

VĚDECKÉ SPISY VYSOKÉHO UČENÍ TECHNICKÉHO V BRNĚ

Edice Habilitační a inaugurační spisy, sv. 798

ISSN 1213-418X

Jan Zouhar

TECHNOLOGIE VÝROBY KOMPOZITŮ S PŘÍRODNÍMI VLÁKNY A VLIV NA JEJICH VLASTNOSTI

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
Ústav strojírenské technologie

Ing. Jan Zouhar, Ph.D.

TECHNOLOGIE VÝROBY KOMPOZITŮ S PŘÍRODNÍMI VLÁKNY A VLIV NA JEJICH VLASTNOSTI

MANUFACTURING TECHNOLOGY OF NATURAL FIBRE COMPOSITES
AND INFLUENCE ON THEIR PROPERTIES

ZKRÁCENÁ VERZE HABILITAČNÍ PRÁCE
V OBORU STROJÍRENSKÁ TECHNOLOGIE



BRNO 2024

KLÍČOVÁ SLOVA

Kompozity, lněná vlákna, hybridní kompozit, obrábění kompozitů, mechanické zkoušky

KEYWORDS

Composites, flax fibers, hybrid composite, machining of composites, mechanical testing

MÍSTO ULOŽENÍ PRÁCE

Areálová knihovna Fakulty strojního inženýrství,
Vysoké učení technické v Brně, Technická 2896/2, 616 69 Brno

© Jan Zouhar, 2024

ISBN 978-80-214-6270-0

ISSN 1213-418X

OBSAH

PŘEDSTAVENÍ AUTORA.....	4
1 ÚVOD.....	5
1.1 Přírodní vlákna	7
2 MECHANICKÉ VLASTNOSTI KOMPOZITŮ S PŘÍRODNÍMI VLÁKNY.....	11
2.1 Analýza pórovitosti	11
2.2 Mechanické vlastnosti KPV – pevnost.....	14
3 FREKVENČNÍ CHARAKTERISTIKA A ÚTLUM HLUKU KPV	19
4 OBRÁBĚNÍ KOMPOZITU S LNĚNÝMI VLÁKNY.....	21
4.1 Statistické vyhodnocení DOE	24
5 ZÁVĚR	29
LITERATURA	31
ABSTRAKT.....	34
ABSTRACT.....	34

PŘEDSTAVENÍ AUTORA

Ing. Jan Zouhar, Ph.D., vystudoval magisterský obor Aplikovaná mechanika na Fakultě strojního inženýrství Vysokého učení technického v Brně (FSI VUT). V rámci magisterského studijního programu se specializoval na modelování teplotních polí na vstřikovacích formách pro duroplastické materiály, což bylo také téma jeho diplomové práce. V doktorském studiu pokračoval na Ústavu strojírenské technologie, kde v roce 2009 úspěšně obhájil dizertační práci na téma „Vývoj výkonných frézovacích nástrojů s využitím CAD/CAM a analýzy mechanismu tvorby třísky“. Od doby svého doktorského studia se Ing. Jan Zouhar podílel na řadě vědecko-výzkumných projektů včetně národních a mezinárodních iniciativ jako TREND (TAČR) a projekty MPO. Jako hlavní řešitel vede projekty zaměřené na vývoj pokročilých kompozitních materiálů a technologie, což zahrnuje interdisciplinární spolupráci v oblasti aplikovaných mechanik a průmyslových technologií. Během své kariéry působil ve významných českých firmách včetně MCAE Systems s. r. o., kde se zabýval inovacemi v oblasti 3D skenování, 3D tisku a pokročilého obrábění, a MSR Engines s. r. o., kde vedl vývoj a výrobu kompozitních materiálů a byl zodpovědný za vytvoření nové divize zaměřené na kompozitní materiály a jejich sériovou výrobu.



Na Ústavu strojírenské technologie se podílí na úspěšném vedení projektů, které vedly k vývoji prototypů a funkčních vzorů, jež byly následně úspěšně komercializovány. Mezi tyto projekty patří například program MPO TRIO – FV40173, zaměřený na vývoj nové řady bimetalových trubkových oblouků 180° s prodlouženými konci a návary ze superslitiny včetně technologie jejich výroby a návrhu metodiky testování. Dále také Program TREND TAČR – FW01010220, který se zaměřuje na návrh zařízení a technologie pro automatizaci plošného navařování materiálu Inconel 625 na membránové stěny. V oblasti kompozitních materiálů byl hlavním řešitelem projektu OP-PIK 2021, který se týkal znalostního transferu a návrhu pevnostní analýzy karbonového rámu elektromotocyklu.

Aktivně se zapojuje do přípravy dalších interdisciplinárních projektů, jejichž cílem je zejména propojit univerzitní výzkumné aktivity s potřebami průmyslové praxe.

Ve své pedagogické praxi na Ústavu strojírenské technologie FSI VUT se Jan Zouhar podílí na výuce a vedení závěrečných prací v oborech aplikovaná mechanika, CAD/CAM technologie a kompozitní materiály. Uchazeč se rovněž věnuje pedagogické praxi, tedy výuce a vedení závěrečných magisterských a bakalářských prací se zaměřením na strojírenskou technologii, kompozitní materiály, aplikace robotizace. Uchazeč aktivně publikuje, v databázi Thomson Reuters (WoS) má 23 publikací, počet citací bez autocitací 61 s h-indexem = 5. V databázi Scopus má 25 publikací, které jsou 86krát citovány bez autocitací a h-index = 5. Uchazeč rovněž vypracovává posudky v odborných časopisech.

1 ÚVOD

Kompozitní materiály nalezneme jak v běžné přírodě ve formě dřeva – lignin vs. vlákna celulózy, tak v prostředí kolem nás vytvořeném člověkem. Ve stavebnictví je vyztužený beton základním prvkem, plasty s příměsí jsou již také dnešním standardem a dalších příkladů bychom našli celou řadu. Kompozity zaujímají stále větší procento výrobků vzhledem ke svým výjimečným vlastnostem, zejména váhou vůči pevnosti, a v některých aplikacích vynikají cenou vůči dalším vlastnostem. Lidé je využívají již od pradávna, kdy se v Mezopotámii začaly do cihel vyrobených z bahna přidávat různá přírodní vlákna pro získání vyšší pevnosti. Rozmachu ale kompozity dosahují v druhé polovině 20. století, kdy se začínají prosazovat zejména v letecké technice, na ni jsou navázány další obory, jako jsou chemický průmysl, stavebnictví, doprava, sportovní potřeby až po běžné spotřební zboží.

Exponenciálně rostoucí zájem o životní prostředí a ekologii a rostoucí význam udržitelnosti v poslední době podnítily pokrok ve vývoji materiálů na biologické bázi jako alternativních řešení a používání recyklovatelných výrobků. Proto se v průmyslovém světě objevují polymery vyztužené přírodními vlákny, které si získávají velký zájem výzkumníků a inženýrů. Poskytují alternativní řešení, které umožňuje překonat závažné ekologické a environmentální problémy, jež vyvolávají syntetická vlákna (uhlíková, skleněná, aramidová): neobnovitelné zdroje (vyčerpání fosilních paliv), značná energetická náročnost výroby, vysoké emise skleníkových plynů a toxických látek, problémy s nakládáním s odpady, nerozložitelnost atd. Kromě uvědomění si ekologické střízlivosti a odpovědnosti za životní prostředí se stále větší význam přikládá jak stabilitě, řízení a výkonnosti systémů, tak pohodlí, bezpečnosti a ochraně člověka.

O významu tématu a celospolečenském zaměření svědčí i zařazení do výzvy HORIZON-JU-CBE-2023-IA-07 High performance, circular-by design, biobased composites, která zapadá do rámce strategie EU pro biohospodářství, akční plán pro oběhové hospodářství, iniciativa pro udržitelné výrobky (SPI), jakož i iniciativa Nový evropský Bauhaus a průmyslová strategie EU [1]. Tato se přímo zabývá využitelností kompozitů na bázi přírodních vláken. Rovněž soukromý sektor v čele s velkými automobilkami, jako jsou Volvo, Mercedes-Benz a další, prosazuje integraci těchto přírodních materiálů do stálé produkce. ŠKODA AUTO ve svých vozech také již začíná aplikovat tyto materiály a objevují se stále více v prototypch nových a zkoumá se jejich potenciál [2]. V oblasti motorsportu (FIA) a jachtingu (World sailing) dvě celosvětově největší sportovní federace ustanovily cíle udržitelnosti a povinné využívání těchto materiálů nejpozději do roku 2030, dnes již 10 % karoserie závodních vozů formule E musí být z těchto materiálů [3].

Kompozity vyztužené přírodními vlákny se staly populárními zejména v automobilovém a stavebním průmyslu. Vzhledem k jejich příznivé ceně a hmotnosti jsou velmi atraktivní pro výrobu automobilových a leteckých komponentů, rámů jízdních kol, okenních rámů, sportovního vybavení atd. [4]. Uplatnění nacházejí v automobilech jako Mercedes-Benz, Ford, Toyota, BMW a v mnoha dalších, přičemž trend se stále zvyšuje. Adekomaya [5] uvádí, že náhradou vnitřních panelů dveří lze ušetřit až 20 % hmotnosti při dodržení standardů bezpečnosti posádky. Většinou se jedná o kombinaci vláken sisal/len/konopí. Také uvádí, že kromě toho snahy o ochranu životního prostředí podporují používání extrémně lehkých materiálů za účelem snížení spotřeby paliva vozidel, což vede ke snížení emisí oxidu uhličitého. Proto se skleněná vlákna (v minulosti velmi oblíbená) stávají méně atraktivními kvůli své hmotnosti a obtížné recyklaci. Automotive trh přispívá ke značné globalizaci trhu a k využití bio-kompozitních vláken v masovém měřítku. Využití lze také nalézt v motorsportu, kde jedním z prvních průkopníků je firma Porsche Motorsport, která vyrobila šasi závodního speciálu Cayman [6] (viz obr. 1.1) nebo projekt sedačky McLaren určený pro vozy F1 [7].



Obr. 1.1 Lněné šasi závodního Porsche Cayman [6]

V dalších aplikacích se lze setkat s využitím ve stavebnictví, kde jsou rozšířené různé panely jak pro dekorální účely, tak pro své unikátní vlastnosti, jakými jsou tlumení vibrací. Jedním z významných trhů jsou tepelné izolační panely, kde dochází k velmi strmému rozvoji [8]. V oblasti letectví materiály narážejí na legislativní proces certifikace a přísné normy, které definují vlastnosti materiálů zejména v oblasti samozhášivosti, dýmání atd. Jiné kompozity (zejména uhlíková a skelná vlákna) jsou zde již rozšířená, přírodní jsou ale díky své nízké specifické hmotnosti ideálním materiálem jak pro nestrukturální aplikace, tak pro využití v hybridních kombinacích nebo sendvičových konstrukcích. Vlastnosti uvedené výše lze upravit využitím vhodné pryskyřice a povrchových úprav materiálů [9].

V oblasti lodního (marine) průmyslu jsou již léta zavedenými materiály skelné vlákno s polyesterovou maticí. Zejména v posledních letech, kdy již dosluhují první vyrobené strukturální trupy z 60. až 70. let 20. století, se ukazují jako problémy jejich recyklace a bezpečná likvidace jak na souši, tak ve vodním prostředí v případě havárie. Zde se kromě interiérových prvků větších plavidel objevují i strukturální aplikace zejména lněných kompozitů jako třeba u firmy Baltic modelu Café Racer 68, kdy jde o trup dlouhý 20,73 m a kde je využit len v 50 % výplně [10]. V případě sportování dětí se lze setkat s one-design plachetnicí Optimist, která váží pouhých 35 kg [11].

Atraktivní vzhled kompozitů s přírodními vlákny (KPV) velmi podobný dřevu je také hojně využíván pro stavbu nábytku a různých doplňků. Ve sportovním světě se využívají vlastnosti i mechanické – zejména tlumení pro konstrukce lyží a snowboardů, kajaků, surfů rámu kol a mnoha dalších komponent [12].

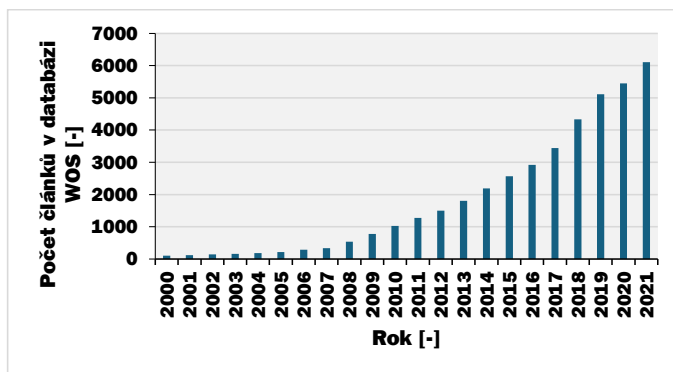
Nicméně kompozity z přírodních vláken vykazují slabou mezifázovou adhezi mezi vlákny a maticí, což souvisí s jejich vysokou hydrofilností a hydrofobní povahou polymerních matic, a velmi proměnlivé chemicko-fyzikální a mechanické vlastnosti ve srovnání se syntetickými vlákny: omezený rozsah teplot zpracování, nízkou odolnost proti nárazu a nízkou tepelnou stabilitu. Proměnlivost jejich vlastností je způsobena jejich vysokou závislostí na sklizni, klimatu, půdě a počasí a na zemědělských postupech, pěstebních technikách a podmínkách rostlin, mechanické extrakci a výrobě svazků [13]. Tyto nevýhody negativně ovlivňují dlouhodobou trvanlivost kompozitů KPV, omezují jejich použití na nekonstrukční a polo-konstrukční součásti (např. dveřní výplně, palubní desky, sportovní vybavení) a zpomalují tak jejich integraci do vysoce výkonných aplikací.

