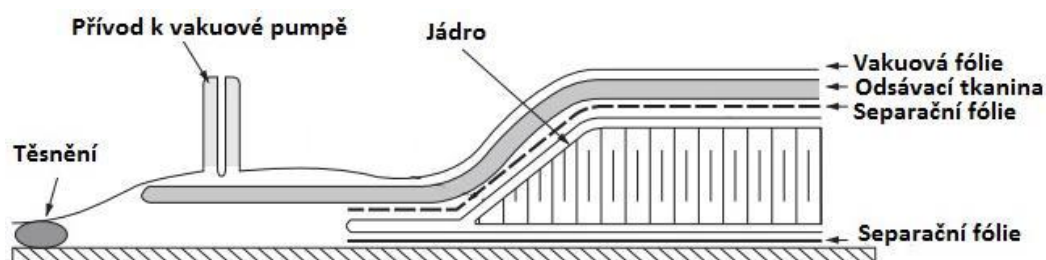
S touto technologií výroby se setkáváme i v současnosti. Pro výrobu laminátu v řádech několika kusů patří stále mezi nejefektivnější. Výrobní způsob se využívá během výroby dílů s nižším požadavkem na mechanické vlastnosti, větších rozměrů nebo v oblasti amatérské stavby lodí a ultralehkých letadel. Technologie je charakteristická svojí flexibilitou, fyzickou náročností a nutnou zkušeností pracovníků ve výrobě [24].



Obrázek 16: Schéma technologie ručního kladení a stříkání [25]

3.7.2 Vakuování/podtlakové lisování

Technologie vakuování (Obrázek 17) spočívá v podtlakovém lisování předem prosycených vrstev tkanin. Forma spolu s prosycenou tkaninou je opatřena separační netkanou textilií a nasávací rohoží, do které unikne během lisování přebytečná pryskyřice. Celá forma je následně zabalena do fólie a za pomoci vývěvy je vysán vzduch. Během vakuování se standardně pracuje s podtlakem do 1 bar. Výsledný laminátový díl má lepší váhový poměr mezi pryskyřicí a tkaninou oproti standardnímu ručnímu kladení. Zároveň výrobek dosahuje lepších mechanických vlastností díky optimalizovanému poměru hmotnosti tkaniny a hmotnosti pryskyřice.

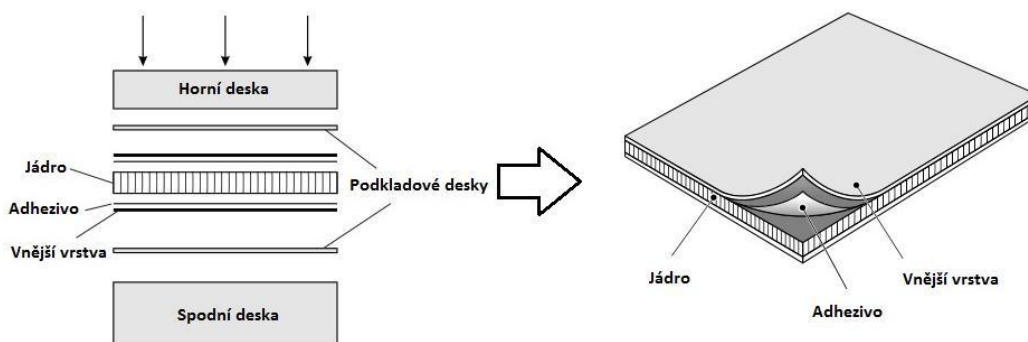


Obrázek 17: Schéma technologie vakuování/podtlakového lisování [26]

Při výrobě formou vakuování je vhodné používat pryskyřice s nižší viskozitou, aby mohla matrice v průběhu vakuování lépe prosycovat tkaniny a případně se prosákla do odsávací rohože. Vakuování lze doplnit o vytvrzování za zvýšené teploty. Cílem je dosažení vyšších mechanických vlastností, které jsou dosaženy specifickými pryskyřicemi, které v průběhu síťování potřebují zvýšenou teplotu. Další možností využití technologie podtlaku je vstřikování (infuze) pryskyřice do formy. Tato technologie spočívá v uložení suchých, neprosycených výztuží do formy. Dále opatření pomocného materiálu v podobě separačních tkanin a speciálních tkanin, které slouží jako rozvodná síť matrice po povrchu dílu a rozvodnými hadicemi. Na závěr je forma uzavřena do nepropustné fólie. Z uzavřeného prostoru je nejprve odsán vzduch a vytvořeno vakuum. Následně se do formy díky podtlaku vpustí pryskyřice, která prosycuje suché tkaniny přes rozvodnou síť hadiček a sítě [6].

3.7.3 Lisování za zvýšeného tepla a tlaku

Výroba dílů pomocí lisování za zvýšené teploty a tlaku se provádí za pomoci dvou a více forem. Při výrobě je zapotřebí speciálních vyhřívaných forem vnitřního i vnějšího tvaru. Nejběžněji se formy vyrábí z kovových materiálů z důvodu efektivního přenosu tepla. Formy mohou být vyhřívány elektricky nebo topným médiem. Formy jsou upevněny do hydraulického lisu, který dokáže vyvinout tlaky 10-300 kg/cm². Nejběžněji používaným materiálem pro tuto technologii jsou prepregy – lisovací rohože (předem prosycené tkaniny polyesterovou, vinylesterovou nebo epoxidovou matricí), lisovací těsta nebo premixy (speciální lisovací směsi). Materiál během zvýšené teploty ve formě změkne, vyplní dutiny prostoru mezi formami a dalším působením tepla nastane vytvrzení [18].

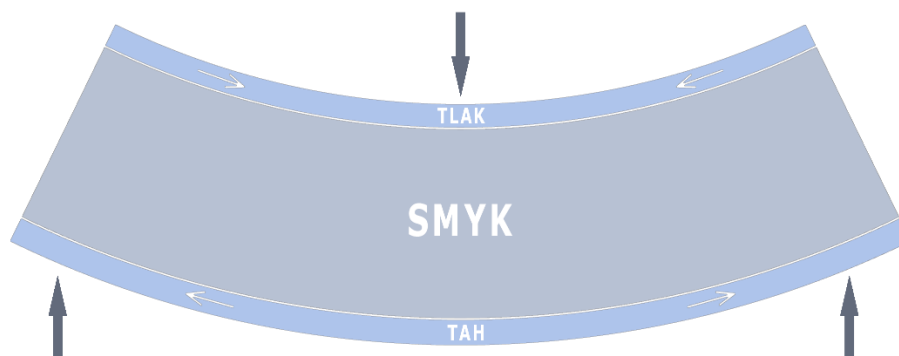


Obrázek 18: Schéma technologie lisování za zvýšené teploty [27]

Tato technologie patří mezi nejefektivnější způsoby velkosériové výroby menších a středně velkých dílů. Tento výrobní způsob nalezneme například u produktů, kde je kladen maximální požadavek na vysoké mechanické vlastnosti a standardizaci výrobků. S technologií se setkáme také ve výrobě plošných sendvičových kompozitních panelů. S těmito panely se můžeme setkat především v dopravním sektoru jako konstrukční nebo plášťový materiál pro plavidla nebo kolejová vozidla. Tyto panely bývají nejčastěji opláštěny skelnou tkaninou předem zvolené gramáže a jsou před lisováním prosyceny epoxidovou pryskyřicí [49]. Mezi hlavní výhody patří krátká doba výrobního cyklu způsobena zvýšenou teplotou, rovnoměrný hmotnostní poměr matrice a tkaniny, automatizace výroby a standardizace dodávaných výrobků. Mezi nevýhody patří vysoká finanční náročnost, která je výhodná pouze pro tisícové série [6].

3.7.4 Mechanické vlastnosti a druhy porušení sendvičových struktur

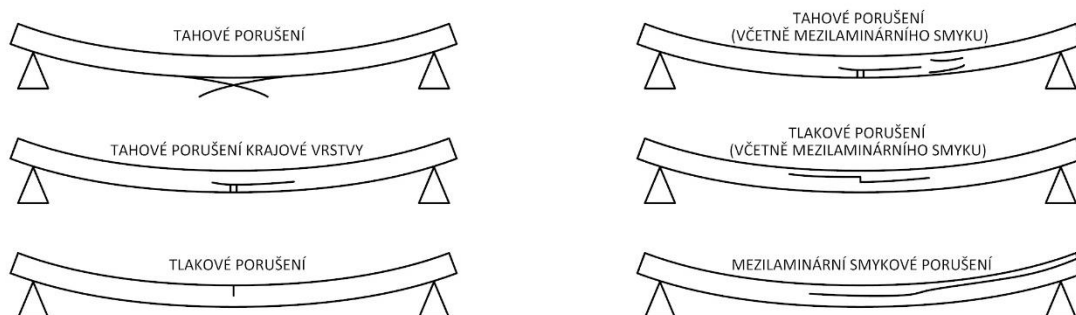
Jedním ze základních znaků sendvičových struktur je přenos tahového a tlakového zatížení potahů a smykového zatížení, které vzniká mezi potahy. Jak již bylo uvedeno, poslední ze zmíněných znaků má na starosti jádro konstrukce (Obrázek 19) [23].



Obrázek 19: Rozložení napětí v sendvičové struktuře [23]

Důležitými faktory pevnosti v tlaku ve směru hloubky konstrukce jsou pevnost jádra v tlaku, tloušťka a tuhost vnějších vrstev [23]. Velký vliv na přenos smykového napětí mezi vrstvami a jádrem má adhezivní vrstva. Obecným pravidlem bývá, že tato vrstva má být schopna přenášet stejně vysoké smykové napětí jako jádro [11].

V případě, že není adhezivní vrstva schopná přenést stejné smykové napětí, dochází k porušení této vrstvy a možnému lokálnímu nebo plošnému porušení vrstvy – delaminace. Porušení konstrukce nastává ve vnějších vrstvách nebo v jádru. Na obrázku č. 20 jsou prezentovány možné poruchy struktur.



Obrázek 20: poruchy sendvičových struktur [52]

4 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Na základě nabitých informací a dat o přírodních vláknech a kompozitních dat jsem se rozhodl pro návrh vlastní sendvičové konstrukce, která bude využívat přírodních materiálů v kombinaci s reaktoplastickou i termoplastickou matricí. První referenční skupinou je skupina vyrobená z překližované desky balsy bez vnějšího opláštění. Skupiny LB a LC jsou vyrobeny z přírodního vlákna v kombinaci s reaktoplastickými pryskyřicemi společnosti Entropy Resins. Skupina LE je kombinací přírodního vlákna a termoplastické pryskyřice společnosti Arkema. Skupiny SC a SE jsou opatřeny povrchovou úpravou ze skelné výztuže a reaktoplastické (SC) nebo termoplastické (SE) pryskyřice. Ve všech skupinách byla použita totožná tloušťka jádra.

Celkem bylo vyrobeno 6 skupin testovaných těles, každá o 15ti tělesech (Tabulka 4) a rozměru 50x290x12 mm. Pro měření vlhkosti a hustoty těles při vzdušné vlhkosti 50 % byly vyrobeny vzorky o rozměrech 50x50x12 mm. Každá skupina obsahuje 6 vzorků pro měření.

Číslo skupiny	Název skupiny	Vlákno	Jádro	Matrice	Počet těles	Počet těles pro měření hustoty
1	Balsa	-	Balsa	-	15	6
2	LB	Len	Balsa	BIO ONE	15	6
3	LC	Len	Balsa	SAP CLR	15	6
4	LE	Len	Balsa	Elium 188	15	6
5	SC	Sklo	Balsa	SAP CLR	15	6
6	SE	Sklo	Balsa	Elium 188	15	6

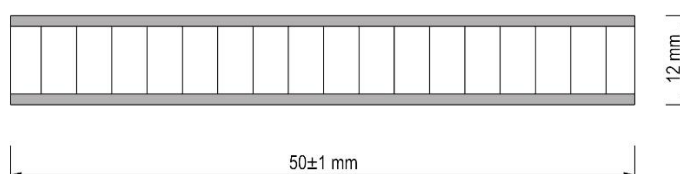
Tabulka 4: Testované skupiny se základním popisem materiálů

4.1 Popis použitých materiálů

4.1.1 Vnější vrstva

Pro výrobu vnějších vrstev sendvičové konstrukce z přírodních materiálů byla použita vlákna Inu. Len v podobě tkaných textilií pro kompozitní materiály vyrábí v současné době omezené množství výrobců. Na základě zhodnocení požadavků na gramáž či kvalitu tkaniny, byla zvolena tkanina od výrobce Evolution Composites – BioTex 400 g/m² ve vazbě kepr.

Pro možnost porovnání mechanických vlastností lnu se standardními vlákny byla vybrána skelná vlákna pro dvě skupiny. Aby bylo dosaženo co největší váhové shody mezi výztužemi, velikosti vláken a vazby, byla použita rovingová tkanina o gramáži 390 g/m² ve vazbě plátka. Hlavním důvodem výběru byla omezená nabídka vyšších gramáží skelné tkaniny ve vazbách kepr nebo plátka. Standardně se tyto tkaniny vyrábí do gramáží kolem 300 g/m². Alternativou mohly být netkaná multiaxiální plátka, ty ovšem svým charakterem jsou již vzdálena od podoby vazby produktu BioTex. Vlákna tvoří vnější vrstvu sendvičové konstrukce (Obrázek 21).



Obrázek 21: Průřez skladbou testované sendvičové konstrukce

4.1.2 Jádno

Materiálem pro konstrukci jádra byla výchozí surovinou balsa. Ta byla dodána v podobě dýhy o tloušťce 4 mm a rozměrech 100x1000 mm. Soubor byl zpracován do podoby třívrstvé lepené překližované desky o celkové tloušťce 12±0,1 mm. Přebroušením překližované desky na širokopásově automatické brusce SCM Sandya 300 byl rozměr upraven na 11±0,2 mm. Broušení bylo prováděno na předem stanovenou tloušťku brusnými pásy zrnitosti 80 a 120. Z důvodu, že testovaný materiál je navrhnut s ohledem na použití v exteriéru a interiéru, bylo zvoleno k lepení dýhy fenol formaldehydové lepidlo Lignofen G/3/D od společnosti Legr Sa. Nános, lisovací teplota a způsob aplikace byl zvolen dle doporučení technického listu. Jedná se o lepidlo typu rezol, které vytvrzuje za zvýšeného tepla.