Tato práce si klade za cíl výzkum vlastností kompozitů s přírodními (lněnými) vlákny v závislosti na jejich technologii výroby a dalším zpracování, zejména obrábění. V technologické praxi jsou výrobní metody již dobře známy pro standardní materiály výztuže a matrice. V případě využití přírodních vláken se vyskytují určitá specifika, která mohou ovlivnit výsledný laminát po stránce pevnosti, váhy a zejména vůči odolnosti vnějšího prostředí – vlhkosti. Komplexní

znalost postupů výroby, složení materiálu a jejich vztahy dovolují poté realizovat návrh reálných dílců pro určené podmínky funkčního dílce. Experimenty a jejich plánování uvedené v této práci proto sledují praktický přesah reálné výroby a vzorky vyrobené a testované vycházejí z potřeb výrobní praxe tak, aby výsledky byly dobře aplikovatelné pro hledání vhodných řešení v průmyslové praxi. Zpracování tohoto tématu nabízí FSI VUT v Brně možnost aplikace nových poznatků v oblasti projektové, výzkumné a pro spolupráci s průmyslem.

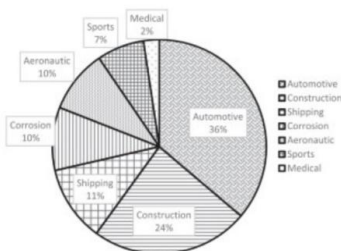
1.1 PŘÍRODNÍ VLÁKNA

Téma použití přírodních vláken je dnes velmi rozšířeno a věnuje se mu mnoho výzkumů zejména z oblasti pěstování rostlin s možností jejich využití. Nejvíce výzkumů pochází z asijských zemí, Blízkého východu a Brazílie. Z evropských zemí se problematikou nejvíce zabývají ve Francii a v Polsku. Na obrázku 1.2 lze vidět graf publikací z databáze WOS za posledních 21 let, které se zabývají přírodními vlákny a jejich kompozity. Pokud bychom vyhledávali pouze „natural fibre“, dostaneme se k číslu článků 18 228 pro rok 2021. V České republice se tématu dlouhodobě věnuje Technická univerzita v Liberci, jedná se zejména o práce zaměřené na využití vláken a jejich dalších využití jak pro textilní průmysl, tak pro výrobu kompozitů. Z dalších pracovišť jsou to ČVUT a VUT v Brně se zaměřením na stavební materiály a princip recyklace.



Obr. 1.2 Počet publikací odpovídající vyhledávání „natural fibre composite“ v databázi WOS

Aplikační potenciál (viz obr. 1.3) přírodních vláken uvádějí ve své studii Khan et al. [14], a to na základě zkoumání mechanických vlastností jednotlivých vláken s přihlédnutím k ekologickým a environmentálním aspektům (obr. 1.4).

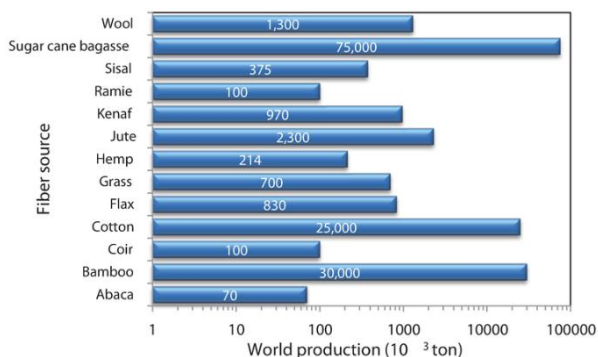


Obr. 1.3 Aplikační potenciál přírodních vláken v kompozitech [14]



Obr. 1.4 Životní cyklus kompozitního výrobku z přírodních vláken [14]

Na druhé straně lněná a jiná přírodní vlákna otevírají nové možnosti pro KPV s vysokým poměrem tuhosti, hmotnosti a lepší recyklovatelnosti [15] [16]. Ve srovnání s kompozity z uhlíkových vláken nabízejí také lepší tlumicí vlastnosti. Největší slabinou kompozitů z přírodních vláken jsou však jejich nižší mechanické vlastnosti, které jsou limitující pro jejich použití [17] [18]. Pečas a kol [19] předložili ucelený přehled vlastností vybraných přírodních vláken používaných jako výztuže v kompozitních materiálech. Jako za jedny z nejvhodnějších pro automobilový průmysl, sportovní vybavení nebo pozemní stavitelství označili lněná vlákna. Kompozity vyztužené lněnými vlákny se používají již od konce 30. let 20. století, ale jejich industrializace se zvýšila až v posledních letech. Kromě toho se v průběhu času vyvíjely výrobní kroky – pěstování a kultivace lnu, zemědělské metody, způsoby rmutování, techniky extrakce vláken, což zlepšilo vlastnosti konečných výrobků [20]. Kandemir a spol. studovali [21] fyzikální, tepelné a mechanické vlastnosti čtyř druhů přírodních vláken – konkrétně juty, kenafu, kuraua a lnu – a uvedli, že kuraua a len vykazují výhodné mechanické vlastnosti srovnatelné s vlastnostmi polymerních kompozitů vyztužených skleněnými vlákny. Roční produkce jednotlivých přírodních vláken uvádí např. Ngo [4] (obr. 1.5). Je zde patrné, že nejvíce jsou produkována ta vlákna, kde je hlavním produktem jiná část rostliny nebo kdy její využití má tradici mimo kompozity.



Obr. 1.5 Roční produkce přírodních vláken [4]

Výzkumníci často diskutují o výhodách kompozitů vyztužených skleněnými a lněnými vlákny, a to nejen z hlediska ochrany životního prostředí. Poilâne et al. [22] zkoumali mez kluzu těchto dvou velmi oblíbených vláken při pokojové teplotě a zdokumentovali, že polymery vyztužené lněnými vlákny vykazují po krátké době pružnosti plastické chování. Kompozity vyztužené lněnými vlákny se navíc vyznačují specifickými vlastnostmi, které nelze charakterizovat jednoznačnými hodnotami vzhledem k jejich silné závislosti na metodě měření (např. hustota) [23]. Zvolená zkušební metoda by proto měla zohledňovat skutečné podmínky, za kterých má být výrobek používán.

Přestože se kompozity vyztužené přírodními vlákny vyznačují (nejen) výše uvedenými pozitivními aspekty, vyrábějí se většinou ze zakroucených přízí z krátkých přírodních vláken, což způsobuje problémy s jejich impregnací. Špatná impregnace zvyšuje pórovitost a zhoršuje mechanické vlastnosti [24]. Vedle citlivosti na vodu je nevýhodou přírodních vláken také proměnlivost mechanických vlastností. Přesto výzkumníci vyvinuli úpravy, které mají uvedené problémy eliminovat, např. ve své studii Whitacre et al. prezentovali [25] pozitivní vliv úprav zeinovým proteinem na zlepšení mechanických vlastností kompozitů vyztužených lněnými vlákny. Dalším řešením je hybridizace; hybridizace kompozitů vyztužených přírodními vlákny zapracováním uhlíkových vláken má pozitivní účinky na vlastnosti výsledných kompozitů. Fehri

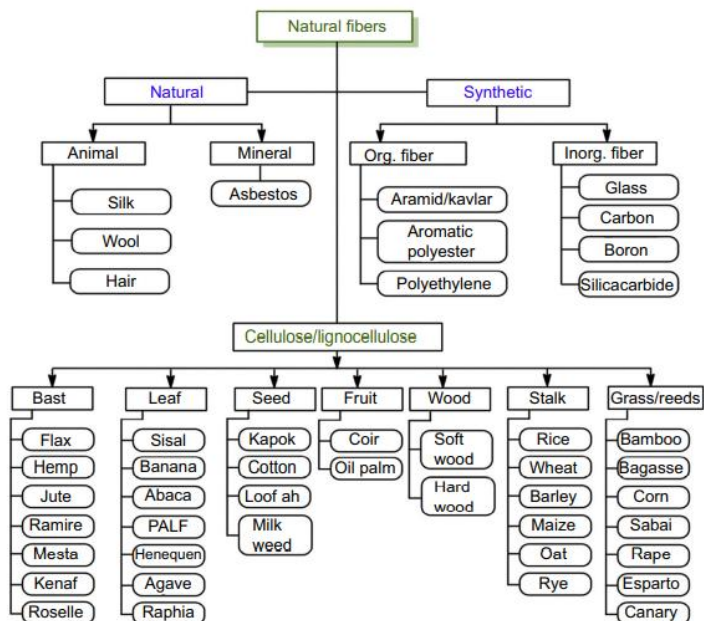
et al. [26] prokázali, že uhlíkové vrstvy aplikované v blízkosti povrchu snižují pórovitost; studie ukázala, že jedna uhlíková vrstva umístěná na povrchu snižuje difuzní koeficient na polovinu jeho hodnoty a obsah vody o 40 %.

Další z nesporných výhod je problematika vibrací, výzkumníci a průmyslové podniky neustále hledají strategie tlumení vibrací a hluku v různých aplikacích, jako jsou automobilový, letecký, námořní a sportovní průmysl. Tlumičí schopnost přispívá ke zvýšení trvanlivosti konstrukcí zejména proti únavě a k jejich odolnosti proti rázu. Bastická vlákna (len, konopí, juta nebo kenaf) vystupují jako nejslibnější výztuže díky své dostupnosti a dobrým tlumicím vlastnostem. Bývají atraktivní alternativou pro použití v technických aplikacích zabývajících se rázovým poškozením a tlumením vibrací. V rámci této práce nebude řešena problematika bio-pryskyřic, tedy matrice s podílem přírodní složky.

Základní dělení přírodních vláken lze vidět na obrázku 1.6, jsou to tyto hlavní skupiny:

1. Lignocelulózová vlákna rostlinného původu (konopí, len, juta, sisal, palmové vlákno, kenaf, datlová palma atd.).
2. Živočišná (hedvábí, vlna a srst).
3. Minerální (azbest).
4. Syntetická (skelná, uhlíková, aramidová atd.).

Vlákna rostlinného původu lze dále dělit dle jejich složení, kdy základem jsou celulóza, lignin a další látky, nebo je lze dělit do skupin dle jejich výskytu na rostlině (stonek, list, skořápka atd.). Díky svému původu se liší délkou, průměrem, složením a tím i možností dalších aplikací. Pro účely kompozitů jsou nejvíce využívána vlákna lnu, konopí, juty, sisalu, kenafu, méně využívaná jsou vlákna datlové palmy, banánovníku a bambusu.



Obr. 1.6 Klasifikace přírodních vláken [27]

Přírodní vlákna, jako jsou len, konopí, juta a kokosová vlákna, mají rozmanité chemické složení, které výrazně ovlivňuje jejich mechanické a fyzikální vlastnosti. Hlavními složkami přírodních vláken jsou celulóza, hemicelulóza a lignin. Celulóza, základní složka, se skládá

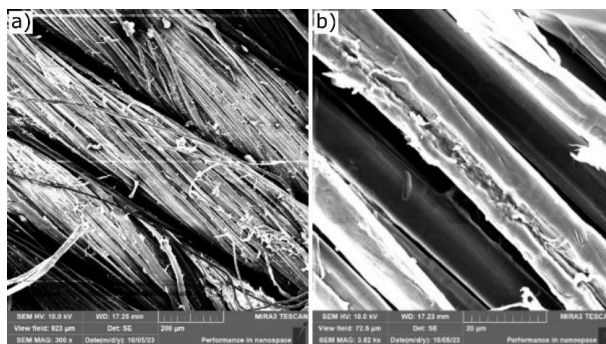
z dlouhých nerozvětvených řetězců beta-D-glukózy, které poskytují vláknům vysokou pevnost v tahu, ale také zvyšují jejich tendenci k absorpci vody. Hemicelulóza má kratší řetězce a nižší molekulovou hmotnost než celulóza, což zajišťuje další variabilitu mechanických vlastností vláken. Lignin je amorfni polymer, který dodává rostlinám strukturální tuhost a má nižší afinitu k vodě, což snižuje nasákavost vláken.

Mechanické vlastnosti přírodních vláken, jako jsou hustota, pevnost v tahu a modul pružnosti, se liší v závislosti na jejich chemickém složení a morfologii, což zahrnuje rozměry a uspořádání buněčných stěn. Vlákná s vyšším obsahem celulózy, jako je len, mají lepší mechanické vlastnosti než vlákná s nižším obsahem celulózy například kokosová vlákná. Vysoký poměr délky k šířce buněk, který se pohybuje až kolem 1 000 u konopí [28], přispívá k lepší mechanické pevnosti kompozitů. Pro zlepšení adheze přírodních vláken k matici v kompozitech se používají různé úpravy, jako jsou chemická modifikace pomocí NaOH [29] nebo fyzikální metody jako UV záření. Tyto úpravy zvyšují smáčivost a povrchovou drsnost, čímž zlepšují spojení vláken s pryskyřicí.

V kompozitních materiálech mají přírodní vlákná výhody, jako jsou nižší hmotnost a lepší tlumení vibrací a hluku, ale také omezení, jako je vysoká nasákavost, která může vést k degradaci materiálu vlivem vlhkosti. Aby se těmto problémům předešlo, používají se povrchové úpravy a ochranné vrstvy, které snižují vodní absorpci. Hybridizace přírodních vláken se syntetickými vlákny, jako jsou uhlík nebo sklo, nabízí možnost kombinace výhod obou typů materiálů, což vede k lepším mechanickým vlastnostem, nižší nasákavosti a lepšímu výkonu při tlumení vibrací [30]. Studie ukazují, že správný výběr a úprava přírodních vláken mohou vést k vytvoření kompozitních materiálů s vynikajícími vlastnostmi vhodnými pro široké spektrum průmyslových aplikací. Výzkum v této oblasti se také zabývá vlivem výrobních technologií a podmínek na porozitu, pevnost a trvanlivost kompozitů, což je klíčové pro jejich praktické využití.

2 MECHANICKÉ VLASTNOSTI KOMPOZITŮ S PŘÍRODNÍMI VLÁKNY

Mechanické vlastnosti hrají jednu z nejpodstatnějších rolí v aplikovatelnosti kompozitů. V první části bylo přistoupeno k výrobě vzorků kompozitů z různých materiálů za použití nejběžnějších výrobních metod pro účely porovnání jejich mechanických vlastností a chování vzhledem k materiálu z lněných vláken. Lněná vlákna byla vybrána na základě rešeršní části jako nejvíce aplikovatelná v průmyslové praxi a také jako nejdostupnější. Pro účely porovnání s dalšími materiály byly zvoleny obdobné gramáže a styly tkaní materiálu. Jsou použity materiály jednosměrné, biaxiální a tkané s keprovou vazbou (twill) – zvolená gramáž je 200 g/m^2 . Jako technologie výroby jsou zvoleny ruční laminace, vakuová infuze (VARTM) a výroba v autoklávu pomocí prepregových materiálů a ruční laminace. Výchozím materiálem jsou zvolena vlákna lněná od výrobce B-Comp. Struktura vláken je viditelná na obrázku 2.1, pryskyřice byla využita LG 700 od výrobce GRM Systems s. r. o.



Poznámka: a) Na přehledových snímcích je patrné rozložení vláken a zákrut vláken. b) Na detailním snímku je patrný charakter povrchu jednotlivých vláken, případně jejich poškození.

Obr. 2.1 Vzorek lněné tkaniny bez úpravy

Výroba KPV pomocí zvolených metod je možná, z hlediska prosycení je nejvýhodnější metoda prepregu a autoklávu, kdy lze snáze dosáhnout požadovaného poměru pryskyřice a vláken. VARTM (infuze) je také dobře proveditelná, je však nutné dodržet přesný technologický postup s dlouhou dobou vakuování materiálu. V případě ruční laminace je materiál problematický z hlediska horší prosytitelnosti a s tím je spojena i větší spotřeba pryskyřice. Materiál je vždy třeba zpracovávat pod tlakem, což je dáno vlivem tkaní materiálu a samotných vláken, která mají oproti skelným nebo uhlíkovým tkaninám větší objem.

2.1 ANALÝZA PÓROVITOSTI

Porozita je jedním z nejdůležitějších aspektů hodnocení při výrobě kompozitních materiálů zejména z přírodních vláken, které již určité procento obsahují ve svých vláknech vlivem lumenů a jejich růstu. Dalším faktem je horší smáčivost vůči pryskyřicím, kterou lze do jisté míry ovlivnit zpracováním a následnou úpravou vláken. Klíčem k určení pórovitosti je znalost poměru vláken k matici, tuto nelze zjistit standardními metodami, jako je spalování. Pro určení pórovitosti u KPV lze využít několik metod, a to:

- Výpočtově.
- Pomocí světelné mikroskopie.
- Pomocí CT.

Výpočtová metoda je založena na využití vztahu 1 a znalosti objemových a váhových podílů matrice a vláken. Tyto jsou nejčastěji zjišťovány pomocí kalorimetrických testů dle ASTM D792 nebo ISO 10545-3 pomocí ethanolu a vody.

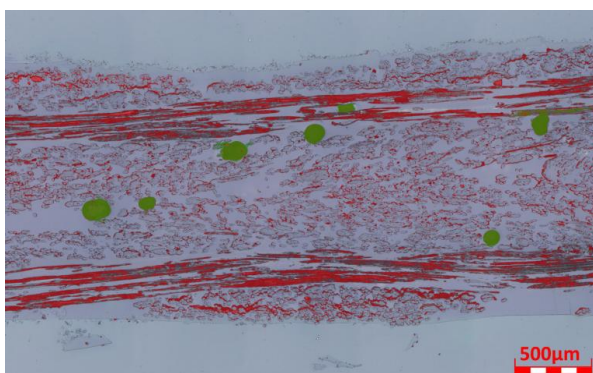
$$V_p = 1 - (V_f + V_m) \quad (1)$$

Pro případ hybridních kompozitů lze vyjádřit V_{fh} dle vztahu 2.

$$V_{fh} = \frac{\frac{m_{f1}}{\rho_{f1}} + \frac{m_{f2}}{\rho_{f2}}}{L \cdot w \cdot h} = \frac{\frac{n_{vrst1} \cdot m_{t1} \cdot L_1 \cdot w_1}{\rho_{f1}} + \frac{n_{vrst2} \cdot m_{t2} \cdot L_2 \cdot w_2}{\rho_{f2}}}{L \cdot w \cdot h} \quad (2)$$

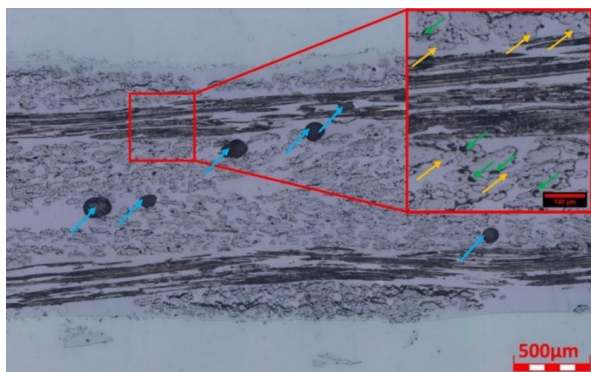
Dle uvedených vzorců je patrné, že metoda je velmi závislá na přesnosti jednotlivých měření a stanovení veličin.

V případě hodnocení porozity a dalších vlastností kompozitů opticky je třeba nejdříve připravit vzorek, který je řezem daného kompozitu. Využívány jsou vzorky zalité ideálně do kontrastní pryskyřice nebo materiály určené pro tyto účely. Důležitým parametrem při přípravě vzorku je nepřesáhnutí teplot degradujících jak pryskyřici, tak samotné lněné vlákno, tyto se pohybují dle použitých materiálů od 70 do 100 °C. V rámci přípravy vzorku je také nutné vynechat broušení finálních vrstev pod vodou, kdy materiál může nasáknout vlhkost a vlákna mění svůj objem. Při leštění na sucho je třeba také kontrolovat teplotu vzorku. Vyhodnocení vzorku je pak provedeno automaticky nebo manuálně v daném softwaru. Při automatickém vyhodnocení je důležité správně navolit prahovou hodnotu pro rozpoznání porozity (obr. 2.2).



Obr. 2.2 Nastavení prahové hodnoty k vyhledání pórovitosti

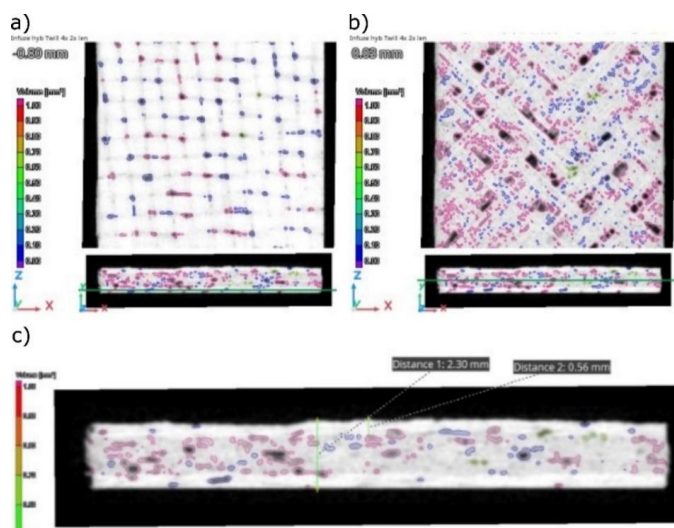
Při hodnocení hrají roli zejména zvětšení a rozlišení daného snímku a kontrast mezi vlákny, matricí a pórovitostí. Na obrázku 2.3 je pórovitost uvnitř lumenu menší než $2 \pm 0,5 \mu m$ a je označena oranžovými šipkami, pórovitost na rozhraní vláken způsobená špatným smáčením vláken je vyznačena zelenými šipkami. Tato dosahuje rozmezí velikostí 10–30 μm v závislosti na tvaru, v mnoha případech je tato pórovitost protáhlého tvaru podél vláken. Makropórovitost v pryskyřici je zobrazena modrými šipkami, zde je velikost ovlivněna mnoha faktory, pohybuje se od 50 do 300 μm , tvarem jsou tyto póry kulovitého tvaru.



Obr. 2.3 Řez lněným laminátem vyrobeným infuzí

Jednou z největších nevýhod optické mikroskopie je destrukce vzorku a hodnocení pouze v daném řezu nebo nutnost mnoha řezů s korespondujícím statistickým vyhodnocením.

Jako další způsob pro měření pórovitosti vzorků byla zvolena metoda počítačové tomografie (CT). U této metody je kritickým faktorem rozlišení snímače a daného softwaru. Tyto hodnoty ovlivňují možnost identifikace pórovitosti v materiálu. Pro hodnocení vzorků v této práci byly využity dva přístroje, a to Phoenix V|tome|x M300 a pro vzorky s nízkou porozitou na zařízení GE Phoenix V|tome|x L240 v laboratoři Rentgenové výpočetní mikro a nanotomografie výzkumného centra CEITEC VUT v Brně.

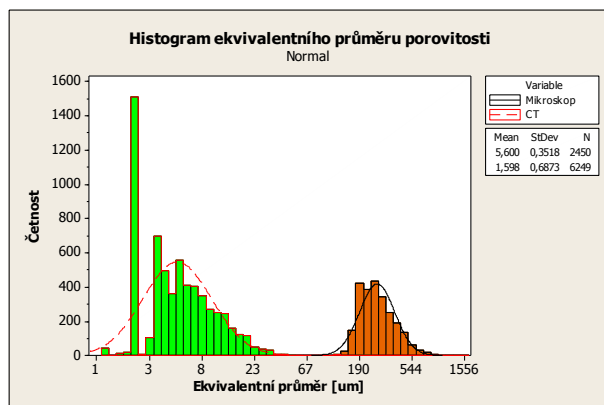


Poznámka: a) řez uhlíkem, b) řez lnem, c) detail řezu.

Obr. 2.4 Vzorek vytvořený infuzí – hybridní

Výhodou metody je stanovení pórovitosti i hybridních vzorků a možnost studie tvaru pórů a její distribuce v materiálu – obrázek 2.4.

Porovnání metod optické a CT je zobrazeno na obrázku 2.5, kde je zobrazen histogram ekvivalentního průměru pórů v závislosti na četnosti výskytu v materiálu pro 2D vzorek opticky měřený – četnost je značena zelenou barvou a pro metodu CT je četnost značena oranžově. Z grafu je dobře viditelné, že obě metody nelze považovat za rovnocenné pro vyhodnocení pórovitosti.



Obr. 2.5 Histogram pórovitosti vzorku I-CF04 – metodou optickou a CT

Tab. 2.1 Porovnání pórovitosti měřené různými metodami

	Tloušťka [mm]	Uhlík N vr. [-]	Len N vr. [-]	Vypočet Vp [%]	Mikroskop Vp [%]	CT Vp [%]
I-C01	2,02	8	0	2,48	0	0,29
I-CF04	1,48	4	1	7,05	5,37	13,15
I-F-T1	3,50	0	8	12,12	5,24	0,88
A-F-A	2,60	0	4	4,01	0,50	0,13
A-F-B	5,40	0	8	2,33	0,12	0,06
A-CF-C	1,90	4	1	3,22	0,95	0,08
A-CF-D	2,60	4	2	4,11	1,24	0,05

Z tabulky 2.1 je patrné, že pro lamináty obsahující len je vždy obsažena pórovitost, je to dáno již mikropórovitostí samotných vláken a nedostatky měření její hustoty, tato velikost vypočtené pórovitosti ovlivňuje nejvíce.

Pro obecné hodnocení porozity laminátu s lněnými vlákny platí u výpočtového modelu odchylka od teoretické hodnoty porozity v řádu 2–3 % a ta je dána jak chybou při měření komponent uvedenou výše, tak přirozenou pórovitostí lněných vláken v oblasti lumenu. Tato pórovitost je přirozená a promítá se do vlastností výsledného laminátu vždy. V případě optické mikroskopické metody a CT měření je výsledek značně odlišen rozlišením vyhodnocovaného snímku a metodou rozpoznávání jednotlivých komponent – vlákna, matrice a pórovitost. Tato měření jsou ovlivněna i lidským faktorem, který je přítomen při softwarovém zpracování měření. Jednou z dalších využitelných metod je rtuťová porozimetrie, díky které lze zjistit distribuci velikosti pórů a jejich relativní velikost, tato ovšem v době vypracování práce nebyla k dispozici. Nejlepších výsledků z hlediska pórovitosti dosáhly vzorky vyrobené pomocí autoklávu, nejhůře jsou na tom vzorky vyrobené ručně a hybridní vyrobené infuzí. U této technologie je nutné provést další experimentální vývoj pro určení vhodných parametrů zpracování pro dosažení minimální porozity.