4.1.3 Matrice

Pro testování byly zvoleny pryskyřice dvou výrobců. Každý z produktů je svým způsobem na trhu výjimečný. Produkty americké společnosti Entropy Resins se řadí mezi epoxidové pryskyřice vyrobené šetrnými metodami vůči životnímu prostředí. Základním stavebním kamenem pro výrobu pryskyřice není ropný produkt, ale chemické látky vyrobené v bio rafinérii. Ke zvýšení „zelené“ efektivity je přispěno také šetrnějším zpracováním látek, které snižují produkci

skleníkových plynů v průběhu výroby matrice až o 33 %. Ve vzorcích byla použita pryskyřice SAP ONE, která je označována výrobcem za ekologicky nejvíce šetrný výrobek a pryskyřice SAP CLR, která se vyznačuje jak velmi dobrými mechanickými vlastnostmi, tak také svojí čírostí. Je tak vhodná pro využití v pohledových vrstvách kompozitu [35].

Druhou testovanou variantou matrice pro sendvičovou konstrukci je produkt společnosti Arkema – Elium 188. Na rozdíl od produktu Entropy Resins se jedná o termoplastickou pryskyřici. Svým charakterem je Elium 188 výjimečné v mnoha ohledech. Přestože se jedná o termoplast, při pokojové teplotě je v nezpracovaném stavu v kapalně formě. Proces síťování a vytvrzení lze provádět za běžných nebo zvýšených teplot pomocí urychlovače ve formě práškového komponentu, který je dodáván společností Akzo Nobel – Akzo Perkadox CH50X. Díky nízké viskozitě kapaliny lze aplikovat Elium 188 jak ruční laminací, tak také pomocí technologie infuze nebo RTM.

Charakterem termoplastu lze vyrobené produkty recyklovat jak mechanickým, tak chemickým způsobem. V případě mechanické recyklace jsou výrobky rozdrčeny na malé části – granule. Granulovaný odpad je za pomoci zvýšené teploty přetvořen do podoby nového produktu, který je možné vyrobit vstřikovací technologií, která je totožná s technologií vstřikovaných termoplastů. Daný produkt nejen, že je vytvořen z termoplastické matrice, ale obsahuje částice nadrcených vláken z původního kompozitu. Druhou variantou recyklačního procesu je chemický proces. Během chemické recyklace kompozitu dochází k zahřátí recyklátu na teoretickou teplotu vyšší než 300 °C. V průběhu depolymerizování dochází k rozdělení na základní složky – recyklovaný monomer a recyklované vlákno. Recyklovaný monomer může být následně přidán jako jedna ze základních složek pro výrobu nové matrice Elium 188 a to až do obsahu 95 % hmotnosti. Mezi další nesporné výhody tohoto materiálu patří jeho tvárnost hotových výrobků za zvýšených teplot. Produkty tak mohou být svařovány a slepovány za zvýšené teploty bez nutnosti lepidla nebo dalších výztuží. Elium 188 neobsahuje škodlivý styren, se kterým se v sériové výrobě kompozitů z polyesterových matric setkáme [36].

4.2 Příprava zkušebních těles

Zkušební tělesa pro testování mechanických vlastností byla vyrobena technologií lisování za běžné provozní teploty. Veškeré vzorky byly lisovány za pomoci lisovacího zařízení SCM GS 6. V průběhu lisování působil na tělesa specifický tlak 0,1MPa. U vzorků obsahující termoplastickou matici Elium 188 bylo dle instrukcí výrobce pro vytvrzování použito zvýšené teploty lisu na 50 °C. Dodaný soubor dých balsy byl sesazen na tupo pomocí lepící pásky do formátu 1x1 m. Jednotlivé archy byly následně složeny do třívrstvé skladby překližované desky v orientaci 90° - 0° - 90°. Ke slepení souboru bylo použito fenol-formaldehydového lepidla (PF) značky Legr SA. Hotová překližovaná deska byla začištěna a zbavena lepících pásek na vnějších stranách. Následovalo naformátování desky na patřičný rozměr pro výrobu vzorků.

Během výroby vzorků byly použity tyto pomůcky a zařízení:

- Lisovací zařízení SCM GS 6
- Formátovací pila SCM SI 300 Class
- Širokopásmová automatická bruska SCM Sandya 300
- Vakuovací fólie PO 180 (rukáv), tloušťka 50 μ
- Pomůcky pro přípravu polotovarů (válečky, laboratorní váhy BL 100 LCD, dodatečné separátory – typ a účel)
- Ochranné pomůcky (rukavice, polomaska, ochranné brýle)



Obrázek 22: Suchá (vlevo) a vytvrzená (vpravo) skladba sendvičové konstrukce

Před ručním prosycením pryskyřice skrz výztuž bylo zapotřebí naformátovat tkaninu na požadovaný rozměr s přídavkem pro přesah po stranách naformátované překližky (Obrázek 22). Následovalo poměrové míchání matrice.

Odměrování jednotlivých složek pryskyřice a tvrdidla bylo prováděno podle hmotnostních poměrů uvedených výrobcí (tabulka hmotnostních poměrů) za pomoci laboratorních vah BL 100 LCD (Tabulka 5).

Výrobce a typ pryskyřice	Hmotnost komponentu A (g)	Hmotnost komponentu B (g)	Objemový poměr
Entropy Resins SAP ONE	100	44	2:01
Entropy Resins SAP CLR	100	44	2:01
Arkema Elium 188	100	3	-

Tabulka 5: Poměry míchání komponentů pro dvousložkovou matrici

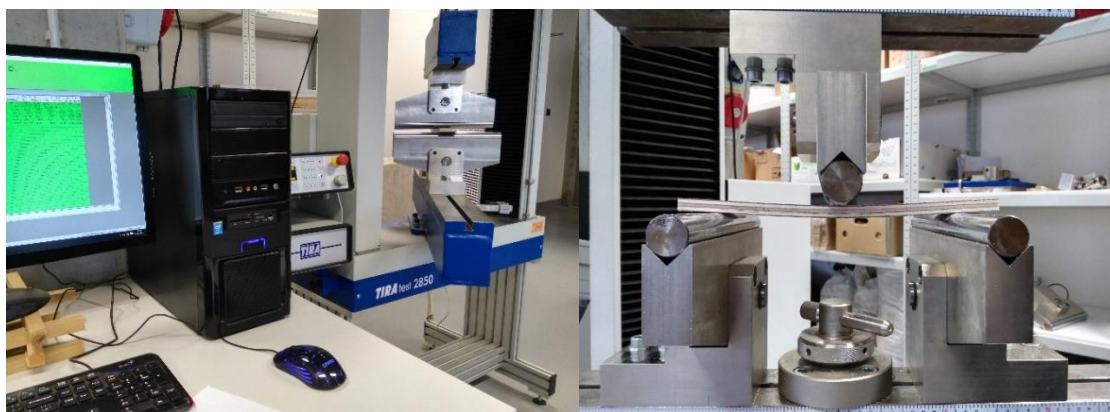
Na prosycenou první vnější stranu tkaniny byla položena překližovaná deska, která byla předem přebroušena na širokopásové automatické brusce SCM Sandya 300 na požadovanou tloušťku. Na vrchní vrstvu byla následně aplikována pryskyřice a přiložena druhá tkanina. Vrchní vrstva byla důkladně prosycena pryskyřicí pomocí válečku a fyzického přitlaku na těleso. Vzorek byl opláštěn separační fólií a uložen do lisovacího zařízení SCM GS 6. Lisování probíhalo za stálých podmínek a časů doporučených v technických listech výrobců matric. Plně vytvrzené panely byly naformátovány na patřičný rozměr zkušebních těles dle zkušební normy ČSN EN 310 (Obrázek 23).



Obrázek 23: Čtyři skupiny z šesti vyrobených

4.3 Mechanické testování těles

Zkušební tělesa byla podrobena testování statickým tříbodovým ohybem. Zkouškou byly získány potřebné materiálové charakteristiky jako jsou modul pružnosti v ohybu a pevnost v ohybu. Další sledovanou hodnotou byl maximální průhyb při maximální ohybové síle. Měření bylo prováděno v laboratoři dřevěných výrobků a konstrukcí, v Dřevařském pavilonu FLD za pomoci zkušebního přístroje TIRA test 2850 (Obrázek 24).



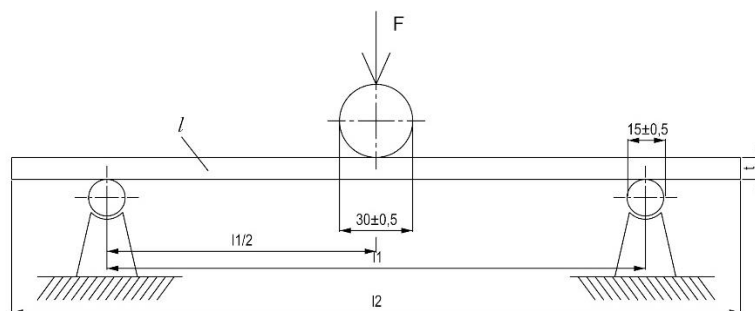
Obrázek 24: Zkušební přístroj TIRA test 2850 použitý pro mechanickou zkoušku

Mechanické testování těles bylo prováděno podle normy ČSN EN 310, která určuje metody pro stanovení zdánlivého modulu pružnosti při statickém ohybu a pevnosti v ohybu u desek ze dřeva o jmenovité tloušťce rovné nebo větší než 3 mm. Podstatou zkoušky je stanovení modulu pružnosti v ohybu a pevnost v ohybu zatížením zkušebního tělesa v jeho středu. Těleso je podepřeno ve dvou bodech.

4.4 Přístroje a pomůcky

Měření hodnot musí probíhat na přístroji, který splňuje normu EN 325. Pro tento účel byl zvolen přístroj TIRA test 2850. Zkušební zařízení se skládá z těchto částí (Obrázek 25):

- Dvou rovnoběžných, válcových podpěr o průměru $15 \pm 0,5$ mm s možností volného otáčení kolem své osy a délky větší, než je šířka zkušebního tělesa.
- Zatěžovací válcové hlavy o průměru $30 \pm 0,5$ mm. Musí být umístěna rovnoběžně s podporami a ve stejné vzdálenosti mezi nimi.



Obrázek 25: Schéma zkušebního zařízení; l – zkušební těleso, F – zatížení, t – tloušťka zkušebního tělesa [51]

4.5 Zkušební tělesa

Zkušební tělesa musí být pravoúhlá, s následujícími rozměry:

- Šířka b musí být 50 ± 1 mm.
- Délka l_2 musí být 20ti násobkem jmenovité tloušťky +50 mm. Největší možná délka tělesa je 1050 mm, minimální délka 150 mm.

Zkušební tělesa musí být před mechanickou zkouškou klimatizována do konstantní hmotnosti v prostředí s relativní vlhkostí vzduchu 65 ± 5 % a teplotou 20 ± 2 °C. Konstantní hmotností bylo považováno ustálení hmotnosti vzorků, vážených v intervalu 24 h a jejichž hodnoty se nelišily více než o 0,1 %. Tloušťka zkušebních těles byla 12 mm. Na základě kritérií byla vypočteny rozměry vzorků 50x290x12 mm. Pro měření hmotnosti a hustoty vzorků byly vyrobeny vzorky o velikosti 50x50 mm a tloušťce odpovídající sendvičové konstrukci (12 mm). Pro mechanickou zkoušku dle normy ČSN EN 310 bylo vyrobeno patnáct zkušebních těles pro každou skupinu. Pro gravimetrickou metodu zjištění hustoty a vlhkosti materiálů bylo vyrobeno šest vzorků pro každou skupinu.

4.6 Postup mechanické zkoušky

Na zkušebním zařízení byla nastavena vzdálenost středů podpěr s přesností 1 mm na dvacetinásobek jmenovité tloušťky desky – 240 mm. Zkušební těleso je uloženo podélnou osou v pravém úhlu k podpěrám tak, aby střed vzorků korespondoval se středem zatěžovací válcové hlavy přístroje. Zatížení v průběhu zkoušky probíhá za konstantní rychlosti posuvu. Rychlost zatěžování byla upravena na začátku zkoušky podle potřeby tak, aby délka zkoušky trvala v intervalu 60 ± 30 sekund.

4.6.1 Modul pružnosti v ohybu

Modul pružnosti E_m (N/mm²) je vyjádřen pro každé zkušební těleso vzorcem:

$$E_m = \frac{l_1^3 (F_2 - F_1)}{4bt^3 (a_2 - a_1)}$$

l_1 - vzdálenost mezi středy podpěr v milimetrech

b - šířka zkušebního tělesa v milimetrech

t - tloušťka zkušebního tělesa v milimetrech

$F_2 - F_1$ - přírůstek zatížení v přímkové části zatěžovací křivky v newtonech. F_1 musí být hodnota přibližně 10 % a F_2 přibližně 40 % z maximálního zatížení

$a_2 - a_1$ - přírůstek průhybu ve středu délky zkušebního tělesa. Hodnota odpovídá zatížení F_1 a F_2

Modul pružnosti skupiny zkušebních těles je vyjádřen na tři desetinná čísla. Výsledná hodnota skupiny je vyjádřena aritmetickým průměrem modulů pružnosti všech zkušebních těles skupiny a je vyjádřen na tři platná čísla.

4.6.2 Pevnost v ohybu

Pevnost v ohybu f_m (N/mm²) je vyjádřen pro každé zkušební těleso vzorcem:

$$f_m = \frac{3 F_{max} l_1}{2 b t^2}$$

Pevnost v ohybu pro každé zkušební těleso je vyjádřena na tři desetinná čísla. Pevnost v ohybu skupiny zkušebních těles je vyjádřena aritmetickým průměrem pevností v ohybu všech zkušebních těles skupiny a je vyjádřena na tři platná čísla.

4.6.3 Průhyb při maximálním zatížení

V průběhu mechanické zkoušky modulu pružnosti v ohybu a pevnosti v ohybu byly zaznamenávány hodnoty posuvu posuvníku a maximální ohybová síla nutná k deformační poruše tělesa. Naměřené hodnoty jsou vyjádřeny aritmetickým průměrem na tři platná čísla.