2.2 MECHANICKÉ VLASTNOSTI KPV – PEVNOST

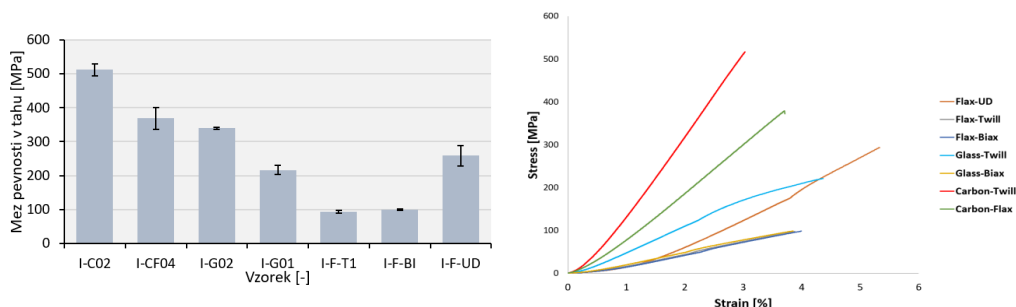
Z hlediska pevnosti bylo přistoupeno ke dvěma hlavním testům, a to testu pevnosti v tahu a testu pevnosti trojbodým ohybem. Měření pevnosti v tahu bylo provedeno pomocí měřicího stroje ZwickRoel Z100 dle normy EN ISO 527-4 (hlavní parametry a rozměry vzorku odpovídaly normě) [31].

Pokud jde o hodnocení morfologie a poškození, bylo k monitorování lomové plochy použito zařízení SEM Tescan Mira 4 pro charakterizaci selhání jednotlivých materiálů. Pro studium a srovnání chování kompozitních materiálů byl použit systém digitální korelace obrazu ARAMIS, který umožňuje přesně hodnotit chování materiálu pod zatížením v čase [32].

Hodnocení vzorků je rozděleno na dvě části, v první části jsou porovnány vzorky vyrobené pouze technologií infuze pro různé materiály – uhlíková, skleněná a lněná vlákna jak pro tah, tak třibodový ohyb. V další části jsou mezi sebou porovnány technologie autoklávu a infuze pro lněný a hybridní materiál.

Tahové zkoušky kompozitních materiálů

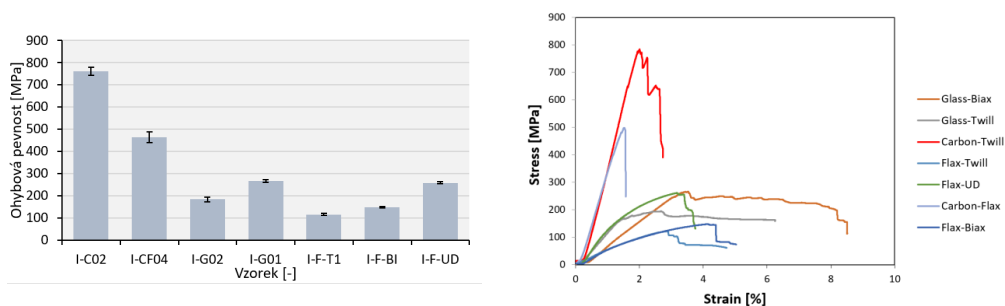
Tahové zkoušky byly prováděny na vzorcích vyrobených infuzí, kde byly testovány různé typy vláken: uhlíková, skleněná a lněná. Výsledky ukázaly, že kompozitní materiál s uhlíkovými vlákny (I-CO₂-uhlík) dosáhl nejvyšších hodnot jak tahového modulu, tak pevnosti. Hybridní materiál rovněž vykazoval velmi dobré vlastnosti překonávající skleněné a čisté lněné materiály (obr. 2.6). Lněný kompozit vykazoval výrazně nižší hodnoty tahového modulu a pevnosti v porovnání se sklem, a to jak pro keprové (twill), tak biaxiální tkaniny. Obecně se zjistilo, že keprový materiál vykazoval nižší hodnoty tahového modulu i pevnosti než biaxiální materiál. Měrná pevnost, definovaná jako mez pevnosti v tahu vůči hustotě daného materiálu, byla nejnižší pro lněné materiály s výjimkou jednosměrného (UD) materiálu, který dokonce překonával skleněné materiály.



Obr. 2.6 Mez pevnosti v tahu pro jednotlivé vzorky, graf závislosti napětí na deformaci [35]

Ohybové zkoušky

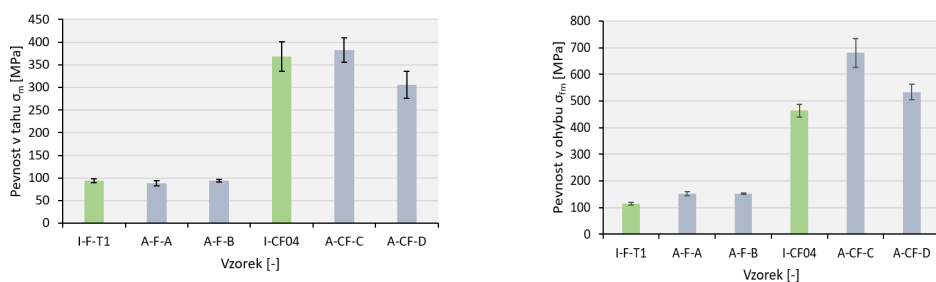
Ohybové zkoušky byly prováděny podle normy EN-ISO 14125:1999 na stejných materiálech jako tahové zkoušky. Výsledky ukázaly, že uhlíkové vzorky spolu s hybridními vykazovaly nejvyšší ohybové pevnosti. Skleněné a lněné vzorky měly nižší hodnoty, přičemž lněné vzorky dosahovaly nejnižších hodnot ohybového modulu a pevnosti (obr. 2.7). Zajímavé bylo, že hybridní vzorky dosahovaly pevností srovnatelných s uhlíkovými vzorky, což ukazuje na výhody kombinace různých typů vláken.



Obr. 2.7 Ohybová pevnost pro jednotlivé vzorky, graf závislosti napětí na deformaci [35]

Porovnání výrobních metod

Pro materiál lněný a hybridní bylo provedeno porovnání dvou výrobních metod, a to autoklávu a infuze pro vzorky s tkaninou typu kepr (twill). Na obrázku 2.8 jsou patrné hodnoty pro maximální napětí při přetržení vzorku, vzorky vyrobené infuzí jsou označeny zeleně. Vzorky vyrobené jen ze lnu mají téměř shodné hodnoty maximálního napětí a nízkou směrodatnou odchylku pro testované vzorky. U hybridních vzorků je patrné kolísání hodnot, vzorky s nejnižší tloušťkou dosahují nevyšších hodnot napětí, a to nezávisle na výrobní metodě, rozptýly již dosahují vyšších hodnot pro všechny vzorky.

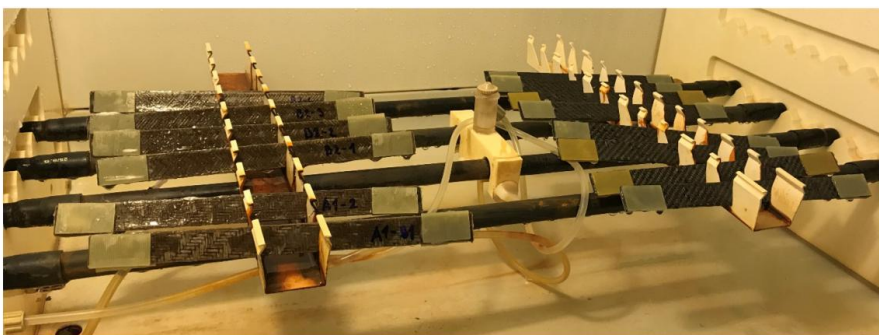


Obr. 2.8 Porovnání jednotlivých výrobních metod z hlediska pevnosti v tahu a ohybu

Z provedených testů je patrné, že lněné lamináty dosahují nejmenších pevností z hodnocených vzorků, ale také dosahují nejmenší hustoty materiálu. V případě porovnání měrné pevnosti již materiál UD lněný dosahuje vyšších hodnot než materiály skelné twill. Díky způsobu tkaní jsou lněné tkaniny s velmi volnou vazbou a dosahují nejmenších plošných hustot, v případě vylepšení metod tkaní a kompaktnosti vláken v osnově a útku by mohly vzniknout tkaniny s výrazně vyššími pevnostmi blízkými se skelným tkaninám. V případě ohybových vlastností, které mohou být pro některé aplikace stěžejní, se lněné materiály z hlediska měrné pevnosti vyrovnají materiálům skelným. Směr hybridizace je ideální z hlediska posílení struktur a získání maximálních pevností. Technologie výroby ovlivňuje zejména ohybové pevnosti těchto materiálů, a to tak, že autoklávové vzorky dosahují vyšších hodnot maximálních pevností.

Pevnostní testy po testu nasákavosti

Kapitola dále zahrnuje testy pevnosti po vystavení vzorků vlhkosti, které byly prováděny podle normy ISO 22836:2020. Vzorky byly vystaveny prostředí s 100% vlhkostí po dobu 100 hodin (infuzní vzorky) nebo 200 hodin (autoklávové vzorky). Po testu nasákavosti došlo k výraznému nárůstu tloušťky testovaných vzorků, což mělo vliv na jejich mechanické vlastnosti.



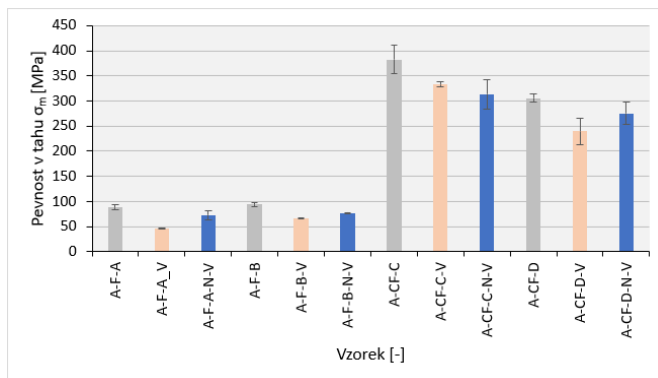
Obr. 2.9 Umístění vzorků v komoře

Testy nasákavosti probíhaly v klimatické komoře při teplotě 35 ± 2 °C a relativní vlhkosti 100 % po dobu 100 až 200 hodin v závislosti na typu vzorku (obr. 2.9). Po této době byly vzorky okamžitě podrobeny mechanickým testům na tah a ohyb. U vzorků vyrobených metodou vakuové infuze byl test zjednodušen, zatímco vzorky vyrobené v autoklávu byly podrobněji sledovány z hlediska nárůstu hmotnosti v čase. Boční hrany vzorků byly během přípravy ošetřeny epoxidovou pryskyřicí, aby se minimalizovala absorpce vlhkosti na řezných hranách, což by mohlo zkreslit výsledky.

V rámci testování byly porovnány tři typy materiálů: lněné UD kompozity, lněné dvouosé kompozity a hybridní kompozity. Výsledky ukázaly, že lněné vzorky mají tendenci výrazněji zvyšovat svou tloušťku po vystavení vlhkosti. Konkrétně lněné UD kompozity zvětšily tloušťku o 11,8 %, lněné dvouosé kompozity o 13,9 % a hybridní materiály pouze o 2,34 %. Tato data naznačují, že lněné materiály jsou více náchylné k absorpci vlhkosti, což může vést ke změnám jejich fyzikálních vlastností.

U hybridních kompozitů došlo ke snížení pevnosti v tahu o 28 % ve srovnání se standardními vzorky, zatímco lněné vzorky vykazovaly ještě výraznější poklesy vlastností.

Provedeny byly i testy s nátěrem, kdy je změna pevnosti materiálu značně vylepšena (obr. 2.10).

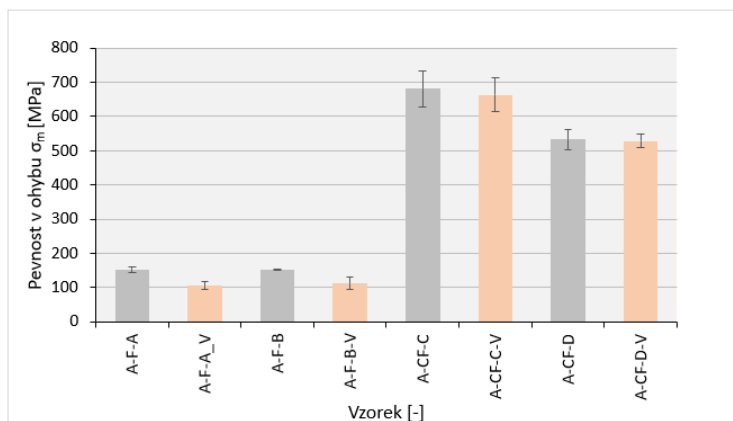


Obr. 2.10 Porovnání maximální pevnosti vzorků lněných a hybridních po testu nasákavosti s nátěrem a bez nátěru

Po vystavení vlhkosti došlo ke změnám v pevnosti a tuhosti testovaných materiálů. Pevnost v tahu a ohybu se u vzorků vyrobených infuzí a autoklávem lišila v závislosti na míře vlhkosti, kterou materiál absorboval. Lněné vzorky vykazovaly výrazný pokles mechanických vlastností po expozici, což bylo způsobeno zvýšením tloušťky a změnou vnitřní struktury materiálu vlivem

nasáknuté vody. Tento pokles mechanických vlastností může být kritickým faktorem při rozhodování o použití lněných kompozitů v aplikacích, které budou vystaveny vlhkým podmínkám.