4.6.4 Hustota a vlhkost při 50 % vzdušné vlhkosti

Podstatou měření je zjištění hustoty skupin vzorků a výpočet relativní vlhkosti sendvičového panelu při 50 % vzdušné vlhkosti. Pro každou skupinu bylo vyrobeno šest zkušebních těles pravoúhlého tvaru a rozměrech 50x50x12 mm. Vyrobené vzorky byly vloženy do klimatizačního zařízení Memmeret HPP 750, kde byly vystaveny 50 % vlhkosti vzduchu po dobu 72 hodin. Tvarové a hmotnostní ustálení bylo prověřeno dvěma časově oddělenými měřeními, kdy rozdíl mezi naměřenými hodnotami nepřekročil 0,01g. Z naměřených údajů byl proveden výpočet hustoty při 50 % vlhkosti.

$$\rho_{50} = \frac{m_{50}}{V_{50}}$$

ρ_{50} – hustota tělesa při 50 % vlhkosti

m_{50} – hmotnost vzorku při 50 %

V_{50} – objem vzorku při 50 %.

Pro zjištění relativní vlhkosti sendvičové struktury při 50 % vzdušné vlhkosti byly vzorky vysušeny při teplotě 103 (± 2) °C na konstantní hmotnost absolutně suchého stavu. Plně vysušený vzorek byl ověřen dvěma váženími, jejichž kontrolní naměřené hodnoty nepřekročily 0,01 g. K vážení obou stavů vzorků bylo použito vah BL 100LCD s přesností na 0,01 g. Pro zpracování naměřených dat byl použit vzorec pro výpočet relativní vlhkosti.

$$w_{rel} = \frac{m_{50} - m_0}{m_0} * 100$$

m_{50} - hmotnost vzorku při 50 % vlhkosti vzduchu

m_0 - hmotnost vzorků při 0 % vlhkosti vzduchu

Získané hodnoty pro každé zkušební těleso byly vyjádřeny na tři desetinná čísla. Hustota a vlhkosti skupiny zkušebních těles je vyjádřena aritmetickým průměrem hustot a vlhkostí všech zkušebních těles skupiny a je vyjádřena na tři platná čísla.

4.6.5 Elektronová mikroskopie

Pro analýzu a porovnání lněného vlákna se skelným byly vybrané vzorky analyzovány pomocí elektronového mikroskopu MIRA 3, Tescan-Orsay holding. Příklad byl nastaven na urychlovací

napětí 15 000 V, zvětšení 30–2000x a pracovní vzdálenost 22 mm. Pro zobrazení povrchu vzorků bylo využito detektoru sekundárních elektronů.

4.7 Zpracování naměřených dat

V průběhu statické zkoušky tříbodovým ohybem byly zaznamenávány a porovnány vzniklé poruchy sendvičové konstrukce. Pro porovnání mechanických vlastností byly zjišťovány následující materiálové charakteristiky:

- Zjištění hustoty a vlhkosti skupin
 - Získáno výpočtem podle gravimetrické metody měření
- Zjištění modulu pružnosti
 - získán výpočtem dle normy ČSN EN 310
- Zjištění pevnosti v ohybu
 - Získán výpočtem dle normy ČSN EN 310
- Zjištění průhybu a maximální ohybové síly
 - vzdálenost, o kterou byla během zkoušky prohnuta vrchní nebo spodní plocha zkušebního tělesa uprostřed mezi podpěrami vzhledem ke své původní pozici
 - maximální síla, které zkušební těleso odolává a kdy po překročení této veličiny dochází k některému z typů poškození

Z naměřených hodnot byl vypočítán aritmetický průměr skupiny (1) označený symbolem \bar{x} . Pro vyjádření odchylek naměřených hodnot od aritmetického průměru byl použit odhad směrodatné odchylky (2), označený jako s a variační koeficient (3) označený jako v_x .

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

Výsledky provedené statické ohybové zkoušky, měření hustoty a vlhkosti byly zpracovány pomocí programu Microsoft Excel 2016. Výsledky byly vyneseny do grafů a tabulek. Údaje jednotlivých skupin byly porovnány mezi sebou.

5 VÝSLEDKY

5.1 Modul pružnosti v ohybu

Z naměřených dat (tabulka 6) vyplývá, že nejvyšších naměřených hodnot dosahují vzorky ze skupiny LB (4710 N/mm²), která obsahovala jak lýková vlákna Inu, tak ekologicky vyráběnou epoxidovou pryskyřici SAP ONE. K porušení těchto těles bylo zapotřebí nejvyšší ohybové síly v průběhu statické zkoušky. S výrazným poklesem hodnot je následována skupinou vzorků LC (3820 N/mm²), kde bylo použito totožné vlákno ve formě výztuže v kombinaci s reaktoplastickou pryskyřicí SAP CLR. Tato skupina vykazuje třetí nejvyšší naměřené hodnoty modulu pružnosti všech měřených skupin a druhé nejvyšší v kategorii skupin obsahující přírodní vlákna.

	Balsa	LB	LC	LE	SC	SE
Em min N/mm ²	1702	4430	3650	2900	3170	2630
Em max /mm ²	2690	5040	4130	4350	4590	4990
Em \bar{x} [N/mm²]	2200	4710	3820	3780	3130	4080
S [%]	276,3	130,616	109,718	429,279	334,374	762,39
v_x	12,557	2,771	2,87	11,35	8,09	18,67

Tabulka 6: Získané hodnoty modulu pružnosti v ohybu

Nejnižších hodnot sendvičových struktur obsahující přírodní výztuž, dosahuje skupina LE (3780 N/mm²), jejichž lněná vlákna byla prosycena termoplastickou pryskyřicí. U vyrobených těles byly viditelné známky nedostačujícího prosycení matrice skrze přírodní vlákno. Ve všech pěti skupinách sendvičových konstrukcích vyztužených vlákny je možné pozorovat výrazný nárůst hodnot modulu pružnosti oproti neopláštěné překližované desce z balsy, a to až ve dvou násobku naměřených hodnot.

U vzorků LC a LE lze sledovat minimální rozdíly vypočítaných hodnot modulů pružnosti. Naopak u skupin SC a SE, která obsahují shodný typ sklených vláken, lze pozorovat výrazný rozdíl výsledků. Přestože u vzorků SE byla zaznamenána delaminace vnějších vrstev u všech testovaných těles, výsledné hodnoty jsou vyšší nežli u skupiny SC, obsahující reaktoplastickou pryskyřici. Nejvyšší hodnoty vzájemné odlišnosti lze pozorovat u výsledků skupin LE a SE.

Ze získaných hodnot je možné vyčíst, že tyto skupiny obsahují velké vzájemné odlišnosti uvnitř souboru. Naopak skupiny obsahující reaktoplastické matrice vykazují výrazně nižší hodnoty směrodatné odchylky souborů. Z vypočítaných hodnot lze usoudit, že skelná vlákna v kombinaci s reaktoplastickou pryskyřicí dosahují nižších hodnot modulu pružnosti nežli lněná vlákna. Naopak lněná vlákna dosahují horších výsledků oproti skelným vláknům v případě použití termoplastické pryskyřice jako matrice.

5.2 Pevnost v ohybu

Stejně jako v případě modulu pružnosti, nejvyšších naměřených hodnot (Tabulka 7) dosahují vzorky skupiny LB (38,5 N/mm²) následovány skupinou LC (33,9 N/mm²). Třetí nejvyšší výsledky vykazuje skupina LE (28,3 N/mm²) a následně až skupina SC (24,9 N/mm²) s výztuží ze skelných vláken. Nejnižší hodnoty vykazuje skupina SE (24,6 N/mm²). Lze tak usuzovat, že lněná vlákna vykazují lepší pevnost v ohybu oproti skelným vláknům. Stejně pořadí výsledků vykazují hodnoty maximální ohybové síly potřebné k porušení zkušebních těles.

	Balsa	LB	LC	LE	SC	SE
Fm min [N/mm ²]	11,9	33,5	29,4	19,2	10	19
Fm max [N/mm ²]	19,4	44,9	39,5	35,5	34,5	30,9
Fm \bar{x} [N/mm²]	15,8	38,5	33,9	28,3	24,9	24,6
S [%]	2,301	3,233	3,609	4,723	5,774	3,344
v_x	14,59431	8,396	10,648	16,6943	23,186	13,60423

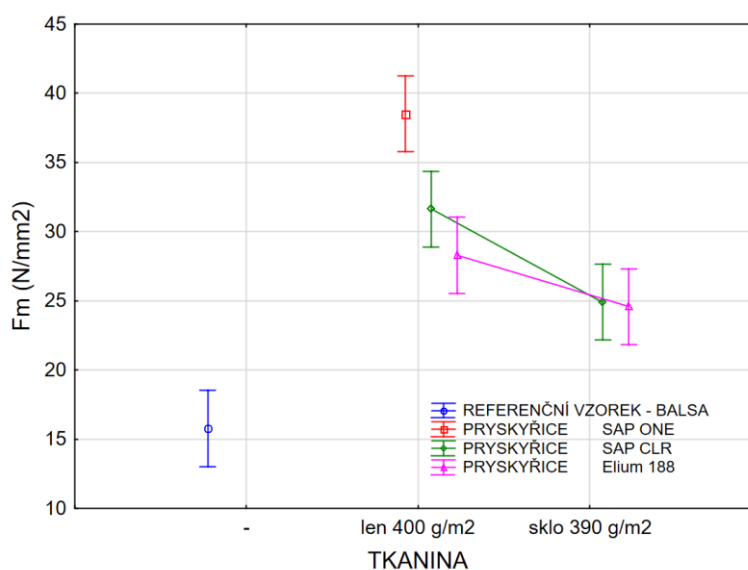
Tabulka 7: Získané hodnoty pevnosti v ohybu

Všech pět měřených skupin vykazuje výrazný nárůst dat v porovnání se vzorky z překližované desky balsy, a to v násobcích dvou až dvou a půl naměřených hodnot. Stejně jako u modulu pružnosti je zřejmé, že reaktoplastické pryskyřice od společnosti Entropy Resins dosahují lepších mechanických vlastností než termoplastická pryskyřice Elium společnosti Arkema.

Nevýrazný rozdíl hodnot mezi skupinami obsahující skelné vlákno potvrzuje, že termoplastická pryskyřice vykazuje lepších výsledků se syntetickým vláknem namísto s přírodním, u kterého lze vidět výrazně větších rozdílů získaných hodnot.

Podobně jako u naměřených hodnot modulu pružnosti i zde je možné sledovat výrazný rozptyl naměřených hodnot některých skupin. Nejvyšší odlišnost těles souboru se nachází ve skupinách SC a LE. Shodně jako u modulu pružnosti nejlepších hodnot vykazuje skupina LB.

Na nadcházejícím grafu č. 5 je možné porovnat 95 % interval spolehlivosti testovaných pryskyřic a vláken. Graf potvrzuje výrazný nárůst hodnot všech skupin oproti referenčním vzorkům z balsy. Skupina obsahující pryskyřici SAP ONE v kombinaci se lněným vláknem dosahuje nejvyšších hodnot.



Graf 5: 95 % interval spolehlivosti skupin

Pro získané hodnoty pevnosti v ohybu byl proveden Turkeyův test (příloha č. 8). Skupina LC vykazuje statisticky výrazný rozdíl se skupinami SC (SAP CLR) tak SE (Elium 188). Je tak možné usoudit, že typ tkaniny má výrazný vliv na mechanické vlastnosti sendvičové konstrukce. Skupina LE nevykazuje statisticky významné rozdíly se skupinou SE, která obsahuje skelné vlákno.

Lze tak usoudit, že v případě matrice této značky nemá významný vliv na výsledné vlastnosti. Skupina LB, obsahující len a matrici SAP ONE vykazuje statisticky významné rozdíly se všemi testovanými skupinami.

5.3 Průhyb a maximální zatížení

Následující tabulka č. 8 znázorňuje závislost ohybové síly na deformaci neboli průhyb. V průběhu mechanické zkoušky byly zaznamenávány hodnoty maximálního průhybu a zatížení zkušebních těles. Nejvyšších průměrných hodnot maximálního průhybu dosahuje skupina LC (9,35 mm), následována skupinami LB (8,57 mm) a LE (8,57 mm). Skupiny obsahující skelné vlákno SC a SE vykazují, z pěti sendvičových konstrukcí, nejnižší hodnoty. Stejně jako u skupin obsahujících lněné vlákno i ve skupině se skelnou výztuží dosahují reaktoplastické pryskyřice větších hodnot.

	Balsa	LB	LC	LE	SC	SE
ldm min [mm]	5,79	7,44	7,75	7,06	5,83	5,228
ldm max [mm]	8	10,07	10,88	12,52	8,07	11,1
ldm \bar{x} [mm]	6,97	8,57	9,35	8,57	6,81	6,65
s [%]	0,62	0,75	0,97	1,39	8,21	1,41
v_x	9,003	8,77	10,4	16,25	120,5495	21,32

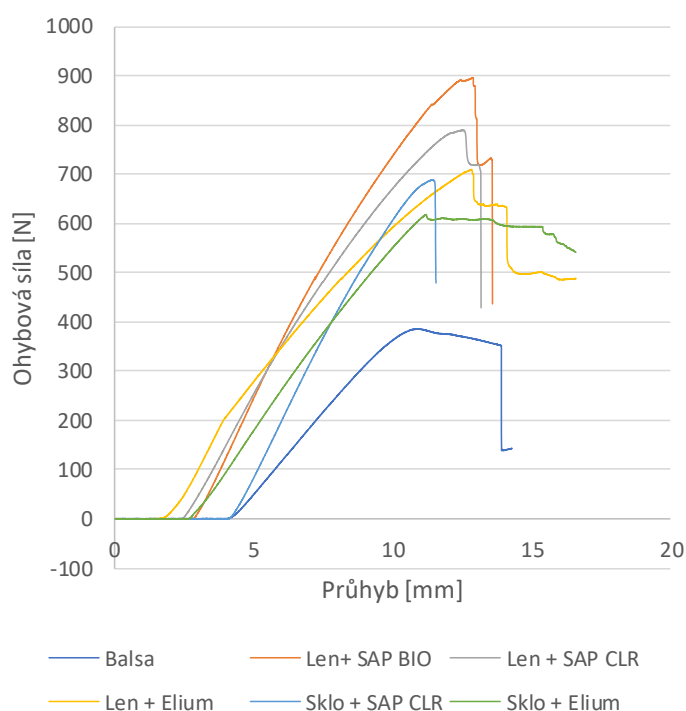
Tabulka 8: Naměřené hodnoty maximálního průhybu těles

Nejvyšší hodnoty průměrného maximálního zatížení (Tabulka 9) zkušebních těles vykazuje skupina LB (770 N), následována skupinou LC, LE, SC a SE. Z výsledků vyplývá, že stejně jako v případě průhybu i zde, v případě průměrného maximálního zatížení, vykazují skupiny s reaktoplastickou maticí vyšších hodnot.

	Balsa	LB	LC	LE	SC	SE
F min [N]	238	670	589	385	201	380
F max [N]	388	897	790	710	689	619
F \bar{x} [N]	316	770	678	5666	498	492
s [%]	46,01	64,66	72,17	94,45	115,4729	66,87
v_x	14,59	8,39	10,64	16,69	23,18	13,6

Tabulka 9: Naměřené hodnoty průměrného maximálního zatížení těles

Na následujícím grafu č. 5 je znázorněna závislost ohybové síly na průhybu těles. Ilustrované hodnoty představují nejvyšší naměřené výsledky testovaných těles z každé skupiny. I zde je možné zaznamenat, že nejlepších výsledků dosahují tělesa skupiny LB (Len + SAP BIO). Nejhorších výsledků dosahuje samozřejmě referenčně určená překližovaná deska z balsy. Téměř ve všech skupinách testovaných těles se vyskytují vzorky, u kterých nedošlo ke křehkému lomu, ale k lokálnímu porušení s postupnou, dále probíhající deformací. Souhrn všech průběhů zatížení skupin je možné nalézt v příloze č. 1.



Graf 6: Naměřené hodnoty s nejvyššími naměřenými daty z každé skupiny

5.4 Hustota a relativní vlhkosti

Naměřená data dokazují, že vzorky s nejvyššími hodnotami mechanických zkoušek vykazují vyšší hustotu, než je tomu u vzorků s nejnižšími hodnotami. Nejvyšší hustoty dosahuje skupina LB tvořená z přírodního lněného vlákna v kombinaci s reaktoplastickou matricí SAP ONE. Pouze vzorky v kombinaci s reaktoplasty a přírodním vláknem vykazují více než dvounásobnou hustotu oproti překližované desce z balsy. Skupina LE s termoplastickou matricí má nejnižší hustotu ze všech skupin s přírodní výztuží.

	Balsa	LB	LC	LE	SC	SE
ρ 50% [g/cm ³]	0,163	0,369	0,361	0,307	0,262	0,279
S [%]	0,007687	0,008813	0,015682	0,013833	0,007479	0,00894
v_x	4,71576	2,388425	4,343921	4,505863	2,854715	0,007557

Tabulka 10: Získaná data hustoty vzorků při vzdušné vlhkosti 50 %

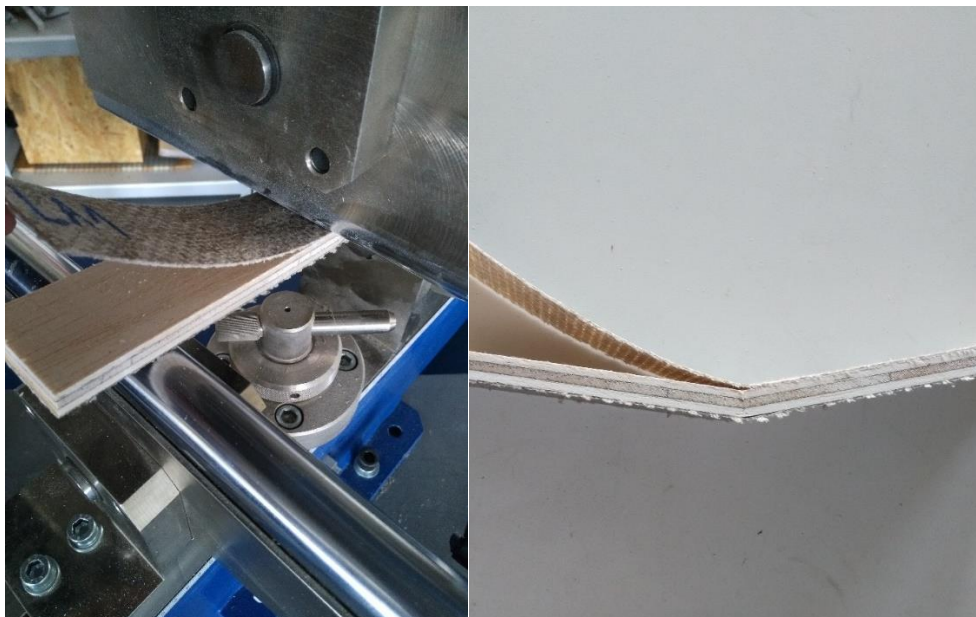
Vysoká hustota těles s přírodní výztuží může být zdůvodněna nerovnoměrným povrchem přírodního vlákna (Příloha č. 3) oproti syntetickému (Příloha č. 4) a tedy i zvýšenou sorpční a adhezní plochou. Na základě výpočtu relativní vlhkosti vzorků při vzdušné vlhkosti 50 % je možné vypočítat, že nejvyšší hodnoty, ve skupinách vyztužených vláknem, dosahuje skupina LE, obsahující termoplastickou matici. Důvodem ke zvýšené absorpci vzdušné vlhkosti může být nedostatečné propojení a prosycení matrice s přírodní výztuží (Příloha č. 6). Nejnižší hodnoty absorpce vykazuje skupina LB, která v průběhu mechanických zkoušek vykazovala nejvyšší naměřené hodnoty modulu pružnosti v ohybu a pevnosti v ohybu.

	Balsa	LB	LC	LE	SC	SE
w rel [%]	7,51	5,25	5,36	7,02	5,61	5,55
S [%]	0,371191	0,2054	0,314034	0,31225	0,179086	0,271551
v_x	4,939996	3,911645	5,85448	4,449268	3,189992	4,897222

Tabulka 11: Získaná data relativní vlhkosti vzorků při vzdušné vlhkosti 50 %

5.5 Poruchy vzniklé během statické zkoušky

Nejčastěji zaznamenanou poruchou v průběhu statické zkoušky bylo tlakové porušení jádra. K těmto poškozením docházelo v místě působení zátěžové hlavice zkušebního přístroje. Ve skupinách LC (SAP CLR) došlo u dvou zkušebních těles k delaminaci neboli k porušení soudržnosti mezi vnější krycí vrstvou a jádrem konstrukce. U tří těles skupiny LB (BIO ONE) došlo k lokálnímu poruše jádra. Ve skupině LE (Elium) došlo u 2 zkušebních těles k delaminaci vnější tlakové vrstvy v celé ploše (Obrázek 26) a ve čtyřech případech došlo k delaminaci na okraji testovaných vzorků. Ve vzorcích skupiny SC, kde výztuž byla tvořena skelným vláknem nebyly během kontroly před ani po zkoušce nalezeny známky delaminace nebo nedostatečného prosycení vláken.



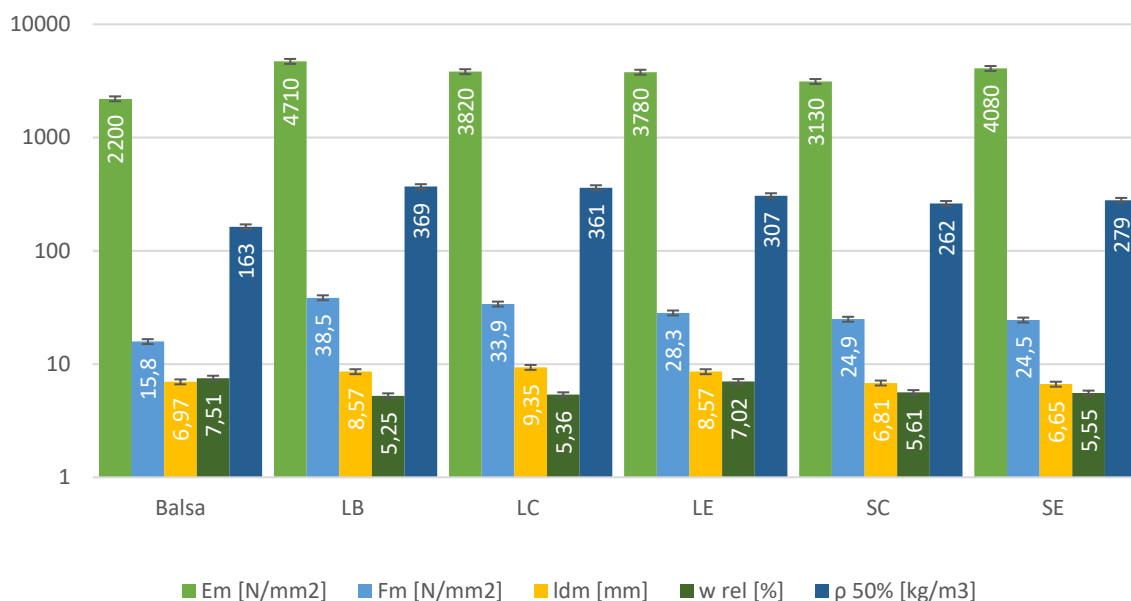
Obrázek 26: Delaminace vnější krycí vrstvy tělesa skupiny LE (Elium)

V páté skupině sendvičových struktur SE bylo zaznamenáno 7 těles se známkami delaminace před mechanickou zkouškou a nekvalitním prosycením termoplastické pryskyřice na vnitřní straně výztuže. Na povrchu překližovaného jádra byla zjevná struktura prolisovaných vláken. Lze tak usuzovat, že matrice špatně přilne k balsovému jádru (Příloha č. 6). V přílohách č.5a-e jsou zaznamenány jednotlivé skupiny a jejich vybraná poškození po provedené mechanické zkoušce. Další vzniklá poškození byla spíše lokálního charakteru a vznikala v místě působení zatěžovací hlavičky.

5.6 Shrnutí výsledků mechanické zkoušky

Na základě získaných hodnot (Graf 6) lze usuzovat, že epoxidové pryskyřice společnosti Entropy Resins dosahují lepších mechanických výsledků oproti termoplastické pryskyřici společnosti Arkema. Můžeme také pozorovat výrazné rozdíly mezi hodnotami obou epoxidových pryskyřic, kde výrazně lepších výsledků dosahuje produkt SAP ONE. Lze dále pozorovat nižší hodnoty modulu pružnosti skelné výztuže oproti lněnému vláknu v případě použití totožné epoxidové pryskyřice SAP CLR. Porovnáním skupin LC a SC je možné usoudit, že lněná vlákna dosahují vyšších hodnot modulu pružnosti v ohybu a pevnosti v ohybu. Výrazné rozdíly je možné shledat mezi termoplastickou pryskyřicí Elium a epoxidovou matricí SAP ONE.

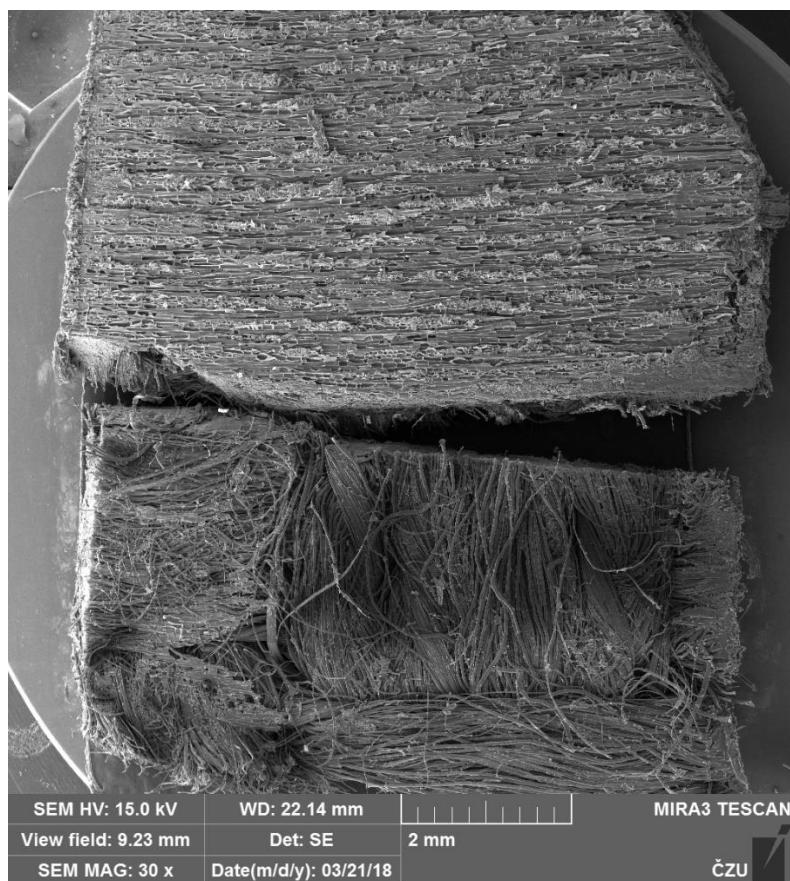
Značné případy delaminace u skupin vzorků z termoplastické pryskyřice odkazují na nízkou schopnost matrice přilnout k povrchu jádra. I přes fakt, že matrice byla plně prosycena skrz výztuž a na sendvičovou konstrukci působil zvýšený tlak, došlo u výrazného počtu vzorků k delaminaci vnější vrstvy a nerovnoměrnému prosycení výztuže. Problematiku přilnavosti termoplastických matic k přírodnímu vláknu potvrzuje také literatura [58].



Graf 7: Souhrn měřených hodnot testovaných skupin

Na obrázku č. 27 je možné porovnat snímky z mikroskopu MIRA3 Tescan-Orsay. Na snímku lze porovnat prosycená lněná vlákna reaktoplastickou a termoplastickou pryskyřicí. Vlákna v horní části snímku jsou plně a rovnoměrně prosycena reaktoplastem skrze přírodní výztuž.