Z těchto výsledků je zřejmé, že absorpce vlhkosti má značný vliv na mechanické vlastnosti kompozitních materiálů. Lněné kompozity, ačkoliv jsou ekologičtější a lehčí alternativou ke skelným a uhlíkovým vláknům, vykazují vyšší náchylnost k degradaci mechanických vlastností ve vlhkém prostředí. Na druhou stranu hybridní kompozity vykazovaly lepší odolnost vůči vlhkosti, což je činí vhodnějšími pro aplikace, kde je expozice vodě nevyhnutelná. Obdobně se chovaly i vzorky při testu ohybu (obr. 2.11).



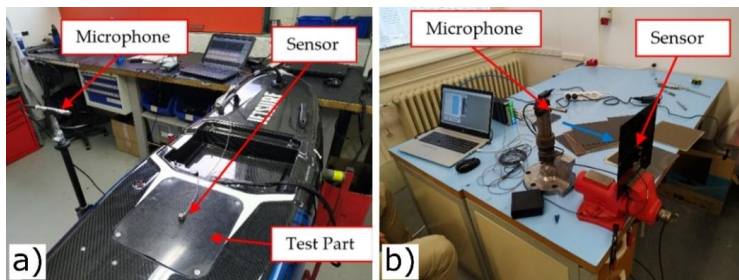
Obr. 2.11 Porovnání maximální pevnosti v ohybu pro vzorky lněné, hybridní v základním stavu a po testu nasákavosti

Nasákavost a ovlivnění mechanických vlastností vlivem působení vlhkosti je důležitým aspektem z hlediska pevnosti KPV – nejvyšší nasákavosti a tím i ovlivnění pevnostních charakteristik dosahují materiály, které nejsou ošetřeny nátěrem ani jiným způsobem, kdy klesá zejména pevnost v tahu a v menší míře i pevnost v ohybu. Hybridní vzorky vlivem nízkého ovlivnění vlhkosti uhlíkových vláken dosahují nejlepších výsledků i bez použití ochranných vrstev. Další práce bude zaměřena na typy povrchové úpravy a na její vliv na nasákavost.

3 FREKVENČNÍ CHARAKTERISTIKA A ÚTLUM HLUKU KPV

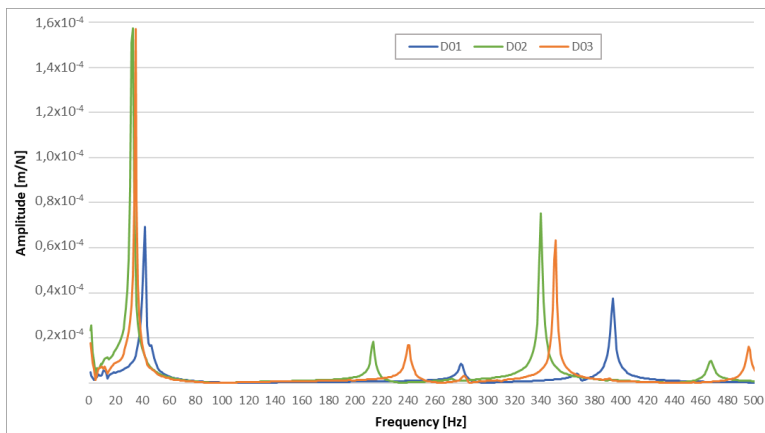
Cílem této kapitoly je analyzovat, jak tyto materiály reagují na vibrace a hluk v různých frekvenčních pásmech a jak mohou být efektivně využity pro aplikace, kde je snížení hluku a vibrační klíčovým požadavkem. Díky své unikátní struktuře mají přírodní vlákna, jako jsou len a konopí, vysokou schopnost tlumit vibrace, což z nich činí atraktivní volbu pro aplikace, kde je snížení hluku kritické, například v automobilovém a stavebním průmyslu [33] [34].

Experimentální část se zaměřuje na měření tlumicích vlastností různých KPV materiálů, přičemž byly použity různé metody měření, jako jsou frekvenční analýza a testování přenosu vibrací a hluku. Bylo přistoupeno k testům na reálném zařízení i k laboratornímu ověření. Reálná součástka, pro kterou se plánuje použití prezentovaného materiálu, je součástí motorového plováku s elektromotorem Jetsurf Electric společnosti MSR Engines. V současné době je konstrukce plováku vyrobena z uhlíkových vláken (obr. 3.1). Testovaným dílem byl kryt motorového prostoru ve třech variantách – originální, hybridní s lněnou vložkou a hybridní s částečnou lněnou vložkou. Bylo zjištěno, že kompozity s vyšším obsahem přírodních vláken mají lepší tlumicí vlastnosti, zejména v nízkofrekvenčním rozsahu, což je výhodné pro aplikace zaměřené na snížení hluku při nižších frekvencích.



Obr. 3.1 a) Reálné měření hluku na motorovém plováku, b) laboratorní měření odezvy desek

Naměřené hodnoty FRF (frekvenční odezvy) i RMS poukazují na potvrzení hypotéz. A to jak posunem frekvence, tak celkovým úhrnem vibrací, případně hluku na reálném kuse i na laboratorních vzorcích (obr. 3.2).



Obr. 3.2 Hodnoty FRF pro finální prototypy

Měření provedená na reálné součásti byla realizována s několika dílci obsahujícími lněná vlákna s hybridním složením uhlík-len. Tyto díly byly testovány jak laboratorně, tak prakticky při funkčním chodu motorového plováku. Dílce obsahující len mají oproti monolitním uhlíkovým dílům nižší přenosové funkce a vibrace dosahují menších amplitud při mírném přeladění frekvencí. Útlum hluku je také znatelný při využití lněných materiálů. Funkce tlumicí je pro dané materiály a jejich hybridní formy aplikačně využitelná.

4 OBRÁBĚNÍ KOMPOZITU S LNĚNÝMI VLÁKNY

Teorie a fyzikální podstata řezání pro kovové materiály je již značně pokročilá a věnuje se jí mnoho autorů pomocí analytických i dalších výpočetních metod [208] a mnoha dalších. Základním rozdílem oproti kovovým materiálům je možnost vytvořit širokou škálu materiálů s unikátními mechanickými a fyzikálními charakteristikami. Vzhledem k tomu, že proces tvorby třísek ovlivňuje nejen řezná rychlost, geometrie nástroje a podmínky řezání, ale především fyzikální vlastnosti zpracovávaného materiálu, vyžaduje každá kategorie kompozitních materiálů specifický přístup k hodnocení.

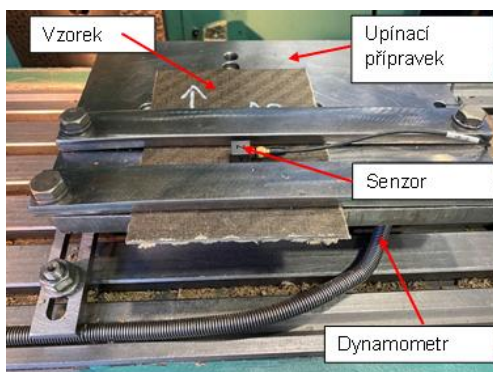
Testy obrábění probíhaly na vzorku vyrobeném v autoklávu A-F-D. Metodika testování byla stanovena po dílčích oblastech:

1. Stanovení cílů experimentu a cílových parametrů měření.
2. Přípravy měření – měřicí aparatury, vzorků.
3. Plánování experimentu – DOE.
4. Měření – sběr dat.
5. Vyhodnocení – statistické DOE, klasifikace odchylek a defektů.
6. Vyvození závěrů.

Hlavním cílem experimentu je výzkum řezivosti nástrojů pro kompozitní materiál s lněnými vlákny. Řezný proces v tomto případě ovlivňuje zejména geometrie nástroje a řezné podmínky, z hlediska trvanlivosti nástroje také řezný materiál nástroje a povlak. Trvanlivost nástroje není hlavním kritériem v tomto testu, ale je třeba ji sledovat i u těchto řezivostních testů z důvodu ovlivnění výsledků pro různé řezné rychlosti. Měřené parametry byly:

- řezná síla,
- vibrace,
- drsnost povrchu,
- poškození materiálu – otřepy.

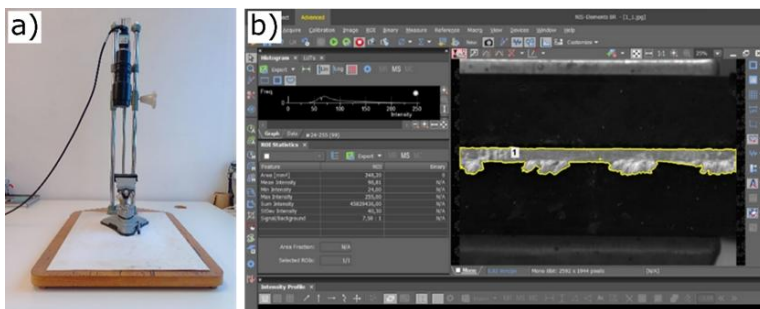
Měření probíhalo ve standardní sestavě obráběcí stroj – nástroj – dynamometr – senzor vibrací. Sestava co nejvíce přibližovala reálnou aplikaci ořezu dílců.



Obr. 4.1 Sestava měřicí aparatury umístěná na stroji – dynamometr, senzor vibrací

Analýza otřepů po obrábění byla realizována pomocí optické soustavy a stativu s monochromatickou kamerou a softwarem NIS Element. Sestava je uvedena na obrázku 4.2a; náhled softwaru je na obrázku 4.2b. Detekce otřepů byla definována jako celková plocha vzorku viditelného z kolmého čelního pohledu. Tato celková viditelná plocha je složena z řezu vzorku a plochy otřepů. Tato celková plocha byla vybrána na základě kontrastu ROI a byla spočtena číselná hodnota velikosti plochy. Velikost plochy byla kalibrována dle reálného měřeného průřezu

vzorku, dále je značena A_0 [mm]. S velikostí otřepů také souvisí problém delaminace. Vzhledem k charakteru otřepů lze u zkoumaných materiálů odlišit jednotlivou poruchu, zda se jedná o vytržené vlákno nebo o delaminaci. Delaminaci má význam hodnotit u vzorků bez výrazných otřepů.



Obr. 4.2 Měření velikosti otřepů

Plánování experimentu – DOE

V rámci plánovaného experimentu je nejdříve nutné provést volbu faktorů a jejich úrovní. V tomto případě byly zvoleny jako faktory:

- nástroj,
- otáčky – n ,
- rychlost posuvu – vf – posuvová rychlost.

Nástroje – vzhledem ke specifitě obrábění kompozitních materiálů byly vybrány čtyři druhy nástrojů pro obrábění, jeden s klasickou šroubovicí se čtyřmi břity a tři určené pro kompozitní materiály. Nástroje jsou uvedeny v tabulce 4.1. Nástroje 3 a 4 mají dvojitou opačnou šroubovici břitu – tato vytváří tzv. diamantový vzor (označení výrobců nástrojů). Teoretický počet břitů (průchodů) v jednom směru broušení je 4 pro nástroj č. 2 a 8 pro nástroj č. 3. Průměr 6 mm je shodný u všech použitých nástrojů. Všechny nástroje jsou ze slinutého karbidu, pouze nástroj č. 2 je opatřen povlakem. Nástroj č. 4 je opatřen pravotočivou spirálou a děleným břitem.

Tab. 4.1 Použité nástroje a jejich geometrické parametry

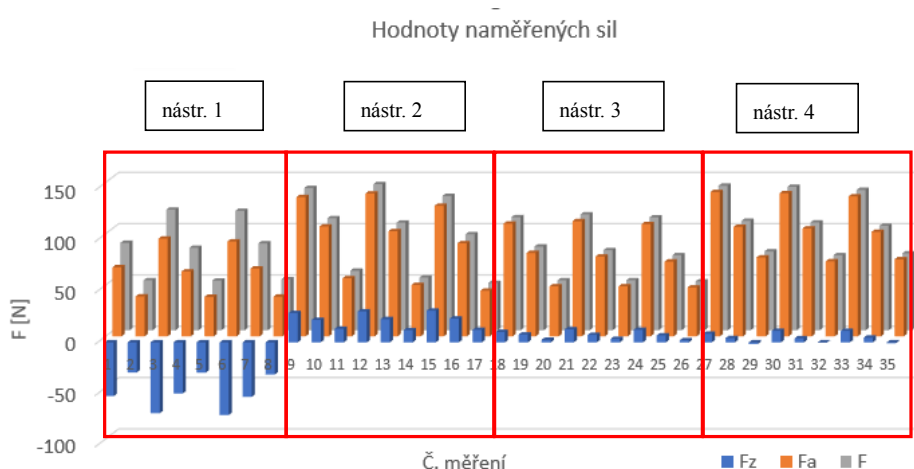
Nástroj	1	2	3	4
Výrobce	Pramet	Ceratizit	Ceratizit	Ceratizit
3D sken				
Obrázek				

Výsledné faktory a jejich úrovně jsou uvedeny v tabulce 4.2.

Tab. 4.2 Faktory a úrovně experimentu obrábění.

Faktor	Nástroj	Otáčky – n [min^{-1}]	Posuv na otáčku [mm]
Úroveň 1	1	4 200	0,2
Úroveň 2	2	6 000	0,4
Úroveň 3	3	8 000	0,6
Úroveň 4	4	-	-

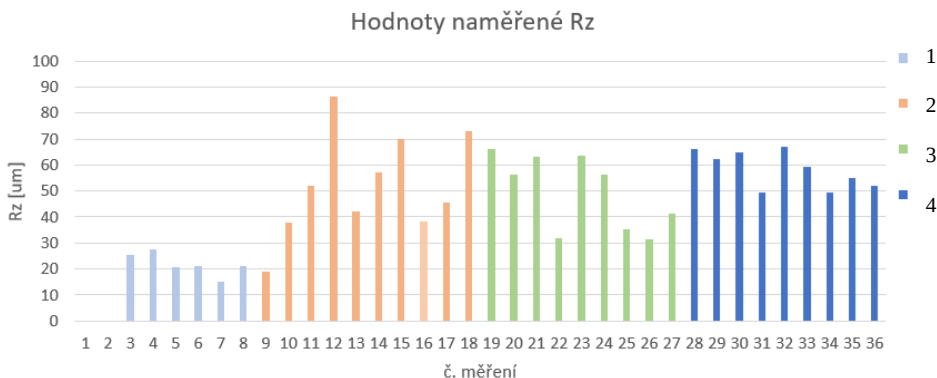
V rámci plánovaného experimentu byl vytvořen faktoriálníový uživatelský design bez opakování a byl zpracován v programu Minitab 15. Celkově je plánováno 36 měření pro všechny kombinace parametrů. Sledovány budou následně jednotlivé vlivy faktorů a jejich interakce.



Obr. 4.3 Naměřené hodnoty sil – aritmetický průměr za průjezd, graf dělen dle nástrojů

Naměřené hodnoty sil jsou zobrazeny na obrázku 4.3, kde jsou zvýrazněny oblasti pro každý nástroj. Měření s nástrojem č. 1 nemohlo být dokončeno kvůli zalepování nástroje, což způsobilo nepoužitelná data. U tohoto nástroje byly řezné síly záporné a výrazně vyšší kvůli úhlu šroubovice a nepřerušnému ostří, což táhne vlákna po ostří místo jejich řezání. Nástroj č. 1 a nástroj č. 3 vykazují nejnižší aktivní síly, přičemž nástroj č. 3 má dvojitou šroubovici, což snižuje pasivní síly při obrábění. Nástroje č. 2 a 4 mají podobné hodnoty aktivních sil, ale nástroj č. 4 vykazuje nejlepší hodnoty pasivních sil díky nejmenšímu úhlu stoupání šroubovice. Vyšší síly u nástrojů č. 2 a 4 jsou způsobeny větším počtem břitů a menším prostorem pro třísky, což při vyšších rychlostech vede k zalepování nástroje.

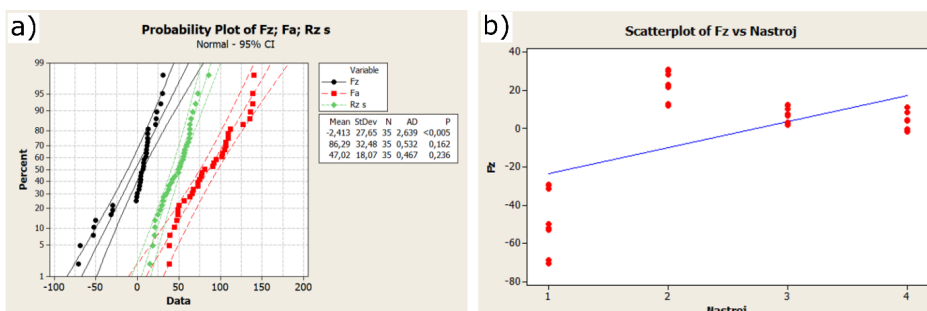
Hodnoty střední hloubky drsnosti R_z jsou uvedeny na obr. 4.5. Pro nástroj č. 1 jsou hodnoty nejmenší a naopak nejvyšší jsou pro nástroj č. 2.



Obr. 4.5 Hodnoty naměřené R_z , barevně rozděleno pro jednotlivé nástroje

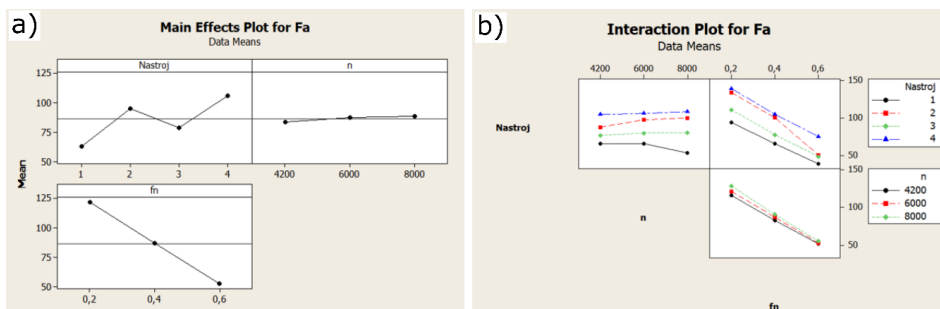
4.1 STATISTICKÉ VYHODNOCENÍ DOE

Z pohledu statistického vyhodnocení byla nejdříve provedena kontrola nenáhodných a náhodných vlivů v měření. Zde můžeme použít testy normálního rozdělení. Rozložení dat je na obrázku 4.6. Z grafu je zřejmé, že pro proměnnou – síla F_z P-hodnota nepřekračuje hranici 0,05, což naznačuje odchylku od normálního rozdělení. Odchylku lze vysvětlit přítomností záporných hodnot pro nástroj č. 1. Tyto jevy jsou vizualizovány na obrázku 4.6b společně s regresní křivkou. V případě proměnných F_a a R_z lze hypotézu normálního rozdělení považovat za potvrzenou.



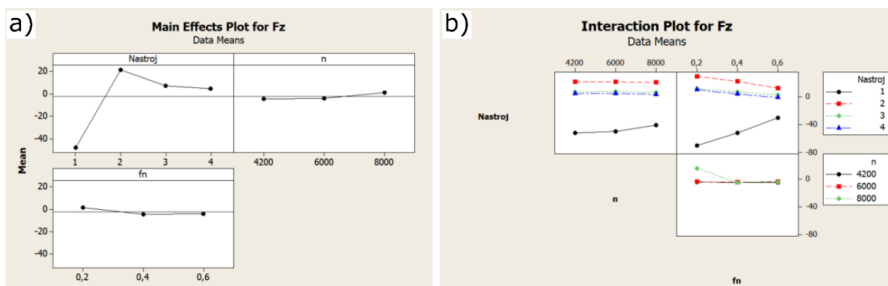
Obr. 4.6 Graf pravděpodobnosti rozložení dat F_z , F_a , R_z

Při hodnocení interakce a významnosti na zvolené hladině 5 % jednotlivých faktorů pro hodnocení F_a lze určit jako nevýznamnější faktor pro všechny nástroje hodnotu posuvu na otáčky, druhým nejvýznamnějším faktorem je tvar nástroje a jako poslední jsou otáčky. Z hlediska interakcí není žádná hodnota významnější. Je to také patrné z obrázku 4.7a, kde jsou efekty faktorů vizualizovány. Z grafu na obrázku 4.7b je patrné chování nástroje č. 2, kdy při zvýšení posuvu na 0,6 nastává skokové zvětšení řezné síly, to může být dáno již ztrátou odvodu třísek z místa řezu.



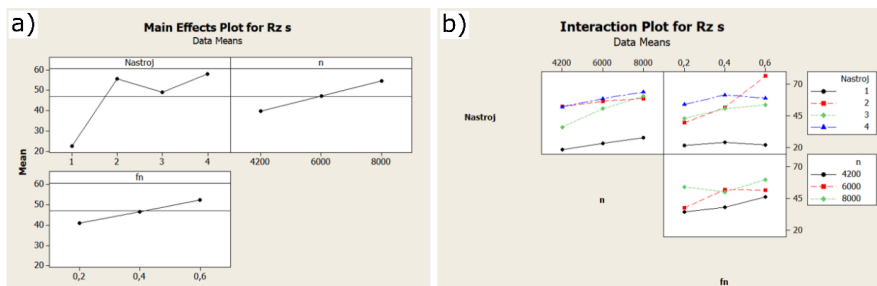
Obr. 4.7 Graf hlavních efektů při obrábění na sílu F_a [N]

Vliv faktorů na R_z již není tak výrazný jako u sil. Je zde dobře patrný vliv tvaru nástroje jako nejvýznamnější parametr (viz obr. 4.8). U R_z lze pozorovat odlišný trend než u síly F_a , kde nástroj č. 2 při zvýšené posuvové rychlosti skokově zhoršuje kvalitu povrchu součásti. Nástroj č. 1 má již shodný trend jako ostatní nástroje, ale hodnoty drsnosti jsou u něj násobně nižší než u ostatních nástrojů, také jako jediný nemá dělené ostří.



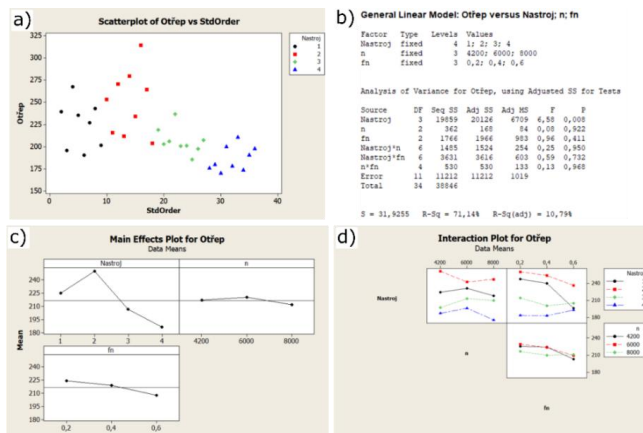
Obr. 4.8 Graf hlavních efektů při obrábění na sílu F_z [N]

Vliv faktorů na R_z již není tak výrazný jako u sil. Je zde dobře patrný vliv tvaru nástroje jako nejvýznamnější parametr (viz obr. 4.9). U R_z lze pozorovat odlišný trend než u síly F_a , kde nástroj č. 2 při zvýšené posuvové rychlosti skokově zhoršuje kvalitu povrchu součásti. Nástroj č. 1 má již shodný trend jako ostatní nástroje, ale hodnoty drsnosti jsou u něj násobně nižší než u ostatních nástrojů, také jako jediný nemá dělené ostří.



Obr. 4.9 Graf hlavních efektů při obrábění na drsnost povrchu R_z [μm]

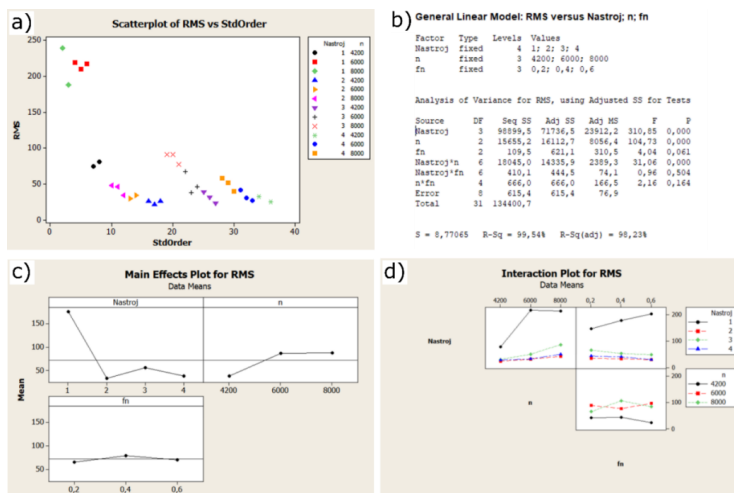
Analýza faktorů na otřepy je viditelná na obrázku 4.10a–d. Nejvyšším vlivem je opět nástroj, který zásadně ovlivňuje jejich velikost. Nástroj č. 4 dosahuje pro všechny kombinace posuvů a otáček nejnižších otřepů. Je to dáno jak počtem břitů, kdy při daném posuvu je menší posuv na zub, ale také je to dáno nejmenším úhlem šroubovice nástroje, která je pouze 8° oproti dalším nástrojům s úhly 20° – 30° .