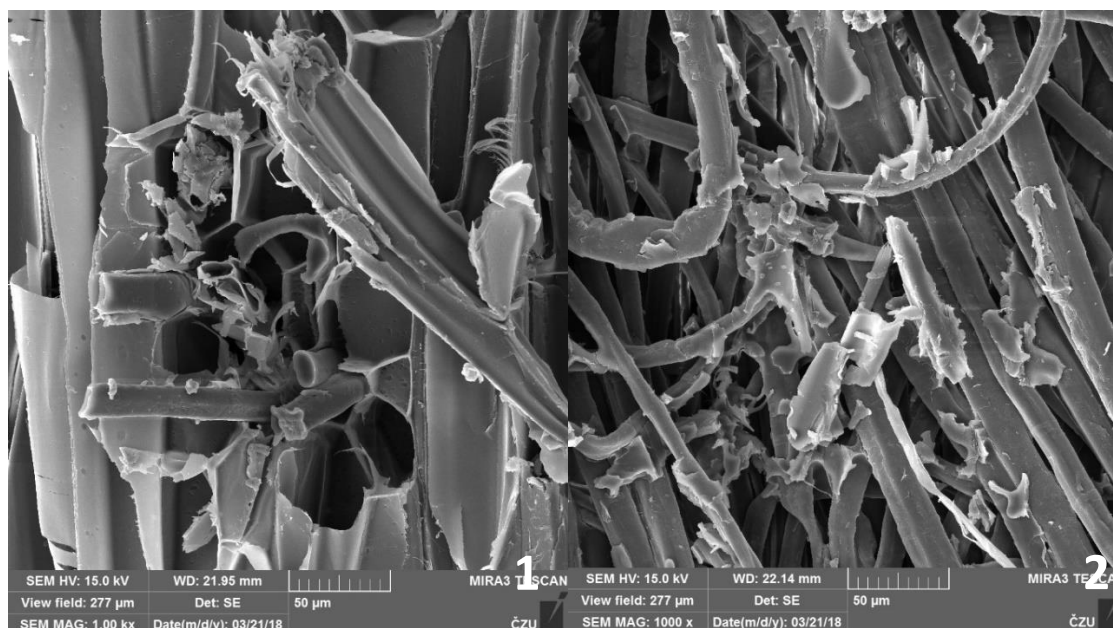
Ve spodní části snímku je vidět nedostatečné prosycení termoplastické pryskyřice skrze výztuž i přes fakt, že pro oba vzorky byl zvolen totožný výrobní proces. Na obrázku č. 28 jsou zobrazena nasycená vlákna odlišnými typy pryskyřic při 1000x zvětšení. Skupiny LE a SE obsahují totožnou matici (termoplast), ale odlišné výztuže. Ze získaných hodnot lze usuzovat, že vzorky se skelným vláknem dosahují vyšších hodnot modulu pružnosti v ohybu, ale nižších hodnot pevnosti v ohybu. Tento rozdíl může být zapříčiněn již zmíněným problémem adheze matrice k přírodnímu vláknu.



Obrázek 27: Srovnání kvality prosycení přírodních vláken reaktoplastickou (horní) a termoplastickou (dolní) maticí

Za negativní vlastnost přírodních vláken můžeme považovat vysokou absorpci matrice. Ta je ve velké míře dána složitou podobou povrchu vláken. V příloze č. 2 lze porovnat stavbu skelného a lněného vlákna při třicetinásobném zvětšení. Snímek byl proveden v rámci analýzy struktury vlákna pro vyhodnocení mechanických vlastností mikroskopem MIRA3 TESCAN. Ze snímků je patrné, že stavba přírodního vlákna je mnohem komplikovanější a méně „čistá“ v porovnání se syntetickým vláknem jaké je skelné vlákno. Zajímavý rozdíl v povrchové úpravě suchých vláken lze vidět při tisícinásobném zvětšení vzorků (příloha č. 3 a 4).

Ze získaných dat měření hustoty a vlhkosti vzorků při 50 % vzdušné vlhkosti vyplývá, že skupina LB, vykazující nejlepší měřené mechanické vlastnosti, dosahuje nejvyšších hodnot hustoty sendvičové struktury a nejnižší vlhkosti. Naopak skupina LE vykazuje nejnižší hustoty a nejvyšší hodnot vlhkosti. Tyto výsledky mohou být následkem špatného smáčení matrice ve vlákne a tím možný přímý kontakt vlákna se vzdušnou vlhkostí. V teoretické literatuře bylo zmíněno, že jedním z nedostatků přírodních vláken je schopnost absorpce vzdušné vlhkosti [29].



Obrázek 28: Mikroskopický snímek: 1) Iněné vlákno prosycené epoxidovou pryskyřicí, 2) Iněné vlákno prosycené termoplastickou pryskyřicí

V nadcházející tabulce č. 12 můžeme hodnotit jednotlivé mechanické a fyzikální vlastnosti dle známkovací stupnice. Známky v pořadí 1 až 6 zastupují hodnoty od nejvyšší po nejnižší. Jelikož vlhkost negativně ovlivňuje mechanické vlastnosti, nejnižší hodnota je známkována nejlépe, nejvyšší naopak nejhůře.

	Balsa	LB	LC	LE	SC	SE
Em	6	1	3	4	5	2
Fm	6	1	2	3	4	5
Idm	4	2	1	3	5	6
ρ 50%	6	1	2	3	5	4
w rel	6	1	2	5	4	3
Průměr	5,6	1,2	2	3,6	4,6	4

Tabulka 12: Evaluace a zhodnocení měřených mechanických a fyzikálních vlastností skupin

Z tabulky hodnocení mechanických a fyzikálních vlastností lze usoudit, že nejlepšího výsledku – nejnižšího aritmetického průměru, dosáhla skupina LB tvořená Iněnou výztuží a epoxidovou maticí SAP ONE. Až na druhou nejvyšší hodnotu modulu pružnosti vykazuje tato sendvičová skladba nejlepšími výsledky v ostatních měřených atributech.

Skupiny obsahující přírodní vlákno a reaktoplastickou matici vykazují výrazně lepšího průměru, než je tomu u lněného vlákna s termoplastickou pryskyřicí. Naopak lepšího výsledku dosahuje termoplastická pryskyřice v kombinaci se syntetickým vláknem. Ze získaných hodnot lze usoudit, že hlavním problémem špatných výsledků skupiny LE bylo nedostačující prosycení a přilnavost termoplastu k přírodnímu vláknem i přes fakt, že pro všechny vyrobené skupiny byly zajištěny totožná technologické podmínky.

5.7 Aplikace konstrukce v praxi

Porovnáním dat lze usuzovat, že přírodní vlákna mohou být adekvátní náhradou běžné používaných syntetických vláken jako je například testované skelné. Bohužel díky své variabilitě mechanických vlastností mohou v tuto chvíli najít uplatnění především v podobě opláštění nebo nenosných částí konstrukcí dopravních prostředků. V budoucnu by díky nízkým produkčním nákladům a výrazně nižší emisivitě CO₂, mohly nahradit skelné vlákno úplně.

Balsa ve formě jádra nachází v současnosti uplatnění například jako součást konstrukce podlažek [41]. Dřevina v kombinaci se skelnou výztuží a reaktoplastickou maticí je poptávána především ze strany výrobců dopravních prostředků jako jsou kolejová vozidla nebo plavidla [49]. Navržená sendvičová konstrukce balsy a přírodního vlákna s reaktoplastickou maticí tak může být plnohodnotnou alternativou stávající produkce. V oblasti kolejových vozidel jsou sendvičové panely využívány k výrobě interiérových dělících příček, opláštění nosné konstrukce vozidla nebo v podobě tvarovaných pohledových částí kabin.

V oblasti zakázkové výroby plavidel jsou sendvičové panely velmi poptávaným materiálem. Díky standardizované výrobě a předem znalým informacím o mechanických a fyzikálních vlastnostech zefektivňují a zkvalitňují výrobní proces. Navržená konstrukce s přírodním opláštěním nejen zvyšuje mechanické vlastnosti, ale také dodává charakter přírodního materiálu. Charakter přírodního konstrukčního prvku z obnovitelných zdrojů s ambicemi pro plnohodnotnou a efektivní recyklaci nabízí možnosti uplatnění také mimo dopravní sektor, a to především v oblastech, kde se setkáváme s obtížně recyklovatelnými kompozity. Mezi takové sektory může patřit výroba energie z obnovitelných zdrojů, kde například listy větrných elektráren jsou vyrobeny ze zmíněných materiálů [28], nebo také v podobě opláštění mobilních buněk a domů, kde je kladen vysoký nárok na nízkou hmotnost a dobré mechanické nebo fyzikální vlastnosti.

6 ZÁVĚR

Získaná data mechanické zkoušky dokazují, že speciálně upravená lněná vlákna mohou být adekvátní náhradou skelných výztuží v kompozitních materiálech. Kombinace lněných vláken se speciální ekologicky šetrněji vyrobenou matricí tak nejen dosahuje vyšších hodnot, ale také může teoreticky snižovat ekologickou stopu a produkci skleníkových plynů. Použití termoplastické matrice je možnou alternativou k reaktoplastickým produktům. I přes problematické prosycení vláken, formou ruční laminace doplněné o lisovací proces, ovšem dosahuje výsledná sendvičová konstrukce dobrých hodnot. Experimentální část dokazuje, že druh nebo typ matrice výrazně ovlivňuje modul pružnosti v ohybu a pevnost v ohybu. Pozorování dokazují, že zvolená matrice má vliv nejen na mechanické vlastnosti, ale také soudržnost a adhezi vnějších vrstev s jádrem. Naměřené hodnoty hustoty a vlhkosti vzorků dokládá, že také hustota a vlhkost má výrazný vliv na mechanické vlastnosti konstrukce. Nekvalitní prosycení výztuže matricí má nejen negativní dopad na mechanické vlastnosti, ale také negativní vliv na absorpci vzdušné vlhkosti a hustotu konstrukce.

- Bylo prokázáno, že lněné vlákno dosahuje lepších mechanických vlastností než skelné.
- Bylo prokázáno, že v případě použití reaktoplastické matrice dosahují lněné výztuže o 20–50 % vyšších hodnot modulu pružnosti v ohybu oproti skelné výztuži. Lněné výztuže v kombinaci s termoplastickou matricí vykazují naopak nižší hodnoty.
- Bylo prokázáno, že skupiny obsahující lněnou výztuž, dosahují o 15–55 % vyšších hodnot pevnosti v ohybu v porovnání se skupinami obsahující skelnou výztuž.
- Ze získaných dat lze usuzovat, že špatná schopnost adheze matrice a vlákna s jádrem negativně ovlivňuje vlhkost skladby. Měření dokazuje, že lněná vlákna vykazují vyšší absorpční schopnost matrice oproti skelným.

Na základě vyhodnocení mechanické zkoušky byly určeny oblasti použití sendvičové skladby, a to především pro oblasti dopravního průmyslu a produktového designu.

7 DOPORUČENÍ

Z naměřených dat lze usoudit, že lněná vlákna značky BioTex v kombinaci s reaktoplastickou pryskyřicí SAP ONE mohou být kvalitní náhradou skelného vlákna. Z měřených dat a analýzy vzorků lze usoudit, že jedním z hlavních problémů lněných vláken je zvýšená nasákavost a problematická smáčenlivost v případě termoplastické matrice. Důležitým faktorem přírodních vláken v nadcházejících letech vývoje a aplikace bude nejen cenová efektivnost povrchové úpravy, na které závisí schopnost adheze a nasákavost vláken, ale především technologické provedení, které zlepší propojení/smáčení tkanin i s jinými typy matric jako jsou testované termoplastické od společnosti Arkema.

Stejně jako se setkáváme s hybridními tkaninami u syntetických vláken, bude zajímavé sledovat vývoj hybridních variant u organických výztuží. Velmi zajímavé by mohly být nejen kombinace různých přírodních vláken jako len-konopí nebo len-juta, ale také hybridní tkaniny organických a anorganických vláken – skelné-lněné vlákno. Zajímavou alternativou by také mohly být kombinace minerálních vláken, která jsou 100 % organického původu (například čedičová/basaltová vlákna), a přírodní lýková vlákna jako byl testovaný len. Kombinacemi typů tkanin by mohlo být docíleno zlepšení mechanických vlastností a optimalizace pracovního procesu. Velkou výzvou v této oblasti bude normalizování požadavků na mechanické vlastnosti, ale také způsob pěstování, zpracovávání a další zmíněné faktory v této práci, jelikož jedním z kritických problémů těchto materiálů je jejich široký rozptyl mechanických i fyzikálních vlastností, který je dán zmíněnými podmínkami. Současná kvalita a úroveň vývoje dovoluje využití vláken především v povrchových vrstvách ve formě designového prvku s přídavkem zvýšení pevnosti materiálu nebo u kompozitních dílů na které nebudou kladeny vysoké nároky na mechanické vlastnosti. Kombinace těchto materiálů si začíná získávat velkou oblibu ze strany výrobců automobilů jako je ŠKODA Auto, která v této oblasti plánuje podporovat doktorandské studium za účelem praktické aplikace přírodních vláken v kombinaci s materiály na bázi dřeva v karosářských dílech mimo destruktivní zóny.

Lze očekávat, že studium a výzkum v oblasti recyklovatelných materiálů na bázi přírodních vláken bude získávat stále větší pozornost nejen u nás, ale především v zahraničí. Pevně věřím, že mi proto bude umožněno v tomto výzkumu i na dále pokračovat ve formě doktorandského studia.