Obr. 4.10 Analýza vlivu faktorů na otřepy – A_o

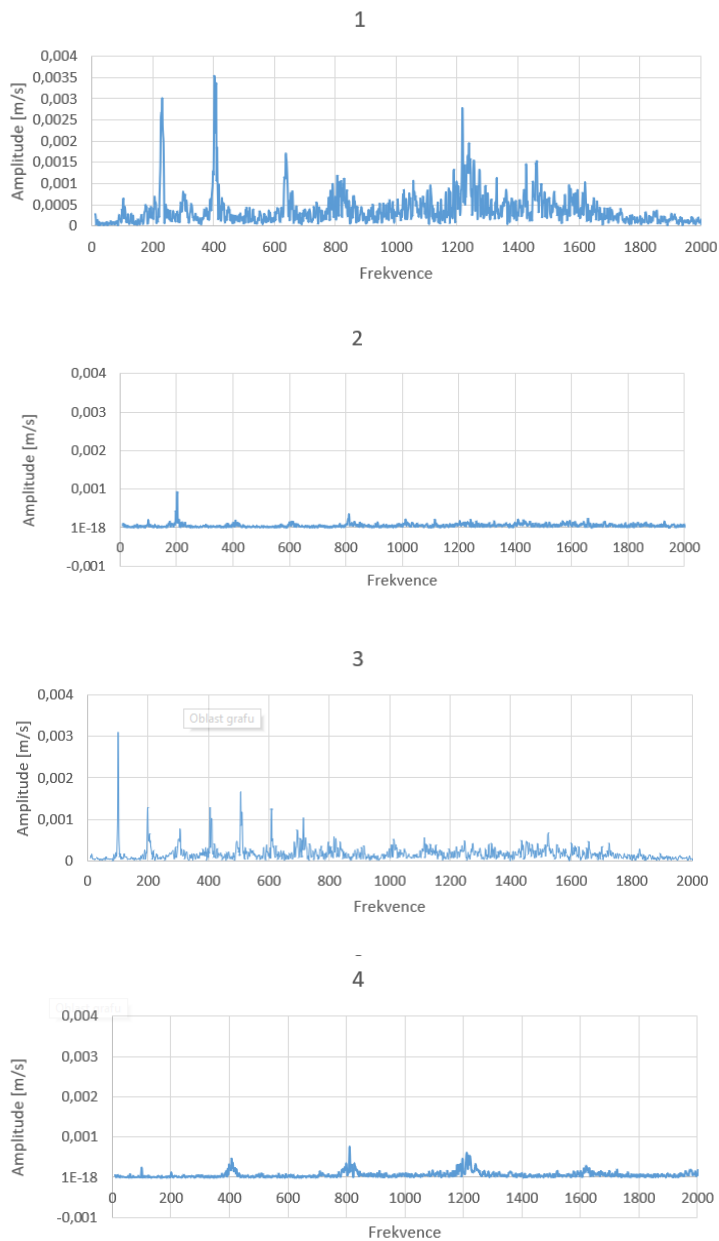
Analýza vibrací při obrábění

Byla provedena z hlediska jejich celkových úhrnů pomocí RMS (Root mean Square) – střední kvadratická hodnota. RMS hodnota je důležitá, protože poskytuje smysluplný způsob, jak kvantifikovat energii signálu vibrací. Statistické vyhodnocení je zobrazeno na obrázku 4.11a–d. Obrázek 4.11b definuje vliv faktorů na vibrace a zde je opět dominantní nástroj, ale otáčky jsou také významným faktorem a také jejich kombinace. Graficky jsou hodnoty vyneseny na obrázku 4.11a, kde jsou zobrazeny jak nástroje, tak jednotlivé otáčky. Je patrné, že nejvyšších hodnot dosahuje nástroj č. 1 pro otáčky 6 000 a 8 000. Další nástroje již mají podobný průběh, kdy pro vzrůstající otáčky vzrůstají i vibrace. Vliv posuvu na vibrace je velmi malý.



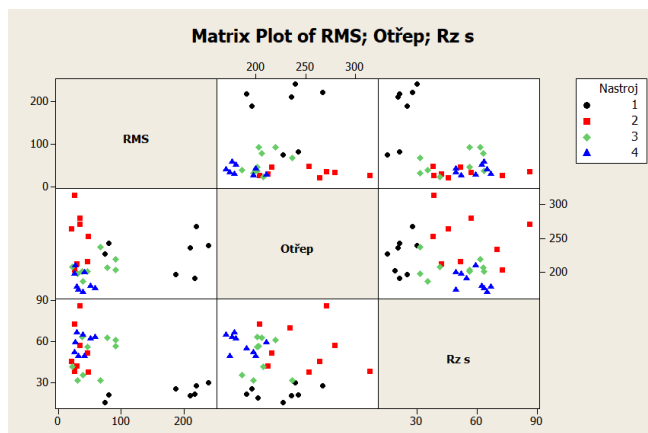
Obr. 4.11 Analýza vlivu na RMS

Dalším přístupem k hodnocení vibrací byl převod vibrací v časovém záznamu do frekvenčního spektra pomocí FFT (Fast Fourier Analysis), tímto byl získán přehled o dominantních frekvencích v procesu a také o jejich maximálních hodnotách. Tyto lze poté svázat se specifickým chováním experimentu. Z jednotlivých průběhů (viz obr. 4.12) je patrné, že u všech nástrojů je výrazná jak otáčková frekvence – dominantní pro nástroj č. 3, tak její harmonické násobky, které jsou ovlivněny zejména počtem zubů. Nástroj č. 1 má dominantní frekvence 200, 400 a 1 200 Hz, což jsou násobky zubové frekvence pro záběr dvou zubů. Nástroj č. 2 má dominantní pouze frekvenci 200 Hz. Nástroj č. 3 má dominantní otáčkovou frekvenci a její harmonické násobky a nástroj č. 4 frekvence 400, 800 a 1 200 Hz, které přesně odpovídají čtyřem zubům v záběru pro osmibřítý nástroj. Nejvíce vibrací je generováno nástrojem č. 1, a to s ohledem na skutečnost, že nemá dělené ostří, které by redukovalo silové zatížení působící na nástroj a obrobek.



Obr. 4.12 FFT pro jednotlivé nástroje

Souhrnné vykreslení parametrů v závislosti na nástrojích je zobrazeno na obrázku 4.13. Je zde dobře viditelné zvýšení hodnot pro nástroj č. 1, který oproti dalším v mnoha oblastech až téměř dvojnásobně překračuje jejich hodnoty.



Obr. 4.13 Vlivy jednotlivých parametrů na RMS, otřep a R_z

Obrábění kompozitu s přírodními vlákny bylo realizováno s cílem zjistit hlavní faktory, které ovlivňují řezný proces a kvalitu obrobené plochy. Tyto materiály kvůli své nízké tuhosti oproti např. uhlíkovým vykazují větší sklon k vibracím při obrábění a také k tvorbě otřepů vlivem houževnatosti samotných vláken. Jako hlavní faktor byl identifikován tvar nástroje, a to jak pro řezné síly, zejména v ose Z podílející se na vzniku vibrací, tak pro samotné vibrace a velikost otřepu. Nástroj č. 4 s nejmenším úhlem šroubovice a větším počtem zubů dosahoval nejlepších hodnot ve většině měřených parametrů. Naopak nástroj č. 1 – stopková fréza se standardní šroubovicí – vykazoval nejvyšší míru vibrací a otřepů ze všech použitých nástrojů. Frekvenční analýza prokázala u všech nástrojů hlavní vliv zubových frekvencí a jejich harmonických násobků.

5 ZÁVĚR

Habilitační práce se podrobně věnuje zkoumání potenciálu přírodních materiálů, zejména přírodních vláken, v oblasti kompozitních materiálů, přičemž kladě důraz na environmentální aspekty a možnosti průmyslových aplikací. Práce se zabývá využitím přírodních vláken jako obnovitelných zdrojů materiálů, které nabízejí ekologické výhody v podobě snížené závislosti na neobnovitelných surovinách a nižšího dopadu na životní prostředí díky lepším recyklačním možnostem na konci životního cyklu produktů. Výzkum se zaměřuje na nahrazení tradičních syntetických vláken, jako jsou skelná vlákna, přírodními alternativami, což může výrazně přispět ke snížení ekologické stopy výrobních procesů. Klíčovým přínosem této práce je identifikace optimálních výrobních technologií pro kompozity posílené přírodními vlákny, jako je využití autoklávu v kombinaci s vhodně zvolenými pryskyřicemi, což se ukázalo jako efektivní metoda zlepšující mechanické vlastnosti materiálů například pevnosti a modulu pružnosti a zároveň minimalizující jejich porozitu. Práce detailně analyzuje, jak tyto technologie ovlivňují výsledné vlastnosti kompozitů a doporučuje neefektivnější postupy pro jejich výrobu, čímž přispívá k jejich širšímu uplatnění v různých průmyslových odvětvích.

Výzkum provedený v této práci rovněž ukazuje, že přírodní kompozity, zejména ty vyrobené z lněných vláken, mohou dosáhnout mechanických parametrů srovnatelných s tradičně používanými syntetickými materiály. To naznačuje značný potenciál přírodních vláken pro jejich použití v aplikacích, kde je požadována vysoká pevnost a odolnost, což může zahrnovat jak konstrukční prvky v automobilovém a leteckém průmyslu, tak i specializované komponenty pro sportovní vybavení a další odvětví. Navíc díky své nižší hmotnosti a lepším tlumicím vlastnostem přírodní kompozity přinášejí další výhody, jako je efektivní tlumení vibrací a hluku, což bylo experimentálně prokázáno jak v laboratorních, tak v reálných provozních podmínkách, kde hybridní kompozity vykazovaly významné snížení vibrací a hluku, čímž se otevírají nové možnosti pro jejich využití v aplikacích vyžadujících nejen pevnost, ale i komfort a bezpečnost. Dalším důležitým aspektem zkoumaným v této práci je problematika vlhkosti a jejího vlivu na vlastnosti přírodních vláken, která je jedním z hlavních omezení jejich širšího využití. Absorpce vody může negativně ovlivnit mechanické vlastnosti kompozitů, což vyžaduje speciální opatření pro zlepšení jejich odolnosti vůči vlhkosti. Práce navrhuje několik efektivních řešení včetně aplikace ochranných vrstev a hybridizace s uhlíkovými vlákny, které významně zlepšují výkonnostní parametry materiálů a snižují negativní dopady vlhkosti. Hybridní struktury kombinující přírodní a syntetická vlákna tak nabízejí vyvážený kompromis mezi ekologickou udržitelností a požadovanými technickými vlastnostmi, což je klíčové pro jejich praktickou aplikaci v průmyslu.

Práce se také zabývá komplexním zkoumáním vlivu různých výrobních technologií na vlastnosti kompozitů s přírodními vlákny. Doporučení pro použití autoklávu jako optimální výrobní technologie je podloženo podrobnou analýzou porozity a mechanických vlastností, což zahrnuje nejen pevnost a modul pružnosti, ale také další klíčové vlastnosti, jako jsou odolnost proti nárazu a dlouhodobá stabilita materiálů. Tyto poznatky jsou dále rozšířeny o analýzu tlumicích vlastností kompozitů, kdy bylo zjištěno, že přírodní vlákna mohou významně přispět k tlumení vibrací a hluku, což je důležité pro aplikace v automobilovém a leteckém průmyslu, kde je požadována nejen vysoká pevnost, ale i schopnost pohlcovat energii a snižovat hladinu hluku. Experimentální část práce se zaměřuje na optimalizaci výrobních procesů kompozitů s přírodními vlákny zahrnující metody ruční laminace, vakuového infuzního procesu (VARTM) a použití prepregů v autoklávu, přičemž každý z těchto procesů byl podroben důkladnému zkoumání s cílem identifikovat nejlepší podmínky pro dosažení požadovaných vlastností materiálů. Analýzy

zahrnující výpočetní tomografii (CT), optickou mikroskopii a další diagnostické metody ukázaly, že použití autoklávu v kombinaci s vhodnou pryskyřicí vede k minimální porozitě a maximálním mechanickým vlastnostem, což je zásadní pro průmyslové aplikace, kdy je vyžadována vysoká spolehlivost a odolnost materiálů.

Kromě toho se práce podrobně věnuje obrábění kompozitních materiálů s přírodními vlákny, přičemž jsou analyzovány různé řezné podmínky a nástroje za použití metod plánovaného experimentu (DOE) a jejich statistického vyhodnocení, což umožňuje optimalizaci řezných procesů a zlepšení kvality finálních výrobků. Byly identifikovány klíčové faktory ovlivňující řezné síly, vibrace a povrchovou drsnost, které mají přímý dopad na produktivitu a kvalitu obrábění. Výsledky ukazují, že geometrie nástroje a řezné podmínky jsou zásadní pro minimalizaci potřeby dalšího postprocesingu a zvýšení efektivity výrobních procesů, což má významný přínos pro průmyslovou praxi, kde je třeba dosáhnout vysoké kvality při minimalizaci nákladů a času.

Závěrem lze říci, že práce přináší významný příspěvek k rozvoji vědy a praxe v oblasti kompozitních materiálů s přírodními vlákny, identifikuje klíčové faktory ovlivňující jejich vlastnosti a nabízí konkrétní doporučení pro optimalizaci výrobních procesů, čímž přispívá k širšímu využití těchto materiálů v různých průmyslových odvětvích. Práce také podporuje udržitelný rozvoj a inovace v materiálovém inženýrství, čímž napomáhá posilování konkurenceschopnosti a udržitelnosti průmyslových odvětví. Výstupy práce jsou integrovány do výuky na VUT v Brně, což dokládá jejich význam nejen pro vědecký výzkum, ale také pro praktickou přípravu budoucích odborníků, a přispívají k transferu znalostí mezi akademickou sférou a průmyslem, čímž podporují rozvoj inovací a technologického pokroku v oblasti kompozitních materiálů.