8 PŘEHLED LITERATURY A POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. SULLINS, Theresa, et al. Hemp fiber reinforced polypropylene composites: The effects of material treatments. *Composites Part B: Engineering*, 2017, 114: 15-22.
2. FRÖBERG, Kerstin. Horsehair as a Textile. *FiberArts. org. Consultado el*, 1998.
3. TURBO. *Textilní zbožíznalství 1*. Dostupné na:
<https://turbo.cdv.tul.cz/mod/book/view.php?id=863&chapterid=537>.
4. KALIA, Susheel; KAITH, B. S.; KAUR, Inderjeet (ed.). *Cellulose fibers: bio-and nano-polymer composites: green chemistry and technology*. Springer Science & Business Media, 2011.
5. GEISE, Elke. *Textil und Modelexikon, Deutscher Fachverlag*. str. 52-59. ISBN 3-87150-848-9, 2006.
6. EHRENSTEIN, Gottfried W. *Polymerní kompozitní materiály. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia*, 351 s. ISBN 978-80-86960-29-6, 2009.
7. *Biodegradable and sustainable fibres*. Editor R Blackburn. Cambridge Woodhead Publishing Limited. 456 s. ISBN 18-557-3916-X, 2005.
8. HAAG, Katharina, et al. Influence of flax fibre variety and year-to-year variability on composite properties. *Industrial crops and products*, 2017, 98: 1-9.
9. REYNE, Maurice. *Flax and Hemp fibres: a natural solution for composite industry*. 1 vyd. Paříž: JEC.. ISBN 978-2-9526276-1-0, 2012.
10. STEVENS, Christian. *Industrial applications of natural fibres: structure, properties and technical applications*. John Wiley & Sons, 2010.
11. VRBKA, Jan. *Mechanika kompozitů. Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky, Fakulta strojního inženýrství VUT v Brně*, 2008.
12. SABU, Thomas. *Polymer composites*. Vol. 3. Weinheim: Wiley-VCH. ISBN 978-3-527-32980-9, 2012.
13. CASTEGNARO, S., et al. A bio-composite racing sailboat: Materials selection, design, manufacturing and sailing. *Ocean Engineering*, 2017, 133: 142-150.
14. FARUK, Omar, et al. Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000–2010. *Progress in polymer science*, 2012, 37.11: 1552-1596.

15. BOZACI, Ebru, et al. Effects of the atmospheric plasma treatments on surface and mechanical properties of flax fiber and adhesion between fiber–matrix for composite materials. *Composites Part B: Engineering*, 2013, 45.1: 565-572.
16. JOSHI, Satish V., et al. Are natural fiber composites environmentally superior to glass fiber reinforced composites?. *Composites Part A: Applied science and manufacturing*, 2004, 35.3: 371-376.
17. PLACET, Vincent, et al. Diameter dependence of the apparent tensile modulus of hemp fibres: A morphological, structural or ultrastructural effect?. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2012, 43.2: 275-287.
18. HAVEL COMPOSITES. *Všeobecný a základní popis materiálů používaných při výrobě kompozitů*. [online]
19. JANČÁŘ, Josef. *Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitů*. 1. vyd. Brno: VUT, 2003, 194 s. ISBN 80-214-2443-5.
20. INTEGROVANÝ REGISTR ZNEČIŠŤOVÁNÍ. *Styren* [online].
21. MIRACLE, D. B.; DONALDSON, S. L. ASM Handbook: Composites v. 21. *ASM International*, ISBN: 0-87170-703-9, 2001.
22. SP SYSTEMS. *Composite Materials Handbook* [online]. Newport. 1998.
23. MM PRŮMYSLOVÉ SPEKTRUM. *Sendvičové konstrukce* [online]. 2001
24. ZENKERT, Dan a Nordic Industrifond. *The handbook of sandwich construction*. CradleyHeath, WestMidlands: Engineering Materials AdvisoryServices Ltd. 370 s. 1993. ISBN 09-478-1796-4.
25. Manufacturing. *Welcome to NetComposites* [online].
26. Prepreg Technology. *Hexcel.com – Technology Manuals* [online].
27. Honeycomb Sandwich Design Technology. *Hexcel.com – Technology Manuals* [online].
28. Microfabricator. *New 3D Printing Material Mimics Light Weight Balsa Wood for use in Wind Turbine Construction* [online]. 2014.
29. DITTENBER, David B.; GANGARAO, Hota VS. Critical review of recent publications on use of natural composites in infrastructure. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2012, 43.8: 1419-1429.
30. AHMAD, Furqan; CHOI, Heung Soap; PARK, Myung Kyun. A review: Natural fiber composites selection in view of mechanical, light weight, and economic properties. *Macromolecular materials and engineering*, 2015, 300.1: 10-24.

31. UMI ČVUT. *Kompozitní materiály* [online].
32. FS VŠB. *Nauka o materiálu* [online]. Dostupné na https://www.fs.vsb.cz/export/sites/fs/330/.content/files/Slide14_Kompozity.pdf
33. KRATOCHVÍL, Bohumil, Václav Švorcík a Dalibor Vojtěch. *Úvod do studia materiálů*. vyd. 1. Praha: VŠCHT. 190 s. 2005. ISBN 80-708-0568-4.
34. CHAPPLE, S.; ANANDJIWALA, R. Flammability of natural fiber-reinforced composites and strategies for fire retardancy: a review. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 2010, 23.6: 871-893.
35. ENTROPY RESINS. *How to guides* [online] Dostupné na <https://entropyresins.com/how-to-guide/>
36. ARKEMA. *Recycling of Elium composites* [online]. 2017.
37. POLÁČEK, Petr. *Vláknové kompozitní materiály – znovuobjevený typ materiálu?* [online]. Chempoint, VUT v Brně – Fch. 2011.
38. RAAB, Miroslav. *Materiály a člověk: Netradiční úvod do současné materiálové vědy*. Encyklopedický dům. 230 s. 1999. ISBN 80-86044-13-0.
39. AVIATION. *Why are the leading edges on the Boeing 787 made from aluminium?* [online].
40. NATURAL FIBERS 2009. *15 Natural fibers: Ancient fabrics, high-tech geotextiles* [online]. Dostupné na <http://www.naturalfibres2009.org/en/fibres/index.html>
41. AIREX BALTEK BANOVA. *Baltek Structural balsa cores* [online]. Dostupné na <http://www.airexbaltekbanova.com/baltek-balsa.html>
42. SPIBI. *Balsa* [online]. Dostupné na <http://prace-se-drevem.spibi.cz/Drevo-Druhy-Balsa.html>
43. NAUTIC EXPO. *Material and paints* [online]. Dostupné na <http://www.nauticexpo.com/prod/cel-components-srl/product-34324-257545.html>
44. HexWeb Honeycomb Attributes and Properties. *Hexcel.com – Technology Manuals* [online]. Dostupné online na: http://www.hexcel.com/user_area/content_media/raw/HexWebHoneycombAttributesandProperties.pdf
45. BĚHÁLEK, Luboš. *Polymery*. Svitavy: SOU Svitavy, 2014. ISBN: 978-80-8805868-7.
46. DUCHÁČEK, Vratislav. *Polymery-výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. 2. vyd. Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, Praha 2006. ISBN 80-7080-617-6.

47. SOJKA, Jaroslav, Váňová Petra. *Základy progresivních konstrukčních materiálů*. Ostrava: VŠV-TU Ostrava. 2013. ISBN: 978-80-248-2578-6.
48. SEIDL, Martin. *Stroje pro zpracování polymerních materiálů*. Svitavy: SOU Svitavy, 2014. ISBN: 978-80-88058-71-7.
49. DuFLEX. *Boat Construction Techniques*. 2007-2011.
Dostupné na: http://duflex.com.au/duflex2/boatbuilding_techniques
50. BARTH, Martha; CARUS, M. Carbon footprint and sustainability of different natural fibres for biocomposites and insulation material. *Bio-based Economy, Services of Nova-Institute www.bio-based.eu/ecology*. Accessed, 2015, 18.
51. ČSN, E. N. 310 (49 0147), 1995: Desky ze dřeva–Stanovení modulu pružnosti v ohybu a pevnosti v ohybu. *Český normalizační institut, Praha*.
52. ČSN, ENISO. 14125. *Vlákný vyztužené plastové kompozity-Stanovení ohybových vlastností*. Český normalizační institut, 1999.
53. PAKOSTOVÁ, Věra. *Textilní vlákna*. Text k semináři. Brno. 2010.
54. PERVAIZ, Muhammad; SAIN, Mohini M. Carbon storage potential in natural fiber composites. *Resources, conservation and Recycling*, 2003, 39.4: 325-340.
55. POORTER, Hendrik. Interspecific variation in the growth response of plants to an elevated ambient CO₂ concentration. In: *CO₂ and Biosphere*. Springer, Dordrecht, 1993. p. 77-98.
56. LI, Xue; TABIL, Lope G.; PANIGRAHI, Satyanarayan. Chemical treatments of natural fiber for use in natural fiber-reinforced composites: a review. *Journal of Polymers and the Environment*, 2007, 15.1: 25-33.
57. JOHN, Maya Jacob; THOMAS, Sabu. Biofibres and biocomposites. *Carbohydrate polymers*, 2008, 71.3: 343-364.
58. WAMBUA, Paul; IVENS, Jan; VERPOEST, Ignaas. Natural fibres: can they replace glass in fibre reinforced plastics?. *composites science and technology*, 2003, 63.9: 1259-1264.
59. DAHLKE, B., et al. Natural fiber reinforced foams based on renewable resources for automotive interior applications. *Journal of cellular plastics*, 1998, 34.4: 361-379.
60. VAN DE VELDE, Kathleen; KIEKENS, Paul; VAN LANGENHOVE, Lieva. Basalt fibres as reinforcement for composites. In: *Proceedings of 10th international conference on composites/nano engineering, University of New Orleans, New Orleans, LA, USA*. 2003.
61. BASALTEX a.s.. *Charakteristika čedičových vláken*. [online]

9 SEZNAM GRAFŮ

Graf 1: Srovnání cen za 1 kg vlákna. [29]	27
Graf 2: Závislost modulu pružnosti na ceně za 1 m ³ materiálu [30].....	27
Graf 3: Závislost pevnosti v tahu na ceně za 1 m ³ materiálu [30]	28
Graf 4: Produkce emisí CO ₂ na tunu přírodního vlákna [50]	30
Graf 5: 95 % interval spolehlivosti skupin	56
Graf 6: Naměřené hodnoty s nejvyššími naměřenými daty z každé skupiny.....	58
Graf 7: Souhrn měřených hodnot testovaných skupin	61

10 SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Srovnání vybraných mechanických vlastností u vybraných typů vláken [10,11].....	22
Tabulka 2: Srovnání hodnot energetické náročnosti skelného a lněného vlákna [16]	29
Tabulka 3: Mechanické vlastnosti vybraných matric [11]	34
Tabulka 4: Testované skupiny se základním popisem materiálů	44
Tabulka 5: Poměry míchání komponentů pro dvousložkové matrice.....	48
Tabulka 6: Získané hodnoty modulu pružnosti v ohybu	54
Tabulka 7: Získané hodnoty pevnosti v ohybu	55
Tabulka 8: Naměřené hodnoty maximálního průhybu těles	57
Tabulka 9: Naměřené hodnoty průměrného maximálního zatížení těles	57
Tabulka 10: Získaná data hustoty vzorků při vzdušné vlhkosti 50 %.....	59
Tabulka 11: Získaná data relativní vlhkosti vzorků při vzdušné vlhkosti 50 %	59
Tabulka 12: Evaluace a zhodnocení měřených mechanických a fyzikálních vlastností skupin	63

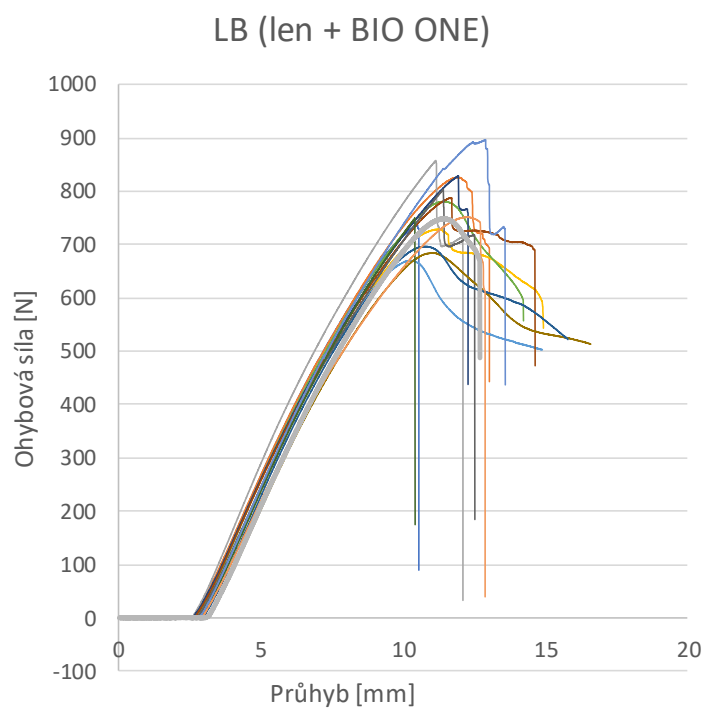
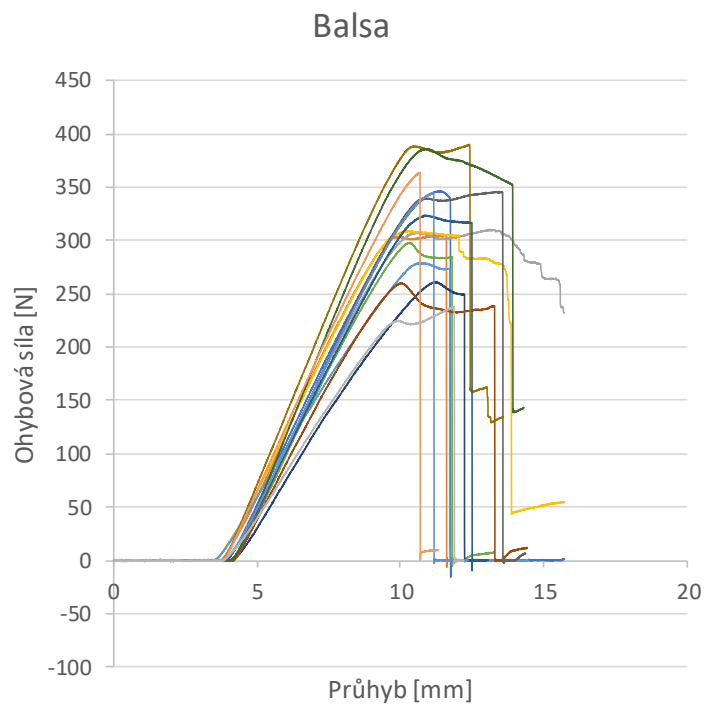
11 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Materiálové zastoupení v konstrukci letadla Boeing 787 [39]	14
Obrázek 2: Rozdělení kompozitních materiálů: [33]	15
Obrázek 3: Schéma uspořádání vláken ve výztužích: [31]	16
Obrázek 4: 1) skelná tkanina, 2) Uhlíková tkanina, 3) Aramidová tkanina	17
Obrázek 5: Rozdělení vláken [6]	19
Obrázek 6: Struktura vlákna [4]	21
Obrázek 7: Jutové vlákno [40]	23
Obrázek 8: Konopné vlákno [40]	24
Obrázek 9: Lněné vlákno [40]	24
Obrázek 10: Druhy vazeb [26]	26
Obrázek 11: Porovnání mechanických vlastností sendvičové struktury [44]	35
Obrázek 12: Balsa [43]	37
Obrázek 13: Schéma využití balsy v konstrukčním řešení listu větrné turbíny [28]	37
Obrázek 14: Tuhá pěna značky Airex [43]	38
Obrázek 15: Voština značky Nomex® [43]	39
Obrázek 16: Schéma technologie ručního kladení a stříkání [25]	40
Obrázek 17: Schéma technologie vakuování/podtlakového lisování [26]	41
Obrázek 18: Schéma technologie lisování za zvýšené teploty [27]	42
Obrázek 19: Rozložení napětí v sendvičové struktuře [23]	43
Obrázek 20: poruchy sendvičových struktur [52]	43

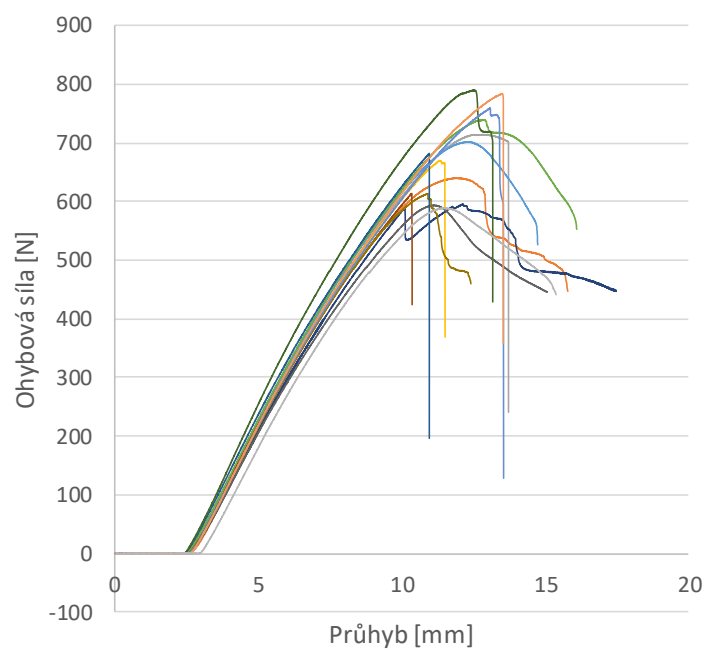
Obrázek 21: Průřez skladbou testované sendvičové konstrukce	45
Obrázek 22: Suchá (vlevo) a vytvrzená (vpravo) skladba sendvičové konstrukce	47
Obrázek 23: Čtyři skupin z šesti vyrobených	48
Obrázek 24: Zkušební přístroj TIRA test 2850 použitý pro mechanickou zkoušku	49
Obrázek 25: Schéma zkušebního zařízení; [51]	50
Obrázek 26: Delaminace vnější krycí vrstvy tělesa skupiny LE (Elium)	60
Obrázek 27: Srovnání kvality prosycení přírodních vláken	62
Obrázek 28: Mikroskopický snímek:	63

PŘÍLOHY

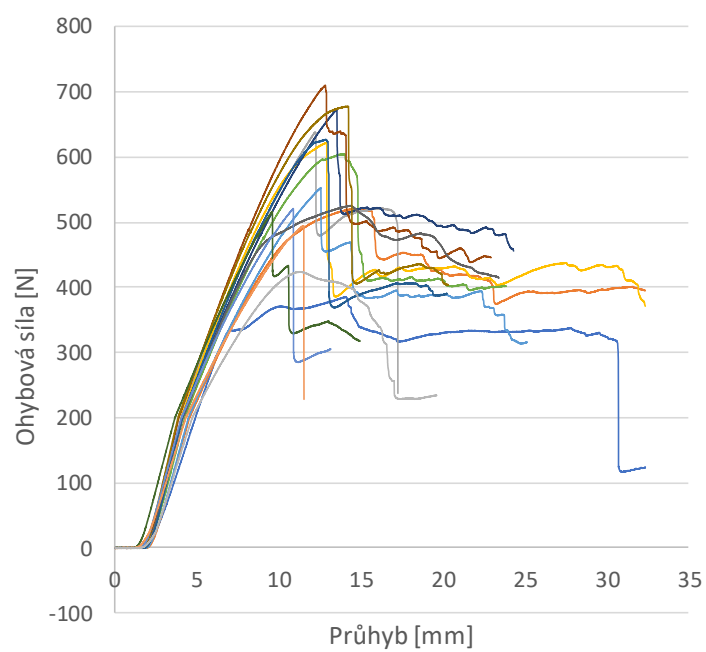
Příloha č. 1: Grafy průhybů testovaných skupin



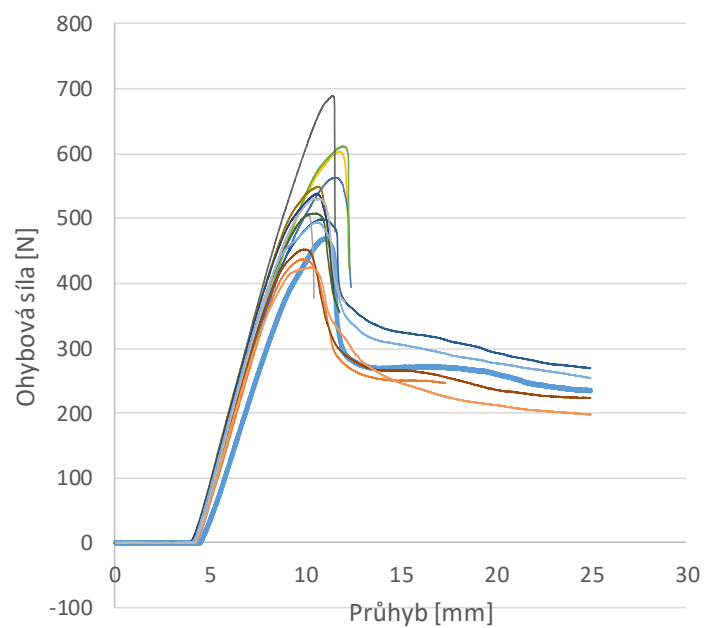
LC (len + SAP CLR)



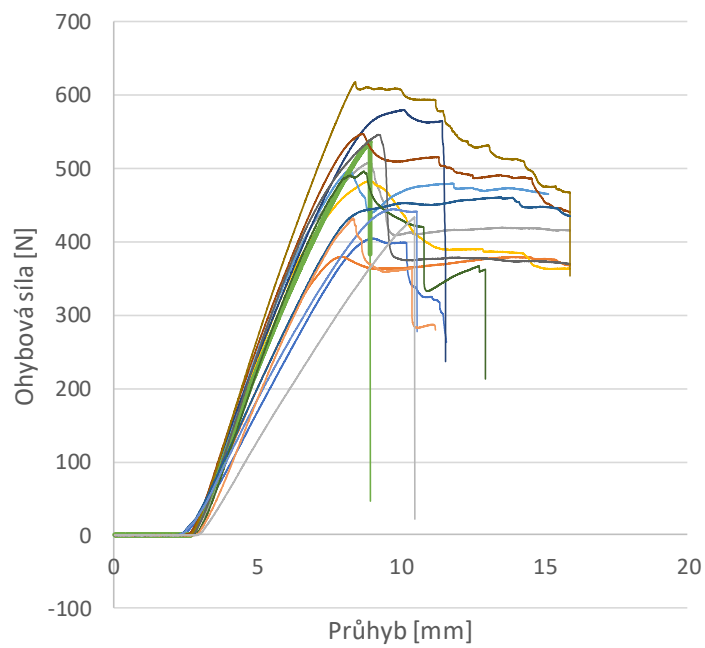
LE (len + Elium)



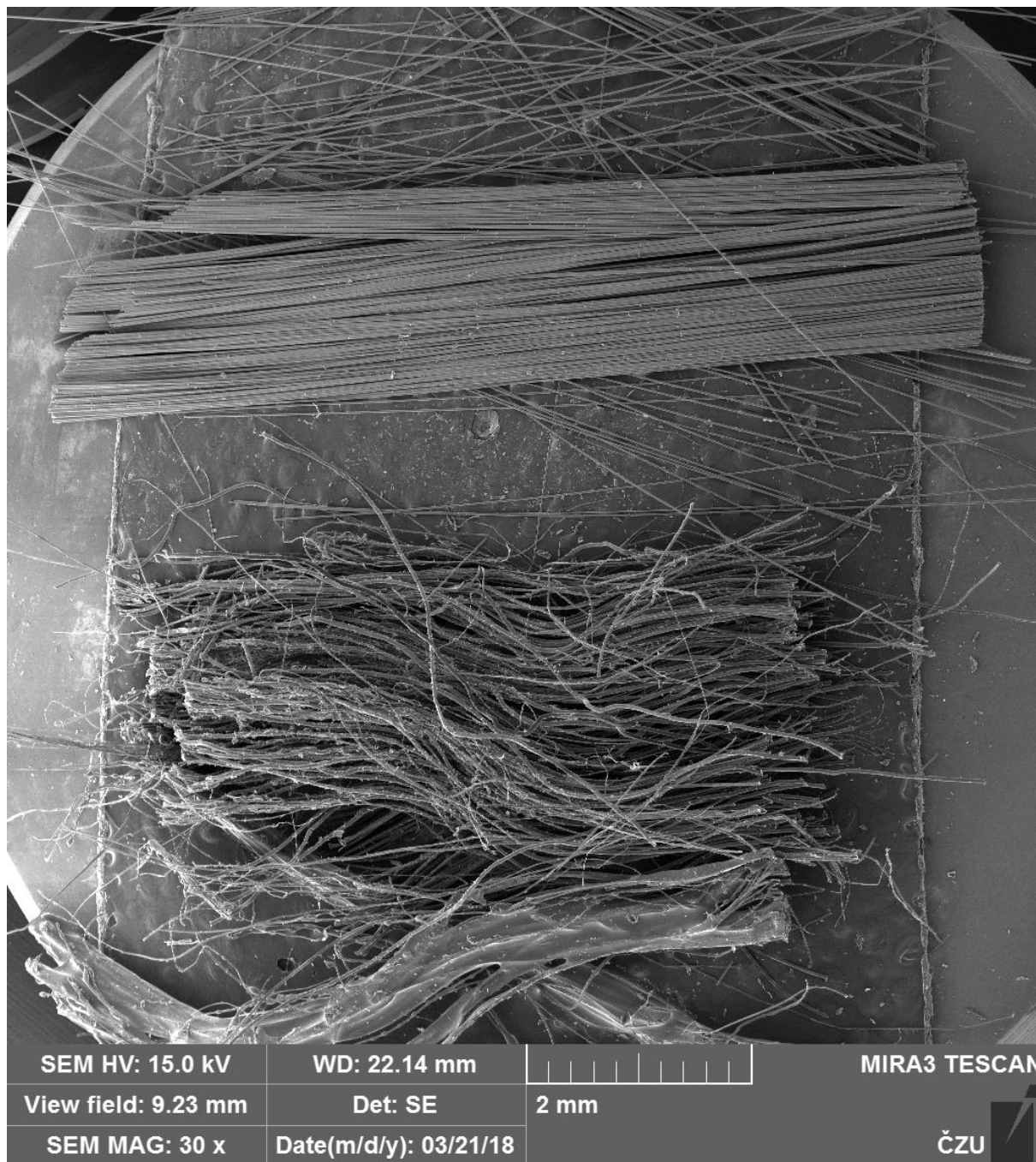
SC (SAP CLR)