LITERATURA

- [1] EUROPEAN COMMISSION. *Funding & tender opportunities: High performance, circular-by design, biobased composites*. online. In: Horizon-ju-cbe-2023-ia-07. 2023. Dostupné z: <https://ec.europa.eu/info/funding-tenders/opportunities/portal/screen/opportunities/topic-details/horizon-ju-cbe-2023-ia-07>. [cit. 2024-02-26].
- [2] SKODA-AUTO. *ŠKODA AUTO sází u svých vozů na ekologické materiály a zkoumá biologické suroviny*. online. 2021. Dostupné z: <https://www.skoda-storyboard.com/cs/tiskove-zpravy-archiv/skoda-auto-sazi-u-svych-vozu-na-ekologicke-materialy-a-zkouma-biologicke-suroviny/>. [cit. 2024-02-26].
- [3] FIA. *FIA ENVIRONMENTAL REPORT 2023*. online. In: . 2023. Dostupné z: https://www.environmentalreport.fia.com/wp-content/uploads/2023/06/FIA__ENVIRONMENTAL_REPORT__2023.pdf. [cit. 2024-02-26].
- [4] NGO, Tri-Dung. Natural Fibers for Sustainable Bio-Composites. online. In: GÜNAY, Ezgi (ed.); GÜNAY, Ezgi. *Natural and Artificial Fiber-Reinforced Composites as Renewable Sources*. London: InTech, 2018. ISBN 978-1-78923-060-4. Dostupné z: <https://doi.org/10.5772/intechopen.71012>. [cit. 2022-08-26].
- [5] ADEKOMAYA, Oludaisi. Adaption of green composite in automotive part replacements: discussions on material modification and future patronage. online. *Environmental Science and Pollution Research*. 2020, roč. 27, č. 8, s. 8807-8813. ISSN 0944-1344. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s11356-019-07557-x>. [cit. 2022-08-26].
- [6] *Racing cars with body parts made from renewable raw materials - Porsche Newsroom*. online. In: Porsche.com. Dostupné z: <https://newsroom.porsche.com/en/2020/motorsports/porsche-718-cayman-gt4-clubsport-mr-natural-fibre-composite-body-kit-22439.html>. [cit. 2022-08-26].
- [7] *McLaren Racing - Revealed: How McLaren is pioneering the use of sustainable composites in F1*. online. In: The Official McLaren Website – McLaren.com. [cit. 2022-08-26].
- [8] HUSSAIN, Atif; CALABRIA-HOLLEY, Juliana; LAWRENCE, Mike a JIANG, Yunhong. Hygrothermal and mechanical characterisation of novel hemp shiv based thermal insulation composites. online. *Construction and Building Materials*. 2019, roč. 212, s. 561-568. ISSN 09500618. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.029>. [cit. 2022-08-26].
- [9] AROCKIAM, Naveen; JAWAID, Mohammad a SABA, Naheed. Sustainable bio composites for aircraft components. online. In: *Sustainable Composites for Aerospace Applications*. 1. Elsevier, 2018, s. 109-123. ISBN 9780081021316. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102131-6.00006-2>. [cit. 2022-08-26].
- [10] *BALTIC 68 CAFÉ RACER your day saler with attitude*. online. In: Baltic yachts. [cit. 2022-08-26].
- [11] *EcoOptimist – Northern Light Composites*. online. In: Northern Light Composites – Sustainable Composites. [cit. 2022-08-26].
- [12] *Bcomp solution sports*. online. Bcomp. Dostupné z: <https://www.bcomp.ch/solutions/sports/>. [cit. 2022-08-26].
- [13] BALEY, C; GOMINA, M; BREARD, J; BOURMAUD, M a DAVIES, P. Variability of mechanical properties of flax fibres for composite reinforcement. A review. *INDUSTRIAL CROPS AND PRODUCTS*. MAR, roč. 145. ISSN 0926-6690. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.111984>.
- [14] KHAN, Mohammad; SRIVASTAVA, Sunil a GUPTA, MK. Tensile and flexural properties of natural fiber reinforced polymer composites: A review. online. *Journal of Reinforced Plastics*

- and Composites. 2018, roč. 37, č. 24, s. 1435-1455. ISSN 0731-6844. Dostupné z: <https://doi.org/10.1177/0731684418799528>. [cit. 2022-08-26].
- [15] KHALFALLAH, M.; ABBÈS, B.; ABBÈS, F.; GUO, Y.Q.; MARCEL, V. et al. Innovative flax tapes reinforced Acrodur biocomposites: A new alternative for automotive applications. online. *Materials & Design*. 2014, roč. 64, s. 116-126. ISSN 02613069. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.07.029>. [cit. 2021-05-25].
- [16] KORONIS, Georgios; SILVA, Arlindo a FONTUL, Mihail. Green composites: A review of adequate materials for automotive applications. online. *Composites Part B: Engineering*. 2013, roč. 44, č. 1, s. 120-127. ISSN 13598368. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.07.004>. [cit. 2022-08-26].
- [17] FARUK, Omar; BLEDZKI, Andrzej; FINK, Hans-Peter a SAIN, Mohini. Progress Report on Natural Fiber Reinforced Composites. online. *Macromolecular Materials and Engineering*. 2014, roč. 299, č. 1, s. 9-26. ISSN 14387492. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/mame.201300008>. [cit. 2022-08-26].
- [18] SHAMSUYEVA, Madina; HANSEN, Ole a ENDRES, Hans-Josef. Review on Hybrid Carbon/Flax Composites and Their Properties. online. *International Journal of Polymer Science*. 2019, roč. 2019, s. 1-17. ISSN 1687-9422. Dostupné z: <https://doi.org/10.1155/2019/9624670>. [cit. 2021-09-17].
- [19] PEÇAS, Paulo; CARVALHO, Hugo; SALMAN, Hafiz a LEITE, Marco. Natural Fibre Composites and Their Applications: A Review. online. *Journal of Composites Science*. 2018, roč. 2, č. 4. ISSN 2504-477X. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/jcs2040066>. [cit. 2021-05-10].
- [20] BALEY, C; BOURMAUD, A a DAVIES, P. Eighty years of composites reinforced by flax fibres: A historical review: A historical review. *COMPOSITES PART A-APPLIED SCIENCE AND MANUFACTURING*. MAY, roč. 144. ISSN 1359-835X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2021.106333>.
- [21] KANDEMIR, Ali; POZEGIC, Thomas; HAMERTON, Ian; EICHHORN, Stephen a LONGANA, Marco. Characterisation of Natural Fibres for Sustainable Discontinuous Fibre Composite Materials. online. *Materials*. 2020, roč. 13, č. 9. ISSN 1996-1944. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/ma13092129>. [cit. 2022-08-26].
- [22] POILÂNE, C.; CHERIF, Z.E.; RICHARD, F.; VIVET, A.; BEN DOUDOU, B. et al. Polymer reinforced by flax fibres as a viscoelastoplastic material. online. *Composite structures*. 2014, roč. 112, č. 1, s. 100-112. ISSN 0263-8223. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2014.01.043>. [cit. 2024-02-16].
- [23] LE GALL, Maelenn; DAVIES, Peter; MARTIN, Nicolas a BALEY, Christophe. Recommended flax fibre density values for composite property predictions. online. *Industrial crops and products*. 2018, roč. 114, s. 52-58. ISSN 0926-6690. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.01.065>. [cit. 2024-02-16].
- [24] MADSEN, Bo a LILHOLT, Hans. Physical and mechanical properties of unidirectional plant fibre composites—an evaluation of the influence of porosity. online. *Composites science and technology*. 2003, roč. 63, č. 9, s. 1265-1272. ISSN 0266-3538. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(03\)00097-6](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(03)00097-6). [cit. 2024-02-16].
- [25] WHITACRE, Ryan; AMIRI, Ali a ULVEN, Chad. The effects of corn zein protein coupling agent on mechanical properties of flax fiber reinforced composites. online. *Industrial crops and products*. 2015, roč. 77, s. 232-238. ISSN 0926-6690. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.08.056>. [cit. 2024-02-16].
- [26] FEHRI, Meriem; RAGUEH, Rachid Robleh; VIVET, Alexandre; DAMMAK, Fakhreddine a HADDAR, Mohamed. Improvement of Natural Fiber Composite Materials by Carbon Fibers.

- online. *Journal of renewable materials*. 2017, roč. 5, č. 1, s. 38-47. ISSN 2164-6325. Dostupné z: <https://doi.org/10.7569/JRM.2016.634123>. [cit. 2024-02-16].
- [27] GURUNATHAN, T.; MOHANTY, Smita a NAYAK, Sanjay. A review of the recent developments in biocomposites based on natural fibres and their application perspectives. online. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2015, roč. 77, s. 1-25. ISSN 1359835X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2015.06.007>. [cit. 2022-08-27].
- [28] GOUDENHOOF, Camille; BOURMAUD, Alain a BALEY, Christophe. Flax (*Linum usitatissimum* L.) Fibers for Composite Reinforcement: Exploring the Link Between Plant Growth, Cell Walls Development, and Fiber Properties. online. *Frontiers in Plant Science*. 2019, roč. 10. ISSN 1664-462X. Dostupné z: <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00411>. [cit. 2022-08-27].
- [29] ZHOU, Yonghui; FAN, Mizi a CHEN, Lihui. Interface and bonding mechanisms of plant fibre composites: An overview. online. *Composites Part B: Engineering*. 2016, roč. 101, s. 31-45. ISSN 13598368. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.06.055>. [cit. 2022-08-27].
- [30] BEN AMEUR, Mariem; MAHI, Abderrahim; REBIERE, Jean-Luc; BEYAOUI, Moez; ABDENNADHER, Moez et al. Experimental fatigue behavior of carbon/flax hybrid composites under tensile loading. online. *Journal of Composite Materials*. 2021, roč. 55, č. 5, s. 581-596. ISSN 0021-9983. Dostupné z: <https://doi.org/10.1177/0021998320954903>. [cit. 2024-01-06].
- [31] Fibre-Reinforced Plastic Composites. Determination of Flexural Properties. online. *International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland*. 1999. [cit. 2024-02-16].
- [32] STRUNGAR, E. M.; YANKIN, A. S.; ZUBOVA, E. M.; BABUSHKIN, A. V. a DUSHKO, A. N. Experimental study of shear properties of 3D woven composite using digital image correlation and acoustic emission. online. *Acta Mechanica Sinica*. 2019, s. 448-459. Dostupné z: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10409-019-00921-7>. [cit. 2024-02-16].
- [33] AL-HAJAJ, Zainab; ZDERO, Radovan a BOUGHERARA, Habiba. Mechanical, morphological, and water absorption properties of a new hybrid composite material made from 4 harness satin woven carbon fibres and flax fibres in an epoxy matrix. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2018, roč. 115, s. 46-56. ISSN 1359-835X. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2018.09.015>.
- [34] FIORE, V; VALENZA, A a DI BELLA, G. Mechanical behavior of carbon/flax hybrid composites for structural applications. online. *Journal of Composite Materials*. 2012, roč. 46, č. 17, s. 2089-2096. ISSN 0021-9983. Dostupné z: <https://doi.org/10.1177/0021998311429884>. [cit. 2024-01-06].
- [35] ZOUHAR, Jan; SLANÝ, Martin; SEDLÁK, Josef; JOSKA, Zdeněk; POKORNÝ, Zdeněk et al. Application of Carbon-Flax Hybrid Composite in High Performance Electric Personal Watercraft. online. *Polymers*. 2022, roč. 14, č. 9. ISSN 2073-4360. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/polym14091765>. [cit. 2024-02-24].

ABSTRAKT

Tato habilitační práce se zaměřuje na využití přírodních materiálů ve výrobě kompozitů s ohledem na environmentální udržitelnost a průmyslovou aplikovatelnost. V práci jsou prozkoumány možnosti nahrazení tradičních materiálů, jako jsou skelná vlákna, přírodními vlákny, přičemž je kladen důraz na lněné kompozity a jejich mechanické vlastnosti. Bylo provedeno porovnání pevnosti a modulu v tahu a ohybu s konvenčními materiály a potenciálu pro hybridizaci s uhlíkovými vlákny pro zlepšení výkonnosti. Dále je popsán problém s absorpcí vlhkosti přírodními vlákny, kde bylo zjištěno, že použití nátěrů a ochranných vrstev může tento negativní jev částečně omezit. Na základě těchto dat byla řešena problematika výrobních technologií, především využití autoklávu, která přispívá k lepším materiálovým vlastnostem a efektivnějšímu výrobnímu procesu. V rámci práce bylo provedeno hodnocení vlivu obrábění na kvalitu obrobků, kdy metody plánovaného experimentu a statistického vyhodnocení umožnily identifikovat optimální parametry pro řezné síly a drsnost povrchu. Výsledky této práce poskytují důležitý přínos pro vývoj udržitelných materiálů a technologií v oblasti kompozitů a nabízejí nové možnosti pro průmyslové aplikace, a tedy pro spolupráci FSI VUT v Brně s praxí.

ABSTRACT

This habilitation thesis focuses on the use of natural materials in the production of composites with an emphasis on environmental sustainability and industrial applicability. The work explores the possibilities of replacing traditional materials, such as glass fibers, with natural fibers, with a focus on flax composites and their mechanical properties. A comparison of strength and modulus in tension and bending with conventional materials was conducted, along with the potential for hybridization with carbon fibers to improve performance. The issue of moisture absorption by natural fibers is described, where it was found that the use of coatings and protective layers can partially mitigate this negative effect. Based on these findings, the issue of manufacturing technologies, primarily the use of autoclaves, which contribute to better material properties and a more efficient manufacturing process, was addressed. The work includes an evaluation of the impact of machining on the quality of machined parts, where planned experiment methods and statistical evaluation allowed for the identification of optimal parameters for cutting forces and surface roughness. The results of this work provide an important contribution to the development of sustainable materials and technologies in the field of composites and offer new possibilities for industrial applications, and BUT FME collaboration with companies.