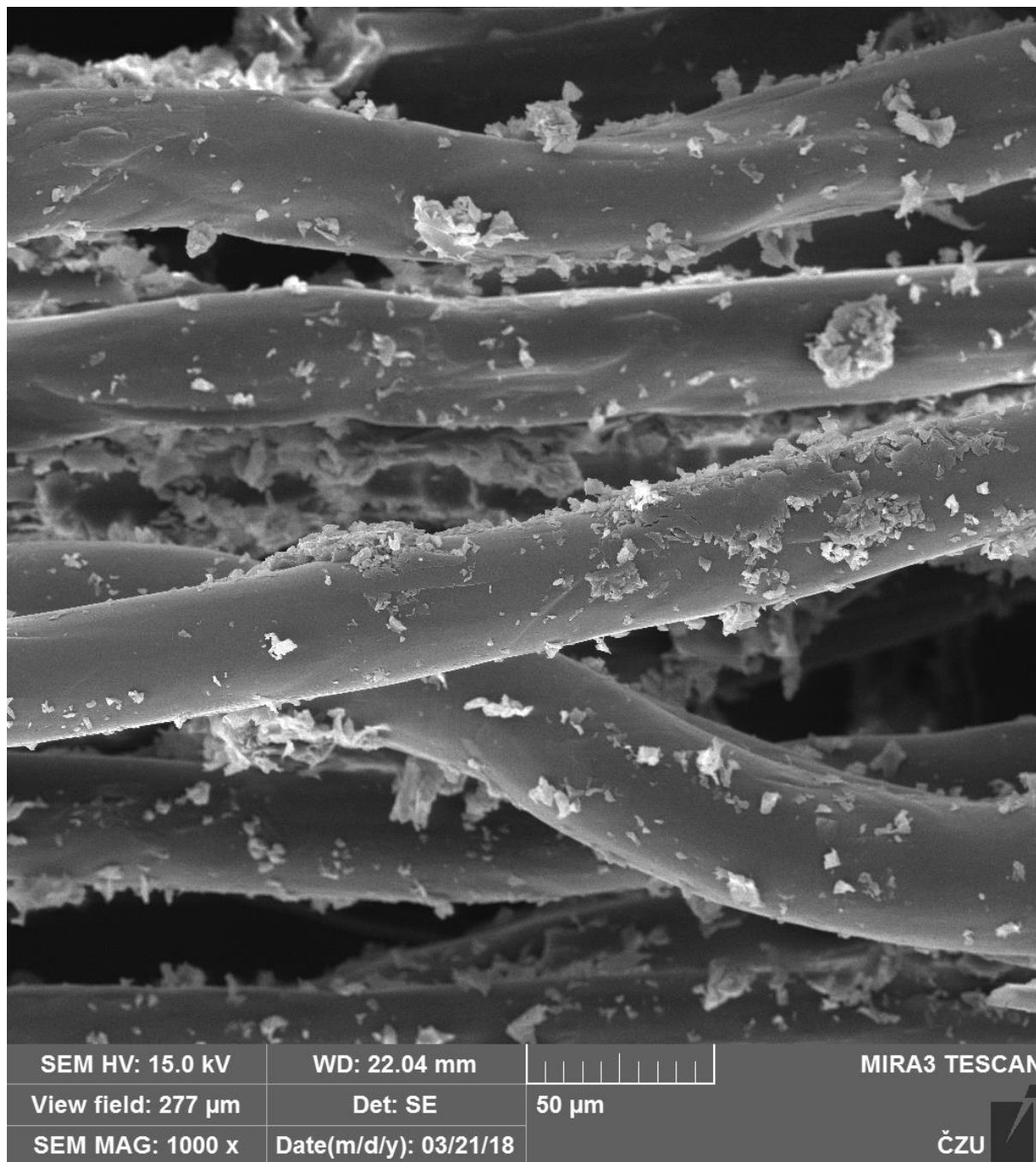
SE (sklo + Elium)



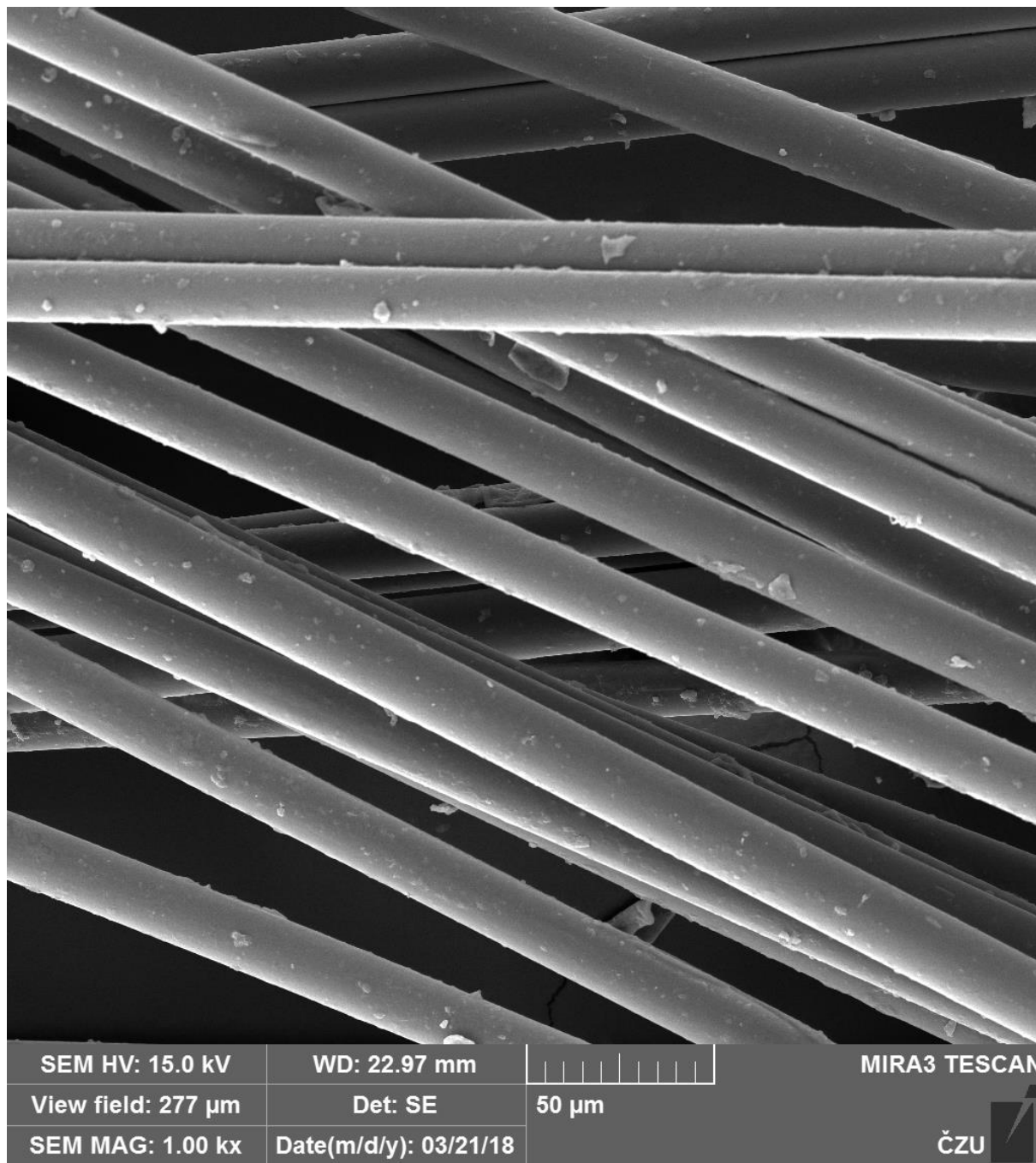
Příloha č. 2: Snímek pořízený elektronovým mikroskopem MIRA 3 TESCAN Iněného (dolní) a skelného (horní) vlákna při 30ti násobném zvětšení.



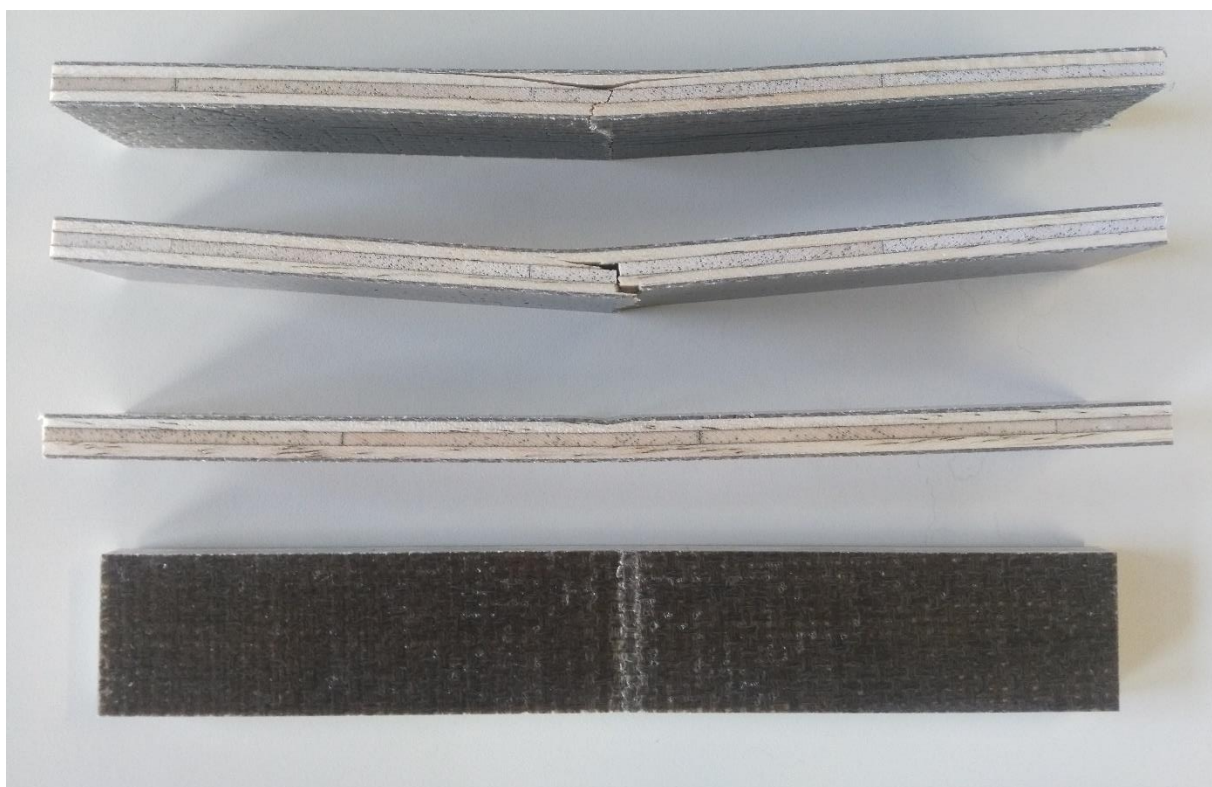
Příloha č. 3: Snímek pořízený elektronovým mikroskopem MIRA 3 TESCAN Iněného vlákna při 1000 násobném zvětšení.



Příloha č. 4: Snímek pořízený elektronovým mikroskopem MIRA 3 TESCAN skelného vlákna při 1000 násobném zvětšení.



Příloha č. 5: Porušené vzorky mechanickým zatížením



Příloha č. 5a: Vzorek LB (výztuž: len, matrice: SAP ONE reaktoplast)



Příloha č. 5b: Vzorek LC (výztuž: len, matrice: SAP CLR reaktoplast)



Příloha č. 5c: Vzorek LE (výztuž: len, matrice: Arkema Elium 188 termoplast)



Příloha č. 5d: Vzorek SE (výztuž: sklo, matrice: Arkema Elium 188 termoplast)

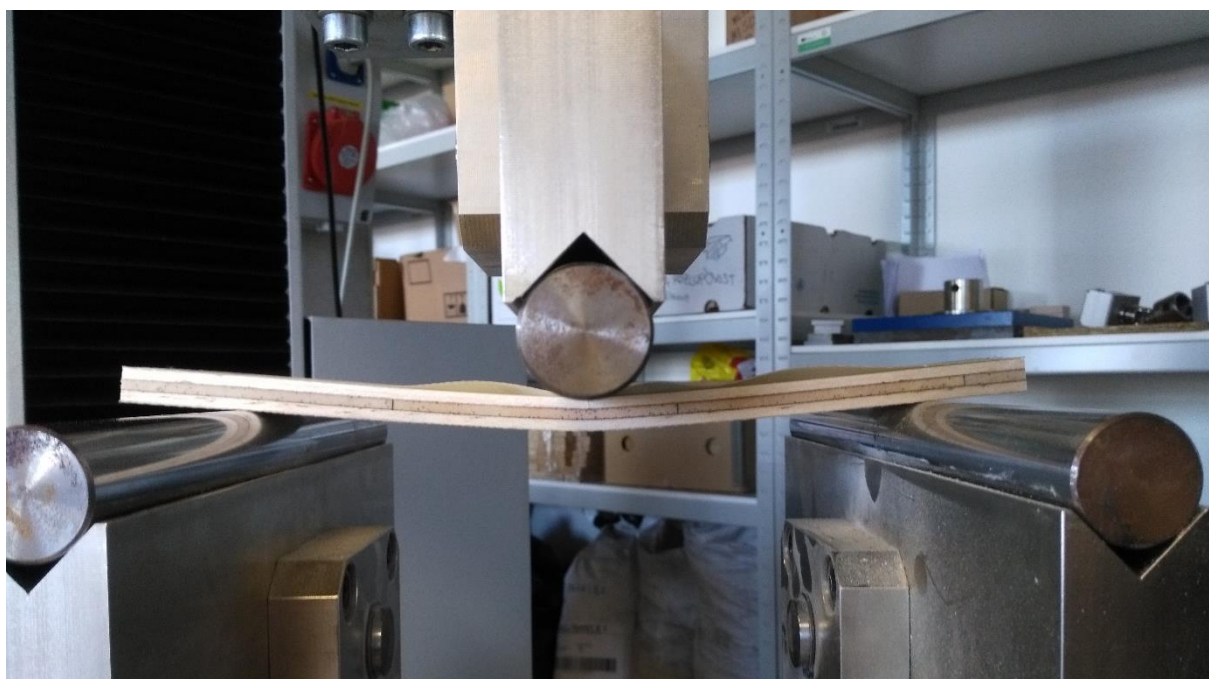


Příloha č. 5e: Vzorek SC (výztuž: sklo, matrice: SAP CLR reaktoplast)

Příloha č. 6: Neprosycená vnitřní strana vnější výztuže



Příloha č. 7: Delaminace vzorků SE v průběhu mechanické zkoušky



Příloha č. 8: Turkeyův test pro hodnoty pevnosti v ohybu

Tukey HSD test; variable Fm (Zpracovaná data_13.4.2018)
 Approximate Probabilities for Post Hoc Tests
 Error: Between MS = 28,539, df = 84,000

Cell No.	TKANINA	PRYSKYŘICE	{1}	{2}	{3}	{4}	{5}	{6}	{7}	{8}	{9}	{10}	{11}	{12}
			15,764	----	----	----	----	38,506	31,632	28,290	----	----	24,901	24,578
1	-	-						0,000124	0,000124	0,000124			0,000269	0,000404
2	-	SAP ONE												
3	-	SAP CLR												
4	-	Elium 188												
5	len 400 g/m2	-												
6	len 400 g/m2	SAP ONE	0,000124					0,008855	0,000138				0,000124	0,000124
7	len 400 g/m2	SAP CLR	0,000124					0,008855	0,527128				0,011079	0,006660
8	len 400 g/m2	Elium 188	0,000124					0,000138	0,527128				0,511530	0,407784
9	sklo 390 g/m2	-												
10	sklo 390 g/m2	SAP ONE												
11	sklo 390 g/m2	SAP CLR	0,000269					0,000124	0,011079	0,511530				0,999984
12	sklo 390 g/m2	Elium 188	0,000404					0,000124	0,006660	0,407784			0,999984	